

Progetto di elementi strutturali:

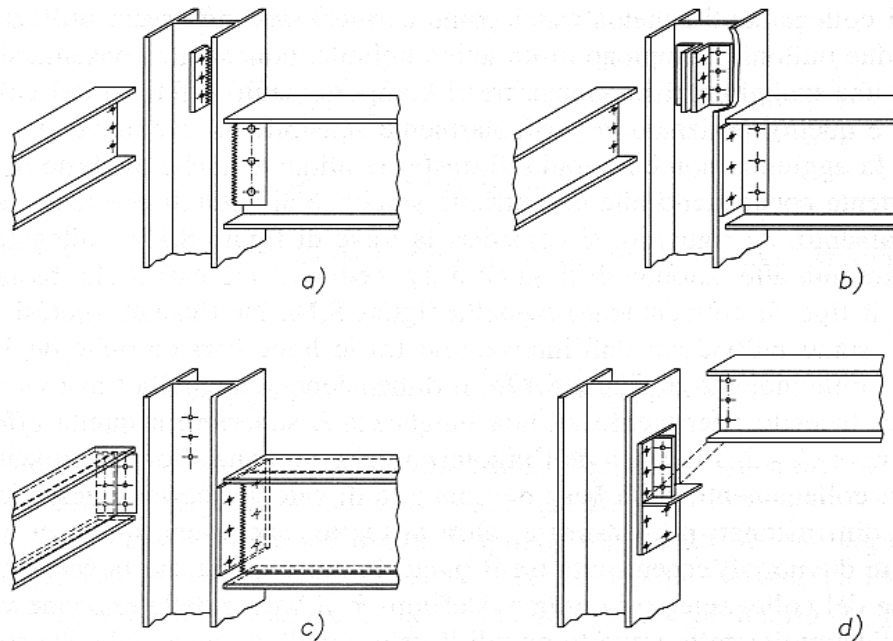
Giunto trave-colonna

I giunti trave-colonna sono tra gli elementi fondamentali della progettazione delle strutture in acciaio e possono essere realizzati in svariati modi collegando la trave all'anima della colonna oppure all'ala con soluzione bullonata o saldata o mista.

Nella modellazione di tali collegamenti spesso si usano sostanzialmente due casi particolari: giunto cerniera, giunto incastro o incastro parziale. Ovviamente essi devono essere in grado di sopportare situazioni differenti dal punto di vista delle caratteristiche di sollecitazione e pertanto è necessario che la progettazione e la realizzazione tecnica di tali collegamenti sia il più possibile accurata.

- Giunto a cerniera:

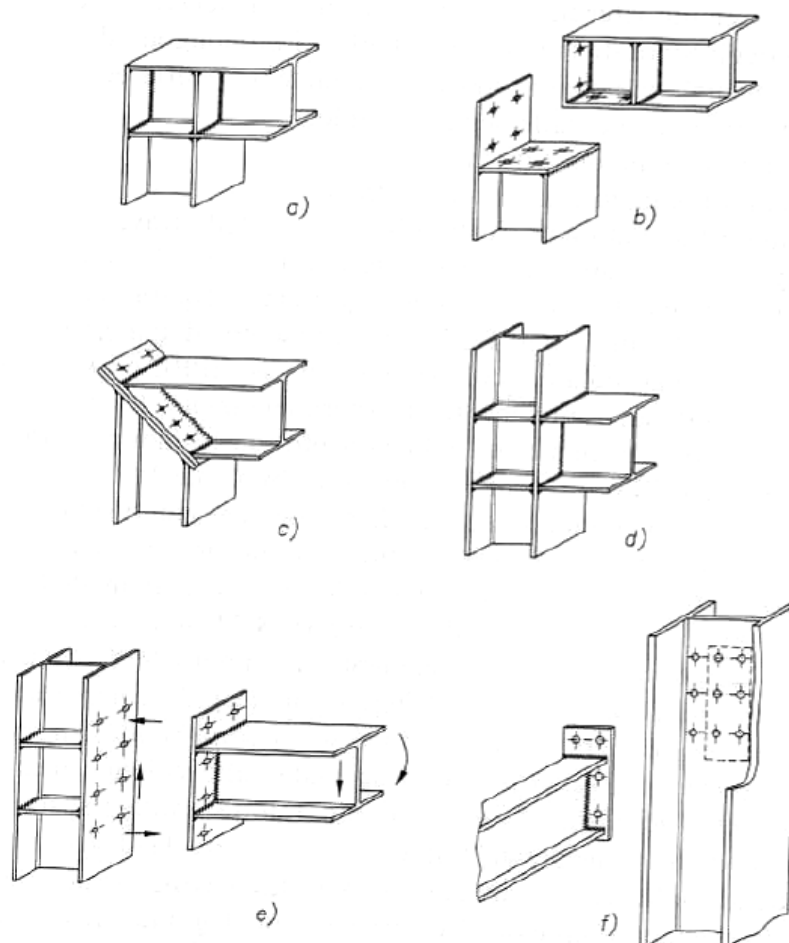
Esso non ha capacità trasmettere le azioni flettenti mentre deve possedere una adeguata capacità rotazionale in modo tale da esprimere al meglio il vincolo di cerniera. Essa costruttivamente può essere realizzata con differenti dettagli costruttivi che sono comprovati dall'esperienza e di cui si mostrano alcuni disegni:



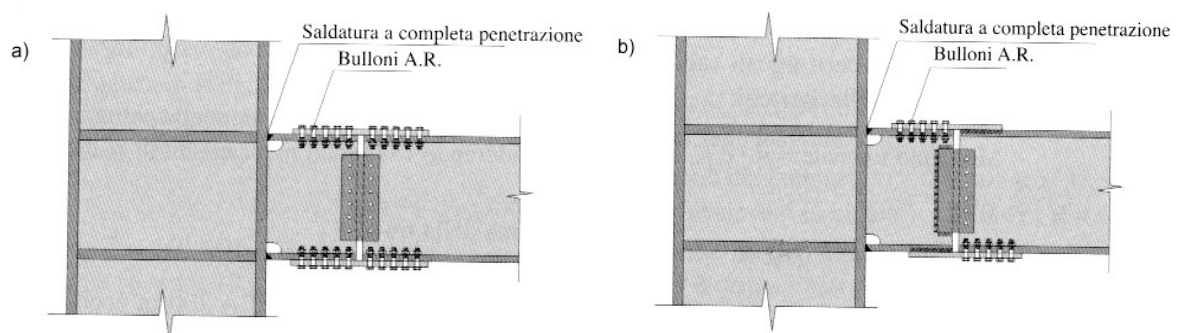
- Giunto ad incastro

Nel caso invece che nella modellazione si utilizzi il vincolo di incastro non è permessa alcuna rotazione della sezione e deve essere in grado di trasmettere le azioni flettenti agenti sulla trave alla colonna. Il collegamento avviene generalmente all'ala della colonna, dotata di maggior inerzia rispetto all'anima. La possibilità di realizzare un giunto che sia schematizzabile come incastro dipende non solo dalle verifiche di resistenza, ma implica che la deformabilità del

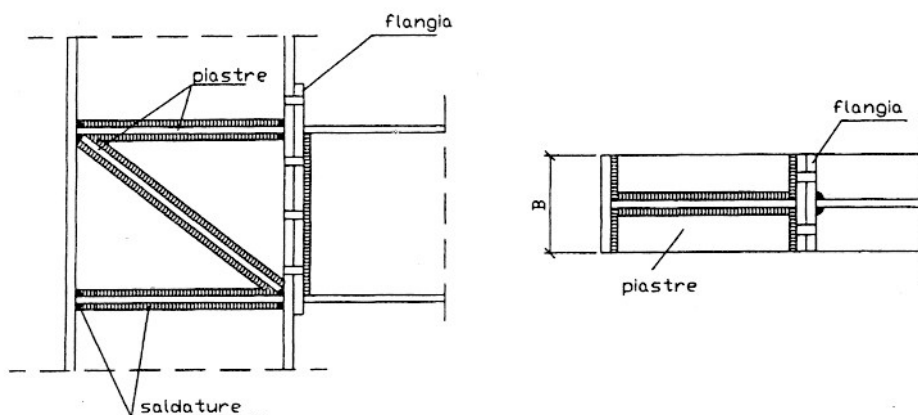
giunto (soprattutto in termini di rotazione) sia molto limitata. Alcune delle soluzioni proposte sono quelle indicate in figura.



N.B.: per realizzare un vero e proprio incastro, un'ulteriore soluzione costruttiva sarebbe quella di saldare in officina alla colonna una parte della trave con una certa lunghezza (colonne ad albero) e poi realizzare un giunto trave-trave.



E' a volte opportune inserire delle piastre di irrigidimento orizzontali e diagonali (in figura il giunto e).



Esperienze statunitensi hanno dimostrato che non sono necessari i piatti se sono rispettati certi vincoli; in particolare se:

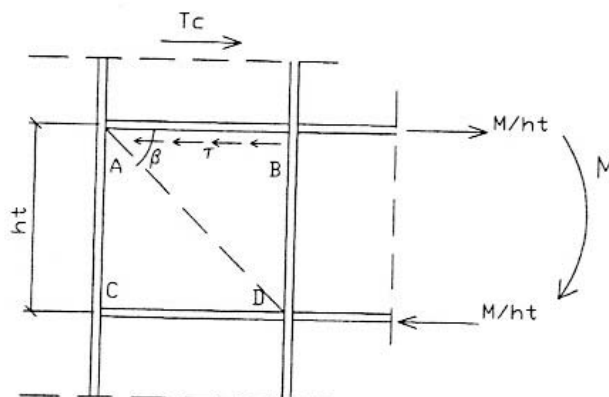
$$s_a \geq \frac{h_a}{30} \cdot \sqrt{\frac{235}{f_d}}$$

Con:

s_a spessore anima della colonna

h_a altezza anima della colonna

- Le piastre orizzontali servono ad aumentare il grado di incastro del vincolo ed evitare delle possibili deformazioni delle ali della colonna dovute all'azione della trave. Si pongono di spessore uguale a quello delle ali della trave e larghezza pari a quella delle ali della colonna, per esse non è necessaria alcuna verifica.
- Le piastre diagonali sono necessarie se la sezione di anima della colonna non è idonea a resistere all'azione tagliante sulla colonna T_c sommata alla forza $F = M/h_t$ trasmessa dalla trave come evidenziato dal disegno.



