

5-6. Progetto della capriata: dimensionamento e verifica

Il primo passo nella progettazione di una capriata in acciaio è il dimensionamento degli elementi. La progettazione effettuata agli stati limite ultimi o alle tensioni ammissibili fornisce differenti condizioni di carico che danno luogo a diversi gradi di sollecitazione nelle aste.

Essendo per definizione elementi “asta” saranno soggetti esclusivamente a sollecitazioni “normali” di compressione o di trazione.

Sostanzialmente pertanto le verifiche da condurre saranno differenti per i due casi:

- Di resistenza del materiale per quelle tese che collassano al raggiungimento dello snervamento del materiale
- Di resistenza del materiale e di stabilità dell'elemento per quelle compresse che possono collassare anche prima del limite di snervamento sotto talune condizioni

- **Dimensionamento e verifica delle aste**

a) Scelta del materiale: acciaio Fe430

b) Metodo di calcolo: Stati limite (in particolare, verifiche a stato limite ultimo) $f_d = 275 \frac{N}{mm^2}$

c) Esempio dimensionamento elemento teso

Introduzione

A parità di valore numerico (in modulo) della sollecitazione, gli elementi tesi sono solitamente costituiti da sezioni minori rispetto a quelli compressi, perché non subiscono gli effetti del fenomeno di instabilità e pertanto la tensione normale a cui sono sottoposti si va a confrontare con la resistenza di progetto. La capacità portante dell'elemento teso è condizionata dall'area netta ossia dall'area effettivamente reagente nella sezione d'attacco: l'eventuale presenza di bulloni e quindi di fori riduce l'effettiva resistenza della sezione lorda. Per questo motivo la CNR 10011 (paragrafo 6.2) definisce per i vari profili (semplici e composti) un'area netta equivalente (A_{eff} area effettiva) da impiegare nella verifica.

6.2. Trazione

Deve risultare:

$$\sigma_N = \frac{N}{A_{eff}} \leq f_d \quad \text{stati limite}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{A_{eff}} \leq \sigma_{adm} \quad \text{tensioni ammissibili}$$

dove: N è l'azione assiale di trazione;
 A_{eff} è l'area effettiva.

6.2.1. Area effettiva

6.2.1.1. L'area effettiva coincide con l'area del profilo o con la sua sezione netta A_n (vedere 5.3.5) quando il profilo è collegato simmetricamente al suo baricentro.

6.2.1.2. Nel caso di angolari singoli collegati su una sola ala (vedere figura 6-1a) l'area effettiva può essere assunta pari a:

$$A_{\text{eff}} = A_1 + \frac{3 A_1}{3 A_1 + A_2} A_2$$

dove: A_1 è l'area netta dell'ala collegata;
 A_2 è l'area dell'ala non collegata.

6.2.1.3. Nel caso di coppie di angolari assoggettati a trazione, connessi fra di loro almeno ai terzi della lunghezza e collegati al medesimo lato della piastra (vedere figura 6-1b), l'area effettiva di ogni angolare può essere assunta pari a:

$$A_{\text{eff}} = A_1 + \frac{5 A_1}{5 A_1 + A_2} A_2$$

6.2.1.4. Nel caso di coppie di angolari assoggettati a trazione, connessi fra di loro almeno ai terzi della lunghezza e collegati ai due lati della piastra di nodo (vedere figura 6-1c), il calcolo dell'area effettiva viene eseguito considerando l'area totale dei due angolari depurata dell'area dei fori.

6.2.1.5. Nel caso di profilati a C, collegati sull'anima e a T (vedere figure 6-1d, e, f, g), si applicano i criteri dei punti 6.2.1.3 e 6.2.1.4.

6.2.1.6. Si deve evitare di regola l'impiego di profilati a I e a C sollecitati prevalentemente a trazione, collegati su una sola delle ali (vedere figure 6-1h, i).

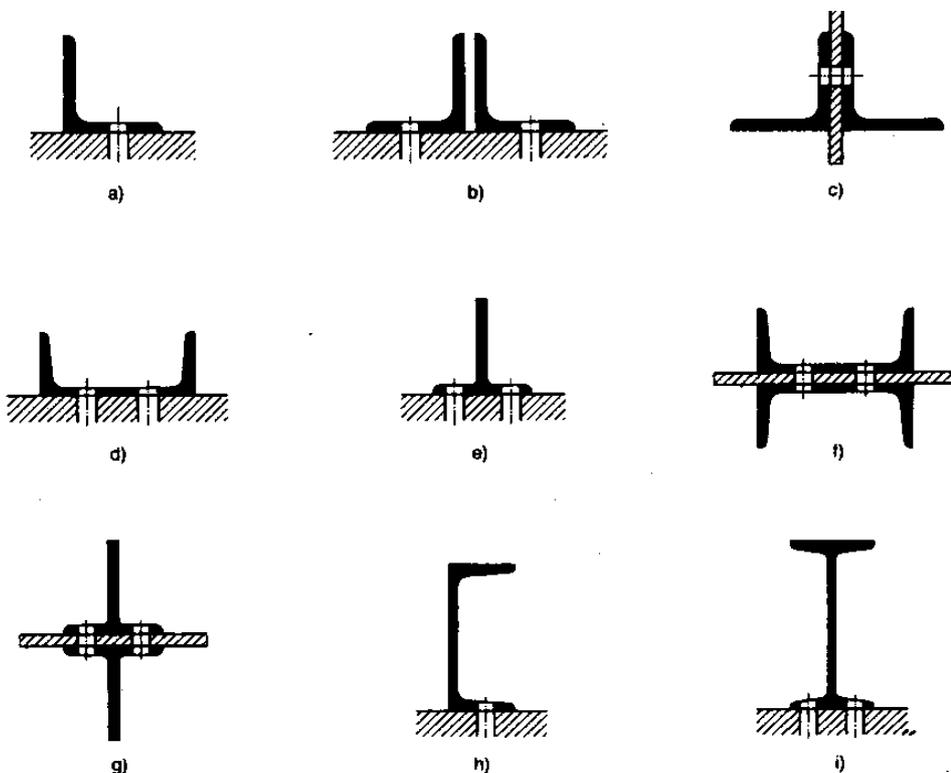
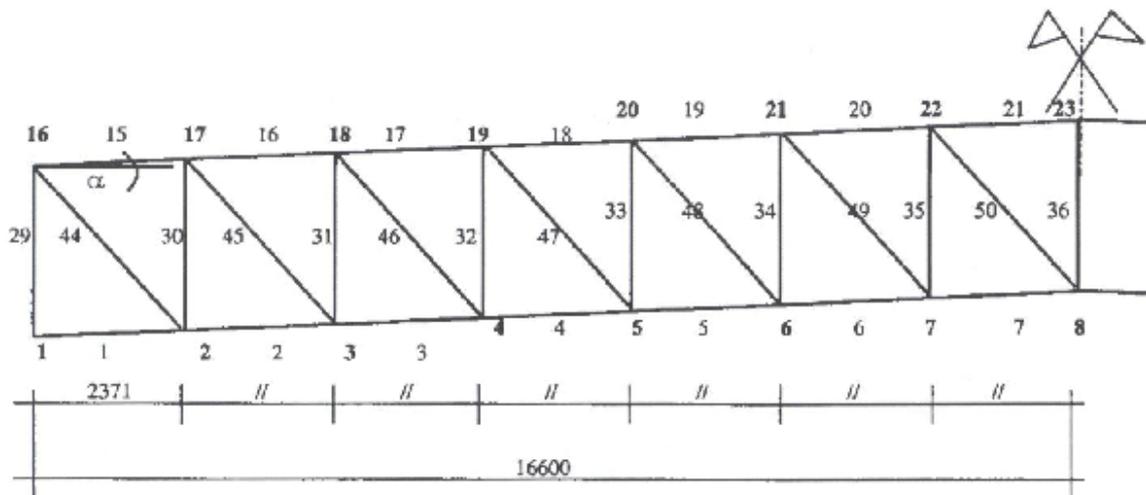


Fig. 6-1

Dimensionamento

Si consideri l'asta 7, che risulta l'elemento maggiormente sollecitato a trazione nella capriata in caso di combinazione di carico 3.

Oss: a livello pratico progettuale si cerca di rendere il dimensionamento più omogeneo possibile, pertanto si può pensare di suddividere la capriata in gruppi di aste sollecitate da valori simili e di dimensionarle con profili aventi la stessa sezione.

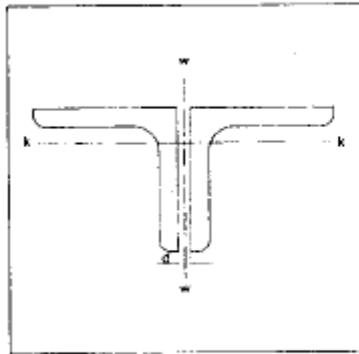


$$N_7 = 950,3 \text{ kN}$$

Si ricava l'area minima necessaria invertendo la formula di verifica $\frac{N}{A} \leq f_d$ (in condizioni limite), da cui:

$$A_{\min} = \frac{N}{f_d} = \frac{950,3 \cdot 1000}{275} = 3456 \text{ mm}^2 = 34,56 \text{ cm}^2$$

Scegliendo un profilo doppio L 100x12 a distanza $d=15$ mm (che corrisponderà allo spessore della lamiera che costituisce il fazzoletto di nodo) le cui caratteristiche sono evidenziate in tabella.



**ANGOLARI a lati uguali s.t. accoppiati a T
a distanze diverse**

valori statici

angolare	A cm ²	i cm	J _x cm ⁴	i _x cm	d mm											
					0		8		10		12		15		20	
					J _w cm ⁴	i _w cm										
35 x 4	5,34	0,680	5,90	1,05	11,3	1,45	16,4	1,75	17,9	1,83	19,6	1,92	22,3	2,04	27,3	2,26
35 x 5	6,54	0,670	7,12	1,04	14,2	1,47	20,7	1,78	22,7	1,86	24,8	1,94	28,2	2,07	34,4	2,29
35 x 6	7,74	0,670	8,26	1,03	17,3	1,50	25,3	1,81	27,6	1,89	30,2	1,97	34,2	2,10	41,8	2,32
40 x 4	6,16	0,780	6,94	1,21	16,7	1,65	23,2	1,94	25,2	2,02	27,2	2,10	30,5	2,23	36,7	2,44
40 x 5	7,58	0,770	10,9	1,20	21,0	1,67	29,3	1,97	31,8	2,05	34,4	2,13	38,5	2,25	46,2	2,47
40 x 6	8,96	0,770	12,6	1,19	25,6	1,69	35,6	1,99	38,6	2,07	41,7	2,16	46,8	2,28	56,1	2,50
45 x 5	8,60	0,870	15,7	1,35	29,0	1,86	40,0	2,16	42,8	2,23	46,0	2,31	51,2	2,44	60,4	2,65
45 x 6	10,2	0,870	18,3	1,34	36,0	1,88	48,5	2,18	52,0	2,26	55,8	2,34	62,0	2,47	73,2	2,68
50 x 5	9,60	0,970	22,0	1,51	40,7	2,06	53,0	2,35	56,7	2,43	60,5	2,51	66,3	2,63	77,4	2,84
50 x 6	11,4	0,970	25,6	1,50	49,2	2,08	64,5	2,38	69,0	2,46	73,5	2,54	80,6	2,66	93,8	2,87
50 x 7	13,1	0,960	29,2	1,49	58,3	2,11	76,0	2,41	80,6	2,48	86,5	2,57	94,7	2,69	110	2,90
50 x 9	16,5	0,960	35,8	1,47	76,2	2,15	99,0	2,45	106	2,53	113	2,61	123	2,73	144	2,95
55 x 5	12,6	1,08	29,8	1,67	53,6	2,25	68,4	2,54	72,7	2,62	76,7	2,69	84,6	2,81	96,7	3,02
55 x 6	12,6	1,07	34,6	1,66	65,4	2,28	82,9	2,56	87,7	2,64	93,1	2,72	102	2,84	117	3,05
55 x 8	16,5	1,06	44,0	1,64	88,8	2,32	112	2,61	119	2,69	127	2,78	139	2,90	160	3,11
60 x 6	13,8	1,17	45,6	1,82	84,9	2,48	106	2,77	112	2,85	118	2,92	128	3,04	145	3,24
60 x 8	18,1	1,16	58,4	1,80	115	2,52	144	2,82	152	2,90	160	2,97	174	3,10	197	3,30
60 x 10	22,2	1,16	69,8	1,78	145	2,56	183	2,87	192	2,94	202	3,02	220	3,15	250	3,36
65 x 7	17,4	1,26	66,8	1,96	127	2,70	155	2,98	163	3,06	170	3,13	185	3,26	208	3,45
70 x 7	18,8	1,26	84,5	2,12	158	2,90	190	3,18	200	3,26	208	3,33	224	3,45	250	3,65
80 x 8	24,6	1,56	144	2,42	269	3,31	319	3,60	331	3,67	346	3,75	368	3,87	405	4,06
80 x 10	30,2	1,55	175	2,41	341	3,36	402	3,65	418	3,72	436	3,80	464	3,92	513	4,12
80 x 12	35,8	1,55	204	2,39	411	3,39	487	3,69	506	3,76	528	3,84	561	3,96	619	4,16
90 x 8	27,8	1,76	208	2,74	383	3,71	443	3,99	458	4,06	474	4,13	501	4,24	548	4,44
90 x 9	31,0	1,76	232	2,73	431	3,73	501	4,02	519	4,07	536	4,16	568	4,28	619	4,47
100 x 10	38,4	1,95	354	3,04	658	4,14	753	4,43	778	4,50	802	4,57	844	4,67	914	4,88
100 x 12	45,4	1,94	414	3,02	770	4,19	907	4,47	940	4,55	969	4,62	1020	4,74	1103	4,93
100 x 14	52,4	1,94	470	3,00	937	4,23	1071	4,52	1104	4,59	1142	4,67	1197	4,78	1300	4,98
110 x 10	42,4	2,14	478	3,36	878	4,55	989	4,83	1018	4,90	1047	4,97	1098	5,09	1182	5,28
110 x 12	50,2	2,15	560	3,34	1057	4,59	1190	4,87	1230	4,95	1265	5,02	1321	5,13	1426	5,33
110 x 14	58,0	2,14	638	3,32	1238	4,62	1393	4,90	1438	4,98	1480	5,05	1550	5,17	1666	5,36

Si dovrà condurre la verifica secondo quanto previsto dal CNR 10011 (paragrafo 6.2).