Quindi agli SLU, l'equilibrio è fornito da

$$\tau_u \cdot A_a = T + F \quad \text{dove } \tau_u = \frac{f_d}{\sqrt{3}} \quad \text{e } A_a = \text{area minima necessaria anima}$$

Quindi non sono necessari i piatti irrigidenti diagonali se:

$$A_a \leq h_a \cdot s_a$$

Se $A_a > h_a \cdot s_a$ invece occorrono piastre diagonali.

L'area occorrente che dovrà essere fornita dalle piastre diagonali sarà:

$$A = A_a - h_a \cdot s_a \quad \text{per cui}$$

$A = A_d \cos \beta$ dove $A_d = s_d \cdot (b - s_a)$ è l'area delle piastre diagonali (s_d spessore piastra diagonale e b larghezza delle ali della colonna).

Da ciò si ricava s_d .

Focalizzando ora l'attenzione sulla progettazione di un nodo trave colonna di tipo incastro a parziale ripristino si assumono a titolo di esempio le seguenti caratteristiche della sezione:

- COLONNA HEA 400 Fe 430 $f_d = 275 \text{ N/mm}^2$

$h = 390 \text{ mm}$ altezza sezione

$b = 300 \text{ mm}$ larghezza ali

$a = 11 \text{ mm}$ spessore anima

$e = 19 \text{ mm}$ spessore ali

- TRAVE HEA 300 Fe 430 $f_d = 275 \text{ N/mm}^2$

$h = 290 \text{ mm}$ altezza sezione

$h_1 = 208 \text{ mm}$ altezza anima

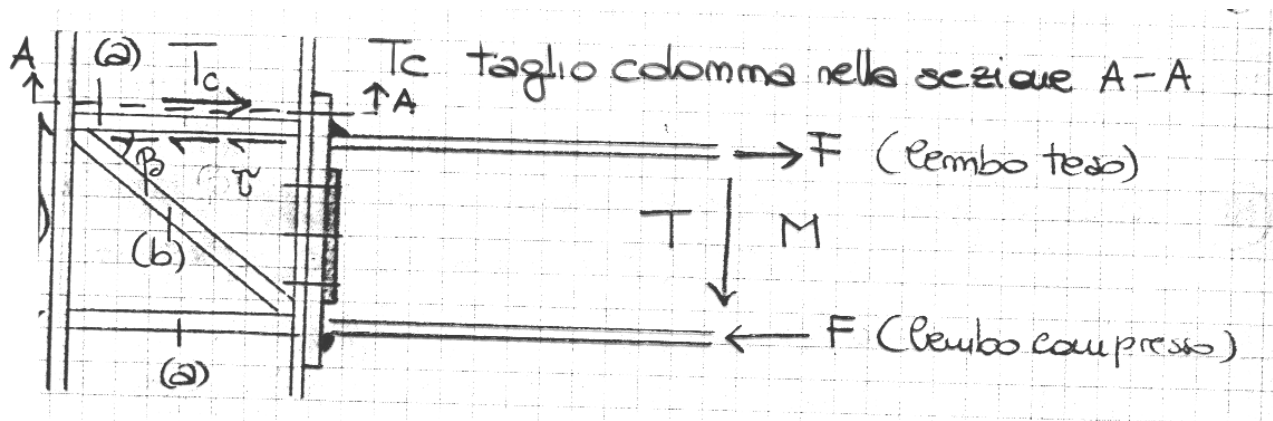
$B = 300 \text{ mm}$ larghezza ali

$W_x = 1260000 \text{ mm}^3$

$A = 11200 \text{ mm}^2$

Ipotizziamo che le caratteristiche di sollecitazione trasmesse dalla trave agli SLU siano $T = 100000 \text{ N}$ e $M = -130000 \text{ Nm}$.

Il collegamento che si realizza è del tipo flangia saldata alla trave in officina e bullonata in cantiere alla colonna (tipo e dal grafico sopra).