Oss: se viene scelta la soluzione bullonata, poiché per ora non si conosce il numero dei bulloni e come verranno disposti nel nodo, la verifica a trazione della sezione forata dell'asta sarà da condursi successivamente. In alternativa è possibile ipotizzare l'impiego di bulloni di diametro massimo consentito (quindi diametro foro massimo Φ_f max) per il profilo utilizzato e considerare A_{min} come area al netto dei fori.

N.B.: occorre sottolineare che un elemento nelle varie combinazioni di carico può essere soggetto a sollecitazioni normali che cambiano segno (trazione/compressione): ad esempio, nella combinazione 5, l'asta n°7 appena analizzata risulta compressa e pertanto è necessario verificare che il profilo scelto sia idoneo anche per il fenomeno dell'instabilità.

d) Esempio dimensionamento elemento compresso:

Introduzione

Nelle strutture in acciaio una delle maggiori insidie è il fenomeno di instabilità per carico di punta delle aste compresse che molto spesso è causa di disastri improvvisi. Intuitivamente si può pensare che un'asta snella soggetta a compressione collasserà prima di raggiungere il limite ultimo di resistenza del materiale.

La trattazione analitica mediante la linea elastica è stata ampiamente dimostrata e mostrata in vari testi ("Teoria e pratica delle strutture in acciaio", Nunziata); in tal senso si sfruttano i risultati che dimostrano che in talune situazioni il collasso dell'asta può avvenire per il raggiungimento della soglia di instabilità (calcolo del valore del carico critico Euleriano e del valore del carico critico per aste non ideali).

Ne consegue che dal punto di vista progettuale la verifica dell'elemento deve essere effettuata sia considerando il fenomeno dell'instabilità, sia considerando la verifica di resistenza a compressione come riportato al punto 6.3.

6.3. Compressione

Deve comunque risultare:

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \leq f_d \quad \text{stati limite}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \leq \sigma_{adm} \quad \text{tensioni ammissibili}$$

dove: N è l'azione assiale di compressione;

A è l'area nominale del profilo al netto degli eventuali fori.

Si evidenzia che generalmente la verifica di resistenza a compressione nella maggioranza dei casi è soddisfatta per gli elementi che soddisfano quella di instabilità.

La normativa, per il dimensionamento di aste compresse in caso di verifica di instabilità, fornisce un metodo più immediato (Metodo ω), rispetto alla trattazione analitica mediante la

linea elastica. Nel Metodo ω , la verifica viene effettuata controllando che il valore della tensione normale agente nell'elemento, amplificato sulla base dei alcuni parametri per tener conto dei fenomeni di instabilità, non ecceda il valore della resistenza di calcolo. Questi parametri sono:

-forma della sezione trasversale (prospetto 7-I)

-tipo di acciaio

-snellezza dell'elemento (aste di snellezza elevata sono maggiormente soggette ad instabilizzarsi). Essa è definita secondo normativa come specificato nel punto 5.1. del D.M. o CNR 10011 (paragrafo 7.2.2.2 aste semplici):

$$\frac{l_0}{i} = \lambda$$

dove:

$l_0 = \beta l$ è la lunghezza libera di inflessione nel piano principale considerato, dipendente dalle modalità di vincolo alle estremità dell'asta (che influenzano la grandezza β) e dalla lunghezza geometrica l dell'asta;

i è il raggio d'inerzia della sezione trasversale, giacente nello stesso piano principale in cui si valuta l_0 .

La verifica va effettuata in riferimento al piano principale per cui la snellezza è maggiore. Non è sufficiente calcolare la snellezza con riferimento al raggio d'inerzia minimo, ma è necessario effettuare il calcolo in relazione ad entrambi i piani principali, poiché le modalità di vincolo possono rendere più elevata la snellezza in riferimento al piano principale per cui il raggio d'inerzia è massimo.

La snellezza non deve superare il valore 200 per le membrature principali e 250 per quelle secondarie; in presenza di azioni dinamiche rilevanti i suddetti valori vengono limitati rispettivamente a 150 e a 200.

Il coefficiente di amplificazione è detto coefficiente ω , determinato come riportato dalla Normativa e dalle Raccomandazioni CNR (paragrafo 7.2.3)

7.2.3. Aste composte

7.2.3.1. La verifica per le aste costituite da due correnti uguali si conduce secondo il metodo indicato nel punto 7.2.2 per le aste semplici e con i coefficienti dei prospetti 7-IIc, 7-IIIc, e 7-IVc (oppure per $t > 40$ mm 7-IIId, 7-IIId e 7-IVd) valutando però la snellezza con le modalità indicate nei punti 7.2.3.2, 7.2.3.3 e 7.2.3.4.

Le espressioni approssimate della snellezza in essi riportate si intendono applicabili quando l'importanza dell'opera non richieda procedimenti di calcolo più rigorosi.

7.2.2.4. In conformità a quanto indicato nel punto 7.2.2.3, la verifica di sicurezza di un'asta compressa può effettuarsi nell'ipotesi che la sezione trasversale sia compressa da una forza assiale N maggiorata del coefficiente ω .
Ciò deve essere:

$$\frac{\omega N}{A} \leq f_d \left[N_c = \frac{f_d \cdot A}{\omega} \right] \text{ stati limite}$$

$$\frac{\omega N}{A} \leq \sigma_{adm} \left[N_c = \frac{\sigma_{adm} \cdot A}{\omega} \right] \text{ tensioni ammissibili}$$

I valori dei coefficienti ω in funzione di λ sono riportati nei prospetti 7-IIa per l'acciaio Fe 360, 7-IIIa per l'acciaio Fe 430 e 7-IVa per l'acciaio Fe 510 nel caso in cui la membratura compressa sia costituita da un tubo quadro, rettangolo o tondo, ferme restando le altre prescrizioni contenute nei punti 7.2.2.3.1 e 7.2.2.3.2 e salvo quanto precisato ai punti 7.2.2.4.1 e 7.2.2.4.2.

la verifica per le aste composte si conduce in modo analogo a quella per le aste semplici, tenendo conto degli opportuni valori tabellati, consta in:

$$\frac{\omega N}{A} \leq f_d$$

Dove:

ω è un coefficiente dipendente da snellezza, sezione e tipo di acciaio ed è tabellato (CNR 10011 prospetto 7IIa-7IVd)

N è la forza normale

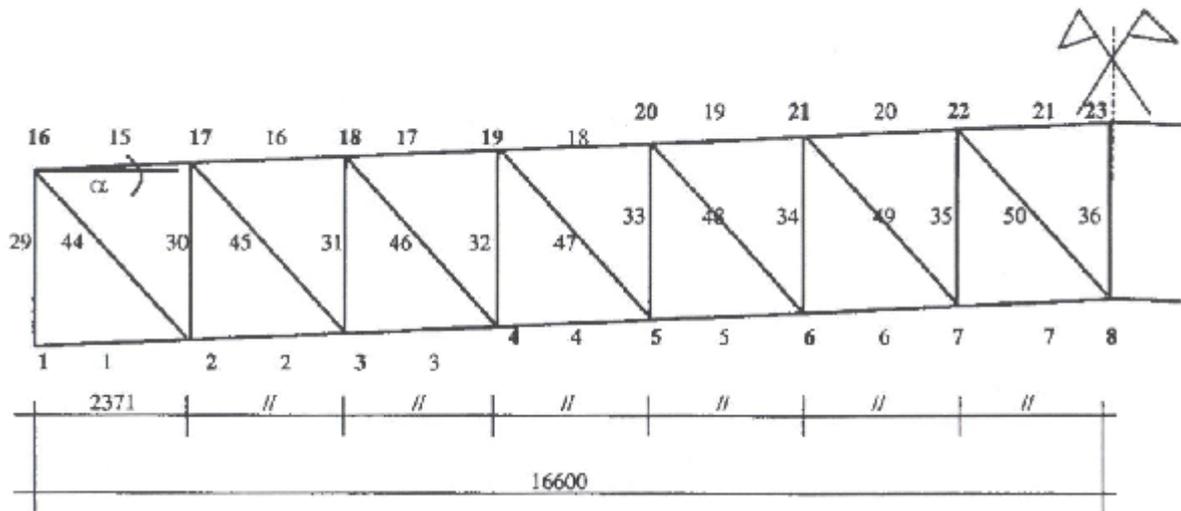
A è la sezione lorda del profilo accoppiato

Anche per aste composte, la verifica va effettuata in riferimento al piano principale per cui la snellezza è maggiore. In alcuni casi, non è sufficiente calcolare la snellezza con riferimento ad entrambi i piani principali, poiché le modalità di accoppiamento dei profili possono creare fenomeni differenti. In questi casi verrà calcolata anche una snellezza equivalente (vedi paragrafo seguente).

Si fa notare che la tensione determinata in tale modo non è la tensione reale nell'elemento ma è una tensione fittizia convenzionale che tiene conto di tutte le componenti del fenomeno di instabilità che riducono la resistenza dell'elemento e possono portarlo al collasso prima del raggiungimento del limite di snervamento del materiale.

Dimensionamento

Si consideri le aste 19, 20 e 21 rispettivamente con (combinazione 3):



$$N_{19} = -891 \text{ kN}$$

$$N_{20} = -950 \text{ kN}$$

$$N_{21} = -970 \text{ kN}$$

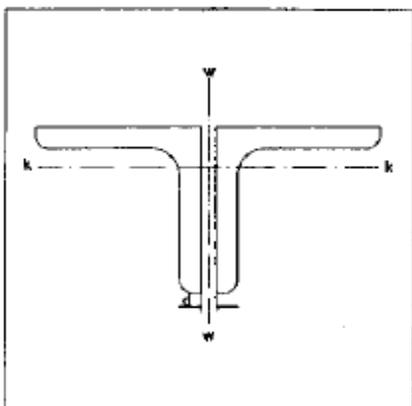
Per il predimensionamento, si ipotizza a questo punto un valore di ω che si assume pari a 2.

invertendo la formula di verifica $\frac{\omega N}{A} \leq f_d$ (in condizioni limite), si ricava l'incognita

$$A_{\min} = \frac{\omega N}{f_d} = \frac{2 \cdot 970 \cdot 1000}{275} = 7055 \text{ mm}^2 = 70,55 \text{ cm}^2$$

Usualmente nella pratica progettuale si usano profili accoppiati (elementi ravvicinati collegati da imbottiture): nel caso in esame profili ad L a lati uguali.

Osservando le tabelle disponibili sui profili si considerano profili 140x15 posti a distanza 15mm.



**ANGOLARI a lati uguali s.t. accoppiati a T
a distanze diverse**

valori statici

angolare	A cm ²	i cm	J _x cm ⁴	i _x cm	d mm											
					0		8		10		12		15		20	
					J _w cm ⁴	i _w cm										
130 × 12	60,0	2,55	944	3,97	1736	5,38	1922	5,66	1970	5,73	2025	5,81	2103	5,92	2233	6,10
14	69,4	2,54	1080	3,95	2038	5,42	2255	5,70	2318	5,78	2375	5,85	2465	5,96	2625	6,15
16	78,6	2,53	1210	3,93	2343	5,46	2599	5,75	2662	5,82	2736	5,90	2840	6,01	3021	6,20
140 × 13	70,0	2,74	1278	4,27	2355	5,80	2580	6,07	2648	6,15	2708	6,22	2804	6,33	2967	6,51
15	80,0	2,73	1446	4,25	2728	5,84	2996	6,12	3065	6,19	3134	6,26	3246	6,37	3442	6,56
17	90,0	2,72	1610	4,23	3111	5,88	3415	6,16	3493	6,23	3583	6,31	3709	6,42	3932	6,61
150 × 14	80,6	2,94	1690	4,58	3128	6,23	3405	6,50	3479	6,57	3553	6,64	3683	6,76	3882	6,94
16	91,4	2,93	1900	4,56	3581	6,26	3909	6,54	3993	6,61	4078	6,68	4214	6,79	4453	6,98
18	102	2,92	2100	4,54	4035	6,29	4416	6,58	4511	6,65	4605	6,72	4772	6,84	5077	7,02

Con le dimensioni indicate si ricavano i dati necessari per la verifica come previsto al punto 7.2.3.4 delle Raccomandazioni CNR, cioè:

- verifica all'instabilità in direzione normale ad un asse principale di inerzia che taglia tutte le sezioni degli elementi componenti l'asta (nel nostro caso x o k): la snellezza si valuta come per un'asta semplice valutando però ω con le tabelle delle aste composte
- verifica all'instabilità in direzione normale ad un asse principale di inerzia che non taglia tutte le sezioni degli elementi componenti l'asta (nel nostro caso y o w): si assume una snellezza equivalente come indicato sotto

7.2.3.4.2. Se il collegamento ha invece la funzione di contrastare l'inflessione in direzione normale a un'asse principale di inerzia della sezione composta che non tagli tutte le sezioni degli elementi che la compongono (per esempio l'asse yy della figura 7-7) e pertanto la snellezza venga valutata con riferimento ad un raggio di inerzia più grande che non a quello del profilato singolo nella stessa direzione, la verifica dell'asta può condursi come per un'asta semplice, ma assumendo una snellezza equivalente pari a:

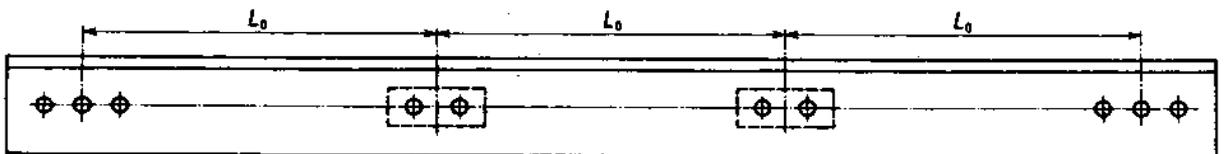
$$\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda^2 + \lambda_1^2}$$

dove: λ è la snellezza effettiva dell'asta;

$$\lambda_1 = \frac{L_0}{i_{min}}$$

essendo L_0 l'interasse del collegamento e i_{min} il raggio minimo di inerzia del profilato semplice

Verifiche meno sommarie sono richieste qualora λ_1 superi 50 per l'acciaio tipo Fe 360 e Fe 430 e 40 per l'acciaio Fe 510. In ogni caso il collegamento deve essere costituito da una piastra di imbottitura saldata o collegata con almeno due chiodi, due bulloni ad attrito o due bulloni in accoppiamento di precisione come in 5.3.2 disposti secondo l'asse della membratura (vedere figura 7-8).



Quindi :

- si calcola λ_x

$$\lambda_x = \frac{l_{0x}}{i_x} = \frac{\beta_x \cdot l_x}{i_x} = \frac{1 \cdot 2375}{42,5} = 56 \text{ considerando } \beta_x = 1 \text{ cerniera-cerniera il vincolo tra nodo e}$$

nodo (l_x =distanza tra nodi, $i_x = i_k$ seguendo il profilario)

- si calcola λ_{eq}

$$\lambda_y = \frac{l_{0y}}{i_y} = \frac{\beta_y \cdot l_y}{i_y} = \frac{1 \cdot 2375}{63,7} = 38 \text{ considerando } \beta_y = 1 \text{ cerniera-cerniera il vincolo tra nodo e}$$

nodo (l_y =distanza tra nodi, $i_y = i_w$ seguendo il profilario)

$\lambda_1 = 50$ ricavato al punto 7.2.3.4.2 delle Raccomandazioni: lo può assumere pari a 50 in modo tale da determinare a posteriori la distanza da porre fra due imbottiture consecutive.

Da cui:

$$\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2} = \sqrt{38^2 + 50^2} = 63$$

Valutando il valore massimo tra λ_x e λ_{eq} si entra nella curva c Fe 430 delle tabelle prospetto 7IIa-7IVd e si ricava il corrispondente valore di $\omega = 1,43$ (curva c perché si tratta di asta composta come previsto dal prospetto 7I).

Prospetto 7-IIIc — Coefficienti ω per acciaio Fe 430 (curva c)

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	10
20	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,07	20
30	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,15	30
40	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	40
50	1,26	1,27	1,28	1,29	1,31	1,32	1,33	1,35	1,36	1,37	50
60	1,39	1,40	1,42	1,43	1,45	1,46	1,48	1,50	1,51	1,53	60
70	1,55	1,57	1,58	1,60	1,62	1,64	1,66	1,68	1,70	1,72	70
80	1,74	1,76	1,78	1,80	1,82	1,84	1,86	1,88	1,91	1,93	80
90	1,95	1,97	2,00	2,02	2,04	2,07	2,09	2,12	2,14	2,17	90
100	2,19	2,22	2,25	2,27	2,30	2,33	2,36	2,39	2,42	2,45	100
110	2,48	2,50	2,54	2,57	2,60	2,63	2,66	2,69	2,72	2,76	110
120	2,79	2,82	2,85	2,89	2,92	2,96	2,99	3,02	3,06	3,09	120
130	3,13	3,16	3,20	3,24	3,27	3,31	3,35	3,39	3,43	3,47	130
140	3,51	3,55	3,59	3,63	3,68	3,72	3,76	3,80	3,85	3,89	140
150	3,93	3,98	4,02	4,07	4,11	4,15	4,20	4,24	4,29	4,33	150
160	4,38	4,43	4,47	4,52	4,56	4,61	4,66	4,70	4,75	4,80	160
170	4,84	4,89	4,94	4,99	5,03	5,08	5,13	5,18	5,23	5,28	170
180	5,33	5,38	5,43	5,47	5,53	5,59	5,66	5,70	5,75	5,81	180
190	5,86	5,92	5,98	6,03	6,08	6,14	6,20	6,26	6,32	6,38	190
200	6,43	6,49	6,55	6,61	6,67	6,73	6,79	6,85	6,91	6,96	200
210	7,03	7,06	7,14	7,20	7,26	7,32	7,37	7,44	7,50	7,56	210
220	7,63	7,68	7,74	7,81	7,88	7,97	8,03	8,08	8,13	8,19	220
230	8,26	8,33	8,40	8,46	8,52	8,59	8,65	8,72	8,79	8,85	230
240	8,93	8,99	9,06	9,13	9,20	9,27	9,34	9,41	9,48	9,55	240
250	9,62										250

Verifica

Avendo determinato tali dati la verifica risulta soddisfatta se:

$$\frac{\omega N}{A} = \frac{1,43 \cdot 970000}{8000} = 173 \frac{N}{mm^2} \ll f_d \quad \text{verificato}$$

Poiché la verifica è ampiamente soddisfatta si può pensare di diminuire la sezione dei profili.

Considerando dei 120x13 con distanza 15mm e ripetendo il medesimo procedimento

$$\lambda_x = \frac{\beta_x \cdot l_x}{i_x} = \frac{1 \cdot 2375}{36,4} = 65$$

$$\lambda_y = \frac{\beta_y \cdot l_y}{i_y} = \frac{1 \cdot 2375}{55,5} = 43$$

$$\lambda_1 = 50$$

Da cui:

$$\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2} = \sqrt{43^2 + 50^2} = 66$$

⇒ curva c Fe 430 $\omega = 1,48$ si ottiene:

$$\frac{\omega N}{A} = \frac{1,48 \cdot 970000}{5940} = 242 \frac{N}{mm^2} < f_d \quad \text{verificato}$$

Sarebbe stato possibile anche considerare anziché il valore di $\lambda_1 = 50$, calcolarlo direttamente ponendo per ipotesi un interasse fra le imbottiture pari a 0,6metri. In tal caso, si avrebbe:

$$\lambda_1 = \frac{l_0}{i_{\min}} = \frac{0,6 \cdot 1000}{23,4} \cong 26$$

Da cui si ottiene:

$$\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2} = \sqrt{43^2 + 26^2} = 50$$

⇒ $\omega = 1,46$

$$\frac{\omega N}{A} = \frac{1,46 \cdot 970000}{5940} = 238 \frac{N}{mm^2} < f_d \quad \text{verificato}$$

N.B.: A volte è utile sapere quale sia il valore ultimo del carico esterno che si possa applicare senza che si abbia il collasso nella capriata: è il caso ad esempio di strutture già esistenti che possono cambiare destinazione d'uso e quindi gli elementi strutturali possono subire variazioni di sollecitazioni. E' naturalmente il problema duale rispetto al caso precedente: il carico non è più noto a priori, ma è l'incognita del problema e pertanto per determinarlo si possono invertire le formule per la verifica all'instabilità ed a resistenza, cioè date le sezioni esistenti ricavo l'azione normale massima che possono sopportare e di conseguenza il carico esterno che si può applicare.