- **Necessità piastre irrigidenti**

Nel caso in questione si pongono in opera piastre orizzontali di spessore uguale a quello delle ali della trave e larghezza pari a quella delle ali della colonna. Dal calcolo

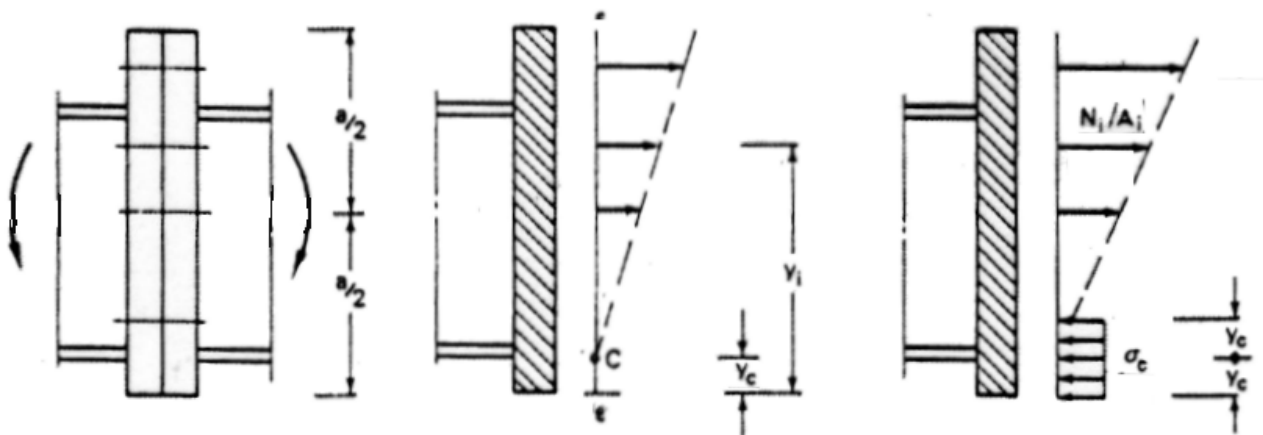
$$s_a = 11 \text{ mm} \geq \frac{h_a}{30} \cdot \sqrt{\frac{235}{f_d}} = \frac{(390 - 2 \cdot 19)}{30} \cdot \sqrt{\frac{235}{275}} = 10.84 \text{ mm}$$

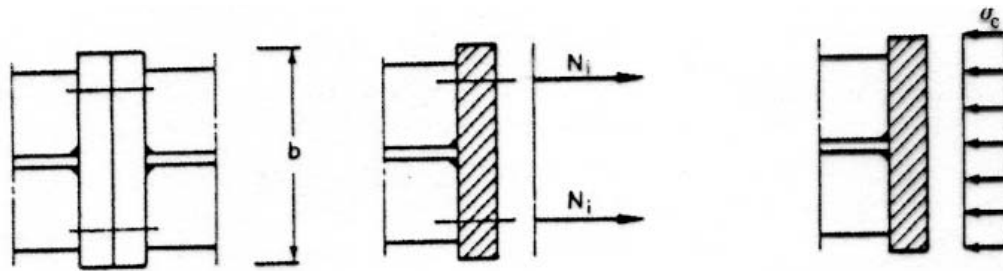
Quindi non sarebbero necessarie piastre diagonali.

- **Verifica dei bulloni**

Per questo tipo di giunto occorre che la flangia sia sufficientemente rigida da evitare deformazioni e non permettere spostamenti. Si assume così che essa sia circa pari allo spessore dell'ala della colonna.

Sotto tali ipotesi si riporta nel seguito la teoria tratta da: "Strutture in acciaio" (Ballio Mazzolani, pagg. 274-282) che riporta l'andamento delle tensioni sulla sezione (considerando il solo momento flettente) e quindi quali forze agiscano sui bulloni.





Hp: Flangia rigida

C = centro di rotazione corrispondente all'irrigidimento (a $\frac{1}{2}$ dello spessore dell'ala della trave)

B = larghezza delle ali della trave = 300 mm

y_c = distanza dal bordo della flangia al centro C

Equazioni di equilibrio alla traslazione

R = risultante di compressione su un'area $B \cdot 2 \cdot y_c$ quindi $R = \sigma_c \cdot B \cdot 2 \cdot y_c$

$\sum_i N_i$ = risultante di trazione sui bulloni

$$\text{quindi } R = \sum_i N_i \text{ da cui } \sigma_c = \frac{R}{B \cdot 2 \cdot y_c} = \frac{\sum_i N_i}{B \cdot 2 \cdot y_c} \leq f_d$$

Equazioni di equilibrio alla rotazione (polo C)

$$N_i = k \cdot A_i (y_i - y_c)$$

dove N_i sforzo assiale sul bullone; k rigidezza assiale del bullone ; A_i area resistente del bullone

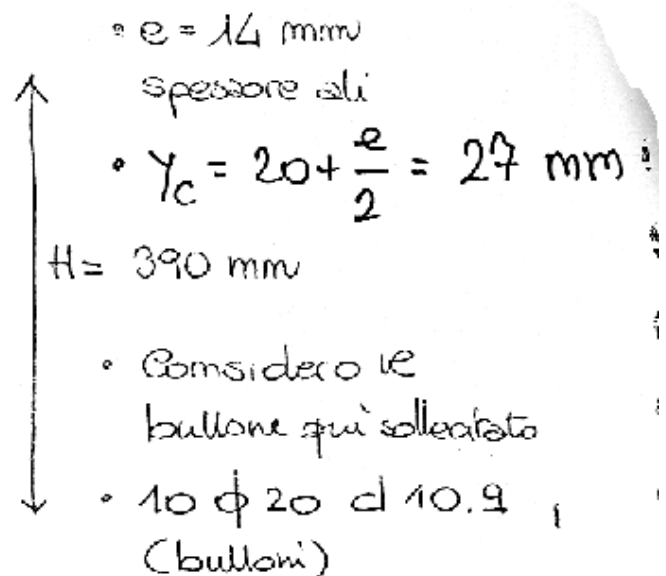
$$\sum_i N_i (y_i - y_c) = M$$

$$\text{quindi } N_i = \frac{M}{\sum_i k \cdot A_i (y_i - y_c)^2} k \cdot A_i (y_i - y_c)$$