• Dimensionamento e verifica dei nodi: soluzione bullonata

a) Scelta dei bulloni: classe e diametro

b) Metodo di calcolo: Stati limite ultimi

c) Esempio dimensionamento nodo centrale briglia inferiore:

Introduzione

Le unioni bullonate permettono una rapida esecuzione in officina e semplificano l'assemblaggio dei pezzi in cantiere. La bullonatura ha come componenti fondamentali:

la vite con testa, detta bullone

il dado

la rosetta

il controdado

Le verifiche delle unioni bullonate sono eseguite su modelli semplificati di comportamento: la progettazione è basata sull'ipotesi di pressioni uniformemente distribuite sui fori e sul gambo del bullone trascurando la deformazione della lamiera, l'inflessione del gambo e le concentrazioni di tensioni nei bordi dei fori che generano fenomeni di plasticità.

Generalmente i bulloni possono costituire unioni a taglio, unioni a trazione od unioni a taglio e trazione.

-Unioni a taglio od ad attrito: i piatti collegati risultano sollecitati mediante una forza agente nel piano di contatto dei piatti stessi ed i bulloni sono sollecitati da una forza ortogonale all'asse del gambo.

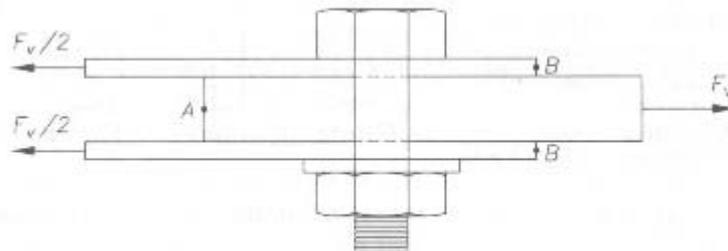


Figura 6.2 Tipica unione a taglio.

Il comportamento è sostanzialmente diverso a seconda che il bullone lavori a taglio o ad attrito: nel primo caso il bullone è attivo quando la superficie laterale del bullone è a contatto con la superficie del foro riprendendo il gioco foro bullone, nel secondo caso si vuole impedire ogni minimo scorrimento nell'unione affidando lo sforzo all'azione di attrito e pertanto i bulloni vengono preventivamente serrati e premono sulle piastre di contatto; la forza di attrito che si genera contrasta la forza esterna applicata.

-Unioni a trazione: le due piastre collegate dai bulloni sono sollecitate da una forza ortogonale al piano di contatto.

-Unioni a taglio e trazione: l'unione è sollecitata sia parallelamente sia ortogonalmente al piano di contatto come si intuisce dalla seguente figura.

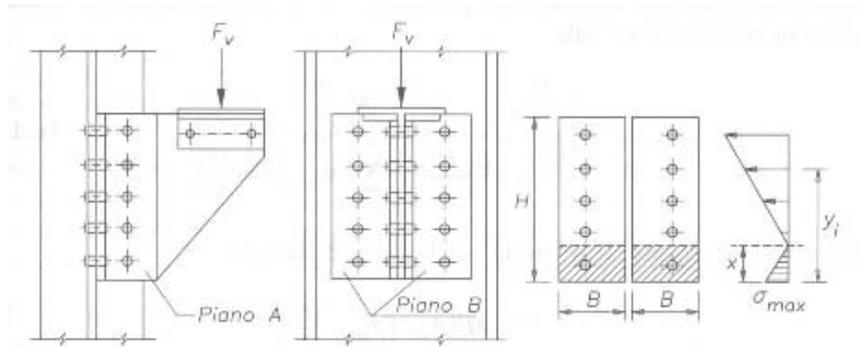
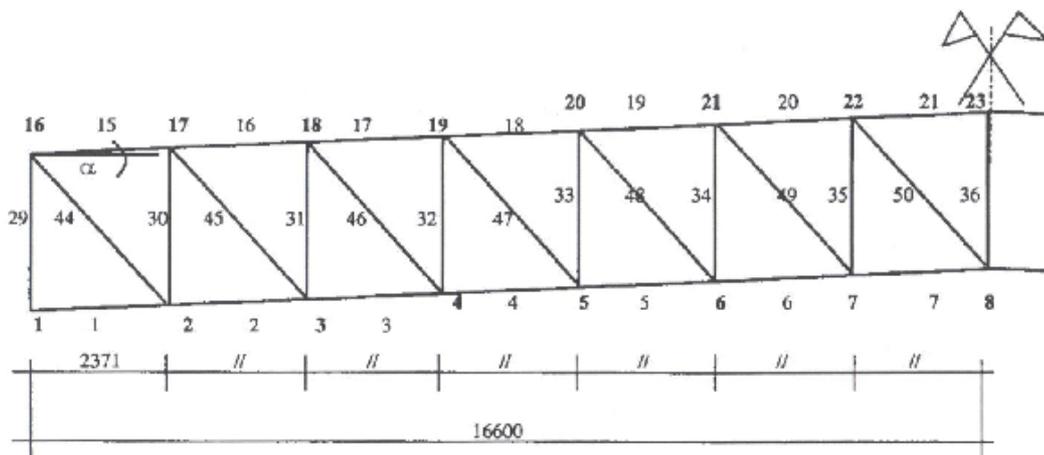


Figura 6.9 Esempio di unione sollecitata a taglio e flessione e meccanismo di trasferimento dell'azione flettente.

Dimensionamento

Si consideri il nodo n°8 (combinazione 3):



Come illustrato precedentemente l'asta 7 ha una sollecitazione pari a $N_7 = 950,3 \text{ kN}$.

Si ipotizza di usare bulloni $\Phi 30$ classe 8.8 le cui caratteristiche resistive sono espresse al prospetto 4IIIa e 4IV

Prospetto 4-IIIa

Stato limite					
Classe vite	f_t N/mm ²	f_y N/mm ²	$f_{k,N}$ N/mm ²	$f_{d,N}$ N/mm ²	$f_{d,V}$ N/mm ²
4.6	400	240	240	240	170
5.6	500	300	300	300	212
6.6	600	360	360	360	255
8.8	800	640	560	560	396
10.9	1 000	900	700	700	495

$f_{k,N}$ è assunto pari al minore dei due valori $f_{k,N} = 0,7 f_t$, $f_{k,N} = f_y$ essendo f_t ed f_y le tensioni di rottura e di snervamento secondo UNI 3740.