$$\text{da cui per bulloni uguali } N_i = \frac{M}{\sum_i (y_i - y_c)^2} (y_i - y_c)$$

NB: si considera che solo i bulloni in trazione (e non quelli in compressione) forniscano un contributo alla resistenza per il momento flettente.

Ciò premesso si studia la sezione indicata con le relative misure:


$$\left(\frac{\tau}{f_{d,v}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{f_{d,N}}\right)^2 \leq 1$$
$$\tau = \frac{T}{n_b \cdot A_{res}} = \frac{100000}{10 \cdot 245} = 40 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_{\text{res}}}$$

$$N_{\max} = \frac{M}{n_{\text{file}} \cdot \sum_i (y_i - y_c)^2} \cdot (y_{\max} - y_c) \quad \text{dove } n_{\text{file}} = 2$$

$$\sum_i (y_i - y_c)^2 = \left[\left(\frac{e}{2} + 41 \right)^2 + \left(\frac{e}{2} + 101 \right)^2 + \left(\frac{e}{2} + 161 \right)^2 + \left(\frac{e}{2} + 221 \right)^2 + \left(\frac{e}{2} + 321 \right)^2 \right] = 201760 \text{ mm}^2 \quad 1 \text{ fila}$$

$$(y_{\max} - y_c) = \left(\frac{e}{2} + 321 \right) = 7 + 321 = 328 \text{ mm}$$

$$N_{\max} = \frac{130000000}{2 \cdot 201760} \cdot 328 = 105760 \text{ N}$$

$$\sigma_{\max} = 431 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Quindi:

$$\left(\frac{40}{495} \right)^2 + \left(\frac{431}{700} \right)^2 = 0,39 \leq 1 \quad \text{verificato}$$

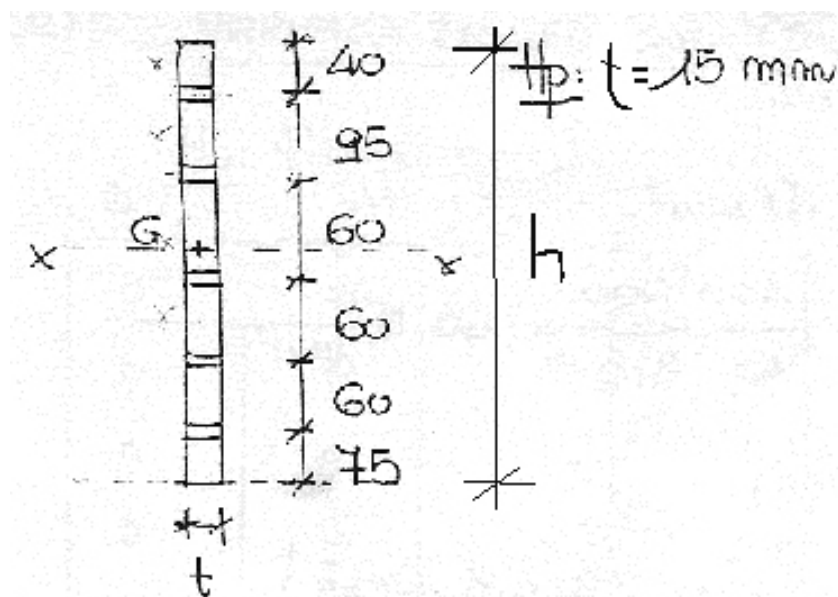
- Verifica di resistenza della flangia**

La flangia nella sezione 2-2 sarà soggetta a:

$$T_2 = \frac{T}{2} = \frac{100000}{2} = 50000 \text{ N}$$

$$M_2 = T_2 \cdot b' = 50000 \cdot 60 = 3000000 \text{ Nmm}$$

Analizzando la sezione e il grafico seguente si valutano l'area e l'inerzia netta della sezione:



$$A_n = (h - \phi \cdot 5) \cdot t = (390 - 22 \cdot 5) \cdot 15 = 4200 \text{ mm}^2$$

Per determinare l'inerzia della sezione occorre innanzitutto trovarne il baricentro visto che la sezione attraverso l'eguaglianza dei momenti statici.