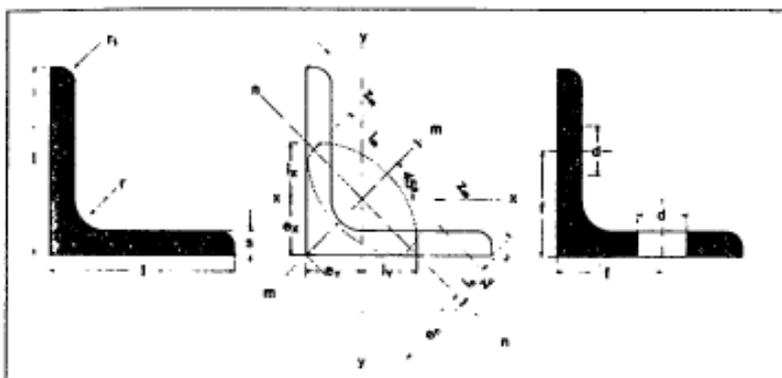
$f_{d,N} = f_{k,N}$ resistenza di progetto a trazione.

$f_{d,V} = f_{k,N}/\sqrt{2}$ resistenza di progetto a taglio.

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	58	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	45	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	759	949	68	85	102	158	198	24
27	459	476	595	714	1 110	1 388	88	110	132	206	257	27
30	561	646	808	969	1 508	1 885	108	135	161	251	314	30

Volendo uniformare alcuni profili della capriata si assume che l'asta in questione sia 110x12 invece che 100x12 come determinato in precedenza. Si evidenziano le seguenti geometrie:



**ANGOLARI a lati uguali
spigoli tondi
UNI 5783-73**

designazione profilo	dimensioni				A cm ²	p kg/m	U m ² /m	posizione del baricentro			
	l mm	s mm	r mm	r ₁ mm				e _x = e _y		z _m cm	z _n cm
								e _x cm	e _y cm		
*100 x 6	100	6	12	6	11,8	9,26	0,390	2,64	3,74	7,07	3,51
*100 x 7	100	7	12	6	13,7	10,7	0,390	2,69	3,81	7,07	3,51
*100 x 8	100	8	12	6	15,5	12,2	0,390	2,74	3,87	7,07	3,52
*100 x 9	100	9	12	6	17,3	13,6	0,390	2,78	3,93	7,07	3,53
100 x 10	100	10	12	6	19,2	15,1	0,390	2,82	3,99	7,07	3,54
100 x 12	100	12	12	6	22,7	17,8	0,390	2,90	4,11	7,07	3,57
100 x 14	100	14	12	6	26,2	20,6	0,390	2,98	4,22	7,07	3,60
*110 x 6	110	6	12	6	13,0	10,2	0,430	2,89	4,09	7,78	3,87
*110 x 7	110	7	12	6	15,1	11,8	0,430	2,94	4,16	7,78	3,87
*110 x 8	110	8	12	6	17,1	13,4	0,430	2,99	4,22	7,78	3,87
*110 x 9	110	9	12	6	19,1	15,0	0,430	3,03	4,28	7,78	3,88
110 x 10	110	10	12	6	21,2	16,6	0,430	3,07	4,34	7,78	3,89
110 x 12	110	12	12	6	25,1	19,7	0,430	3,15	4,46	7,78	3,92
110 x 14	110	14	12	6	29,0	23,2	0,430	3,23	4,58	7,78	3,95

designazione profilo	valori statici relativi agli assi										(*) foratura sulle ali	
	xx-yy					nn					d mm	f mm
	J _x = J _y cm ⁴	W _x = W _y cm ³	I _x = I _y cm	J _n cm ⁴	W _n cm ³	I _n cm	J _n cm ⁴	W _n cm ³	I _n cm	J _{xy} cm ⁴		
111	15,1	3,07	176	24,9	3,86	46,1	12,3	1,98	65,0	31	55	
128	17,5	3,06	203	28,8	3,86	53,0	14,0	1,97	75,2	31	55	
145	19,9	3,06	230	32,5	3,85	59,8	15,5	1,96	85,0	31	55	
161	22,3	3,05	256	36,1	3,84	66,4	16,9	1,96	94,6	31	55	
177	24,6	3,04	280	39,6	3,83	73,0	18,3	1,95	104	31	55	
207	29,1	3,02	328	46,3	3,80	85,7	20,9	1,94	121	28	55	
235	33,5	3,00	372	52,6	3,77	98,2	23,3	1,94	137	28	55	
149	18,4	3,39	237	30,0	4,27	62,0	15,2	2,18	87,5	31	55	
173	21,4	3,39	274	35,2	4,27	71,3	17,2	2,18	101	31	55	
195	24,4	3,38	310	39,9	4,26	80,5	19,1	2,17	115	31	55	
217	27,3	3,37	345	44,4	4,25	89,4	20,9	2,16	128	31	55	
239	30,1	3,36	379	48,7	4,23	98,3	22,6	2,16	140	31	55	
280	35,7	3,34	444	57,1	4,20	116	25,9	2,15	164	31	55	

La forza normale è applicata lungo l'asse baricentrico dell'asta che ha una distanza $e_x = 31,5$ mm dall'ala inferiore del profilo.

A sua volta il baricentro del bullone (asse di truschino) dista $f = 55$ mm dall'ala inferiore.

Pertanto, poiché a livello costruttivo non è possibile disporre i bulloni lungo l'asse baricentrico del profilo, la forza normale risulta eccentrica con una eccentricità pari a $f - e_x = 55 - 31,5 = 23,5$ mm.

Il momento risultante sarà $M = N_7 \cdot (f - e_x)$.

Si procede ora per passi:

- predimensionamento di massima: si determina il numero minimo di bulloni necessari eguagliando la tensione a taglio di progetto con la tensione sollecitante lasciando incognito il numero di bulloni n_b .

$$f_{d,v} = \frac{N_7}{n_b \cdot n_{sez} \cdot A_{res}} \Rightarrow n_b = \frac{N_7}{f_{d,v} \cdot n_{sez} \cdot A_{res}} = \frac{950300}{396 \cdot 2 \cdot 561} = 2,14$$

Dove:

$f_{d,v}$ = resistenza a taglio di calcolo del gambo del bullone

n_{sez} = numero sezioni resistenti (n° piani di contatto tra le lamiere collegate)

A_{res} = area resistente del gambo del bullone (funzione del diametro d , o ϕ_b , del bullone)

Si decide di disporre 4 bulloni (in previsione della verifica in presenza di ulteriore componente tagliante legata al momento parassita M).