$$y_g = \frac{\sum_i A_i \cdot (y_i - y_c)}{A_{tot}} =$$

$$= \frac{15 \cdot \left\{ (390 - 20) \cdot (40 - 11) + \left(390 - 40 - \frac{95}{2} \right) \cdot (95 - 22) + (390 - 40 - 95 - 30) \cdot (60 - 22) \right\}}{4200} +$$

$$+ \frac{15 \cdot \left\{ (390 - 40 - 95 - 60 - 30) \cdot (60 - 22 - 22) + (75 + 30) \cdot (60 - 22) + \left(\frac{75}{2} \right) \cdot (75 - 11) \right\}}{4200} \cong 193 \text{ mm}$$

Da cui:

$$J_n =$$

$$= \left[\left(\frac{1}{12} \cdot t \cdot h^3 - \frac{n_b}{12} \cdot t \cdot \phi_f^3 - t \cdot \phi_f \cdot \left[(193 - 75)^2 + (193 - 135)^2 + (193 - 195)^2 + (255 - 193)^2 + (350 - 193)^2 \right] \right) \right] =$$

$$= \left[\left(\frac{1}{12} \cdot 15 \cdot 390^3 - \frac{5}{12} \cdot 15 \cdot 22^3 - 15 \cdot 22 \cdot \left[(193 - 75)^2 + (193 - 135)^2 + (193 - 195)^2 + (255 - 193)^2 + (350 - 193)^2 \right] \right) \right] =$$

$$\cong 63419320 \text{ mm}^4$$

E perciò:

$$W_n = \frac{J_n}{\frac{h}{2}} = \frac{63419320}{\frac{390}{2}} \cong 325227 \text{ mm}^3$$

Pertanto:

$$\tau = \frac{T_2}{A_{netta}} = \frac{50000}{4200} \cong 12 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma = \frac{M_2}{W_n} = \frac{3000000}{325227} \cong 9,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Avendo i dati necessari deve risultare che:

$$\sigma_{id} = \sqrt{(\sigma^2 + 3\tau_y^2)} = \sqrt{(9,3^2 + 3 \cdot 12^2)} \cong 22,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_d = 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \textbf{verificato}$$

• Verifica a rifollamento della flangia

Seguendo la C.N.R. 5.3.6 si deve verificare che il bullone non crei problemi di rifollamento. La formula da verificare è:

$$\sigma_{rif} = \frac{1}{n_b} \cdot \frac{T}{t \cdot \phi_b} = \frac{1}{10} \cdot \frac{100000}{15 \cdot 20} \cong 33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq \alpha \cdot f_d = \frac{40}{20} \cdot 275 = 550 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \textbf{verificato}$$

Dove:

$$\alpha = a/\phi_b$$

a = distanza dal bordo = 40 mm

(è stato verificato che $a \leq 6 t_{\min} = 90\text{mm}$ (bordo non irrigidito) dove $t_{\min}$ è lo spessore minimo tra quello della flangia e dell'anima della colonna)

N.B.: si ricorda che anche se qui non si esplicita direttamente, la disposizione dei bulloni e le rispettive distanze dai bordi rispettano le normative C.N.R. del paragrafo 5.3.3

• Verifica della saldatura

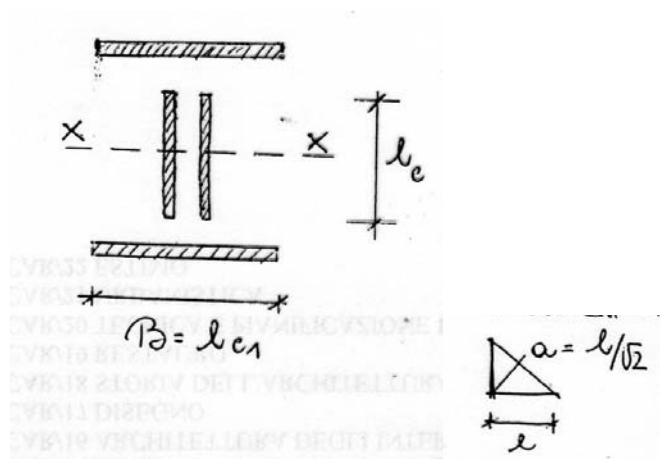
Una possibile soluzione per il collegamento tra la flangia e la trave principale prevede che esse siano saldate in officina per cui si ipotizza una saldatura a completa penetrazione, che ripristina (se di classe I) la resistenza ultima della sezione del profilo saldato (in questo caso HEA 300). Pertanto avendo la stessa resistenza dell'elemento collegato non necessita di verifiche ulteriori.

Un'altra soluzione è quella di collegare la flangia e la trave principale tramite saldature a cordoni d'angolo (a lati uguali), il cui dimensionamento avviene come nel seguito.

$$\text{Fe 430 } f_d = 275 \text{ N/mm}^2$$

Le caratteristiche di sollecitazione trasmesse dalla trave agli SLU sono $T = 100000\text{N}$ e $M = -130000\text{Nm}$.

Si ipotizza che il taglio si assorba dai cordoni d'anima (come $\tau_{\parallel}$) e il momento flettente si distribuisca su tutti i cordoni come $\sigma_{\perp}$.



Da cui come riportato nella figura, indicando con $l_c = h_1 = 208 \text{ mm}$ la lunghezza del cordone sull'anima (pari all'altezza dell'anima della HEA 300) e con $l_{c1} = B = 300 \text{ mm}$ la lunghezza del cordone sulle ali (pari alla larghezza delle ali della HEA 300), le componenti di tensione

saranno $\tau_{\parallel}$ e $\sigma_{\perp}$. Lasciando incognito il valore dell'altezza della sezione di gola dei cordoni d'anima e d'ala (posti entrambi uguali ad a) si avrà:

$$\tau_{\parallel} = \frac{T}{2 \cdot a \cdot l_c} = \frac{100000}{2 \cdot a \cdot 208} = \frac{240}{a}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{M}{W_{\text{saldatura}}}$$

Con:

$$W_{\text{saldatura}} = \frac{a \cdot \left(2 \cdot \frac{h^2}{4} \cdot l_{c1} + \beta \cdot \frac{l_c^3}{6} \right)}{\frac{h}{2}} \quad \text{dove: SOLUZ. 1 } \beta=0.5 \text{ per al saldatura d'anima (meno sollecitata)}$$

SOLUZ. 2 $\beta=1$ per al saldatura d'anima (uguale sollecitazione)

dove h è l'altezza della HEA 300.

$$\text{SOLUZ. 1: } W_{\text{saldatura1}} = a \cdot \left(300 \cdot 290 + 0.5 \cdot \frac{208^3}{3 \cdot 290} \right) = 92172 \cdot a$$

$$\text{SOLUZ. 2: } W_{\text{saldatura2}} = a \cdot \left(300 \cdot 290 + 1 \cdot \frac{208^3}{3 \cdot 290} \right) = 97344 \cdot a$$

Da cui:

$$\text{SOLUZ. 1: } \sigma_{\perp} = \frac{M}{W_{\text{saldatura1}}} = \frac{130000000}{92172 \cdot a} = \frac{1410}{a}$$

$$\text{SOLUZ. 2: } \sigma_{\perp} = \frac{M}{W_{\text{saldatura2}}} = \frac{130000000}{97344 \cdot a} = \frac{1335}{a}$$

Considerando un acciaio Fe 430, si perviene a:

$$\text{SOLUZ. 1: } \sqrt{\tau_{\parallel}^2 + \sigma_{\perp}^2} = \sqrt{\left(\frac{240}{a} \right)^2 + \left(\frac{1410}{a} \right)^2} = 0,70 \cdot f_d \Rightarrow a = 7.4 \text{ mm}$$

$$\text{SOLUZ. 2: } \sqrt{\tau_{\parallel}^2 + \sigma_{\perp}^2} = \sqrt{\left(\frac{240}{a} \right)^2 + \left(\frac{1335}{a} \right)^2} = 0,70 \cdot f_d \Rightarrow a = 7 \text{ mm}$$

Per soddisfare entrambe le soluzioni si può assumere $a = 7.5 \text{ mm}$, cioè lato del cordone $l = 11 \text{ mm}$, sia per i cordoni d'anima, sia d'ala.

• Verifica ad attrito della bullonatura

Sebbene la verifica ad attrito sia obbligatoria agli SLE, in particolari giunti (unione di precisione) anche per lo SLU può essere auspicabile che non ci sia slittamento tra le lamiere.

Lo sforzo massimo trasmissibile dall'unione dovrà essere superiore al taglio agente $T = 100000$ N. Inoltre sul bullone più sollecitato si dovrà avere una forza di trazione inferiore all'80% della normale che nasce nel gambo del bullone a causa del serraggio.

- Verifica allo scorrimento

Seguendo la C.N.R. 4.2 si deve verificare che:

4.2.2.3. In un giunto per attrito i bulloni ad alta resistenza possono trasmettere anche una forza assiale di trazione N . In questo caso, sempreché non concorrano flessioni parassite apprezzabili nel bullone, la forza $V_{f,N}$ ancora trasmissibile dal bullone per attrito è:

$$V_{f,N} = V_{f,0} \left(1 - \frac{N}{N_s} \right)$$

La forza N agente nel bullone dovuta alle combinazioni di carico di cui al punto 3.2.1 e 3.3.1 non può in nessun caso superare il valore $0,8 N_s$

dove

$V_{f,0}$ = è la forza trasmissibile per attrito da ogni bullone per ogni paio di contatto in presenza di sola azione di taglio.

N_s = è la forza normale che nasce nel gambo del bullone a causa del serraggio.

In questo caso, si utilizzeranno bulloni ad alta resistenza (classe 10.9 $f_{d,V} = 495$ N/mm² e $f_{d,N} = 700$ N/mm²) di diametro $\phi 20$. Quindi si avrà:

I bulloni di ogni classe devono essere adeguatamente serrati. È consigliabile applicare un serraggio tale da provocare una forza di trazione N_s nel gambo della vite pari a:

$$N_s = 0,8 f_{k,N} A_{res}$$

essendo A_{res} l'area della sezione resistente della vite.

La coppia di serraggio T_s necessaria per indurre la forza normale N_s risulta, per filettatura a passo grosso:

$$T_s = 0,2 N_s d$$

essendo d il diametro nominale di filettatura del bullone.

Nel prospetto 4-IV sono riportati i valori dell'area resistente A_{res} , della forza normale N_s e della coppia di serraggio T_s per i vari tipi di bulloni.

Prospetto 4-IV

d mm	A _{res} mm ²	T _s (N · m)					N _s (kN)					d mm
		4.6	5.6	6.6	8.8	10.9	4.6	5.6	6.6	8.8	10.9	
12	84	39	48	59	90	113	16	20	24	38	47	12
14	115	62	77	93	144	180	22	28	33	52	64	14
16	157	96	121	145	225	281	30	38	46	70	88	16
18	192	133	166	199	309	387	37	46	55	86	108	18
20	245	188	235	282	439	549	47	59	71	110	137	20
22	303	256	320	384	597	747	58	73	87	136	170	22
24	353	325	407	488	758	949	68	85	102	168	198	24
27	459	476	595	714	1 110	1 386	88	110	132	206	257	27
30	561	646	808	969	1 508	1 886	108	135	161	251	314	30

Quindi $N_s = 137 \text{ kN}$.

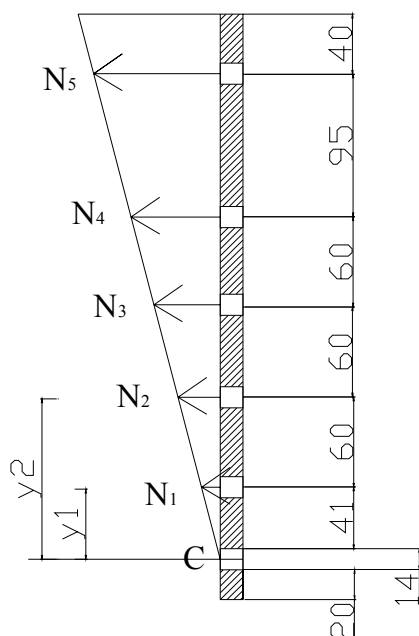
Inoltre, assumendo superfici non trattate delle lamiere $\mu = 0.3$

Prospetto 4-VI

Diametro nominale di filettatura d mm	Classe della vite			
	8.8		10.9	
	$\mu = 0,3$ $V_{f,0}$ kN	$\mu = 0,45$ $V_{f,0}$ kN	$\mu = 0,3$ $V_{f,0}$ kN	$\mu = 0,45$ $V_{f,0}$ kN
12	9	13	11	16
14	12	18	15	22
16	17	25	21	31
18	21	31	26	39
20	26	39	33	49
22	33	49	41	61
24	38	57	48	72
27	49	73	62	93
30	60	90	75	112

Si avrà $V_{f,0} = 33 \text{ kN}$.

Considerando la geometria della bullonatura (su 2 file):



$$N_i = \frac{M}{n_{\text{file}} \sum_i (y_i - y_c)^2} (y_i - y_c)$$

$$\sum_i (y_i - y_c)^2 = 201760 \text{ mm}^2$$

$$N_1 = \frac{130000000}{2 \cdot 201760} (48) = 15464 \text{ N}$$

$$N_2 = \frac{130000000}{2 \cdot 201760} (108) = 34794 \text{ N}$$

$$N_3 = \frac{130000000}{2 \cdot 201760} (168) = 54124 \text{ N}$$

$$N_4 = \frac{130000000}{2 \cdot 201760} (228) = 73454 \text{ N}$$

$$N_5 = N_{\max} = \frac{130000000}{2 \cdot 201760} (328) = 105670 \text{ N}$$

Quindi si ottengono i valori di $V_{fN,i}$ (del bullone i-esimo) , come:

$$V_{fN,1} = V_{f0} \left(1 - \frac{N_1}{N_s} \right) = 33000 \left(1 - \frac{15464}{137000} \right) = 29275 \text{ N}$$

$$V_{fN,2} = V_{f0} \left(1 - \frac{N_2}{N_s} \right) = 33000 \left(1 - \frac{34794}{137000} \right) = 24619 \text{ N}$$

$$V_{fN,3} = V_{f0} \left(1 - \frac{N_3}{N_s} \right) = 33000 \left(1 - \frac{54124}{137000} \right) = 19963 \text{ N}$$

$$V_{fN,4} = V_{f0} \left(1 - \frac{N_4}{N_s} \right) = 33000 \left(1 - \frac{73454}{137000} \right) = 15307 \text{ N}$$

$$V_{fN,5} = V_{f0} \left(1 - \frac{N_5}{N_s} \right) = 33000 \left(1 - \frac{105670}{137000} \right) = 7547 \text{ N}$$

$$V_{fN,tot} = n_{file} \sum_i V_{fN,i} = 2 \cdot 96710 = 193420 \text{ N}$$

quindi $V_{fN,tot} > T = 100000 \text{ N}$

Verificato

Inoltre si dovrà avere:

$$N_{\max} = 105670 \text{ N} \leq 0.8 N_s = 0.8 \cdot 137000 = 109600 \text{ N} \quad \textbf{verificato}$$