- determinazione delle distanze: secondo quanto previsto al punto 5.3.3. si devono rispettare alcuni limiti costruttivi nella disposizione dei bulloni

5.3.3. Interasse e distanza dai margini

Per l'applicabilità dei criteri di verifica indicati ai successivi punti, con riferimento alla fig. 5-5, indicato con t_{min} il minore degli spessori degli elementi collegati deve risultare:

— interasse fori in direzione della forza

elementi compressi $15 t_{min} \geq p \geq 3 d$

elementi tesi $25 t_{min} \geq p \geq 3 d$

— distanza fori dal bordo libero in

direzione della forza $a \geq 2 d$

bordo non irrigidito $a \leq 6 t_{min}$

bordo irrigidito $a \leq 9 t_{min}$

— distanza fori dal bordo libero in

direzione perpendicolare alla forza $a_1 \geq 1,5 d$

bordo non irrigidito $a_1 \leq 6 t_{min}$

bordo irrigidito $a_1 \leq 9 t_{min}$

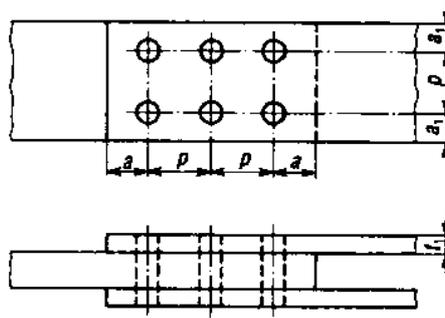


Fig. 5-5

Si assume:

$p = 90\text{mm}$ (passo tra i bulloni)

$a = 65\text{mm}$

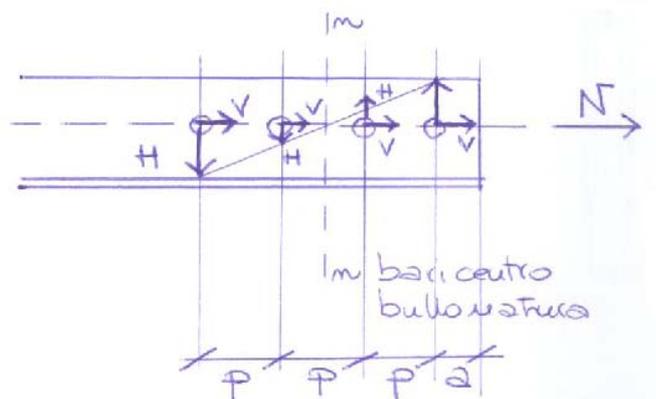
essendo $t_{\min} = 12\text{mm}$ lo spessore dell'ala del profilo e $\Phi = 30\text{mm}$

- determinazione della risultante delle forze di taglio sui bulloni: il gambo del bullone i -esimo è sollecitato da una forza di taglio V (derivante dalla forza normale N_7 nell'asta; V è in direzione parallela alla forza normale) e da una forza di taglio H_i (derivante dal momento M associato alla forza normale e dovuto all'eccentricità tra asse baricentrico dell'asta e asse di truschino; la direzione di H_i è legata alla geometria della bullonatura e in questo caso è ortogonale alla forza normale).

Si assume che la forza di taglio V su ciascun bullone derivi dalla normale N_7 ripartita uniformemente su tutti i 4 bulloni. Si ottiene:

$$V = \frac{N_7}{n_b} = \frac{950300}{4} = 237,6\text{KN}$$

Considerando l'asse $n-n$ baricentrico della bullonatura del seguente disegno si ammette che gli sforzi H_i su ciascun bullone e generati dal momento M si ripartiscano proporzionalmente alla distanza del bullone i -esimo dall'asse $n-n$.



Di conseguenza si ha:

$$H_{\max} = \frac{M}{W_{\min}}$$

Dove:

$W_{\min} = \frac{J_{n-n}}{d_{\max}}$ è il momento di inerzia della bullonatura diviso la distanza massima di un qualsiasi bullone dal baricentro della stessa

Procedendo con i calcoli e non considerando ai fini di J_{n-n} il contributo fornito dall'inerzia dei singoli bulloni, risulta:

$$J_{n-n} = \sum_{i=1}^4 d_i^2 = \left(\frac{p}{2}\right)^2 + \left(-\frac{3 \cdot p}{2}\right)^2 + \left(-\frac{p}{2}\right)^2 + \left(-\frac{3 \cdot p}{2}\right)^2 = 2 \cdot (45^2 + 135^2) = 40500 \text{mm}^2$$

$$W_{\min} = \frac{J_{n-n}}{d_{\max}} = \frac{40500}{135} = 300 \text{mm}$$

$$\text{sul bullone più sollecitato} \Rightarrow H_{\max} = \frac{950300 \cdot (23,5)}{300} = 74,4 \text{KN}$$

La risultante delle azioni di taglio sarà, sul bullone più sollecitato, pari a:

$$R = \sqrt{V^2 + H_{\max}^2} = \sqrt{237,575^2 + 74,4^2} = 248,952 \text{KN} = 248952 \text{N}$$

Verifica

Seguendo i rispettivi paragrafi 5.3.4, 5.3.5 e 5.3.5 della CNR si verifica la bullonatura con:

- Verifica a taglio: la tensione tangenziale sul gambo del bullone dovrà essere inferiore a quella di resistenza a taglio di progetto.

5.3.4.1. Per bulloni sollecitati ad azione tagliante V , lo sforzo medio risulta:

$$\tau = V/A \quad \text{se il gambo è a contatto con le piastre di giunto;}$$

$$\tau = V/A_{res} \quad \text{se la parte filettata è a contatto con le piastre di giunto,}$$

essendo A l'area nominale del gambo e A_{res} quella resistente.

Per cui:

$$\tau_b = \frac{R}{n_{\text{sez}} \cdot A_{\text{res}}} = \frac{248952}{2 \cdot 561} = 222 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_{d,v} = 396 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{verificato}$$

- Verifica a rifollamento della lamiera: la tensione tra bullone e piastra dovrà essere inferiore ad un valore di riferimento.

5.3.6. Verifiche a rifollamento

La pressione sul contorno del foro, riferita alla proiezione diametrale della superficie cilindrica del chiodo o del bullone, deve risultare:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{rif}} &\leq \alpha \cdot f_d && \text{stati limite} \\ \sigma_{\text{rif}} &\leq \alpha \cdot \sigma_{\text{adm}} && \text{tensioni ammissibili} \end{aligned}$$

dove: $\alpha = a/d$ e comunque da assumersi non maggiore di 2,5;

f_d è la resistenza di progetto del materiale costituente gli elementi del giunto (vedere 4.1.1);

σ_{adm} è la tensione ammissibile del materiale costituente gli elementi del giunto (vedere 4.1.1);

a e d sono definiti e limitati come al punto 5.3.3.

Per cui:

$$\sigma_{\text{rif}} = \frac{R}{s \cdot \phi_b} = \frac{248952}{15 \cdot 30} = 553 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \alpha \cdot f_d = \frac{65}{30} \cdot 275 \cong 596 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{verificato}$$

Con

s = spessore minimo = min(spessore lamiera, spessore 2 profili)

ϕ_b = diametro bullone

- Verifica della sezione di profilo: la tensione nella sezione di profilo depurata dai fori (sezione debole) dovrà essere inferiore alla tensione di progetto.

5.3.5. Verifiche delle sezioni forate

Per la verifica di resistenza il calcolo delle tensioni di trazione si effettua con riferimento all'area netta, detratta cioè l'area dei fori, assumendo come tale quella minima corrispondente o alla sezione retta o al profilo spezzato.

Per la verifica di stabilità di cui al punto 7, e per la determinazione di qualunque parametro dipendente dalla deformabilità, si devono considerare, invece, le sezioni lorde, cioè senza detrazione dei fori per i collegamenti.

La verifica a flessione delle travi si effettua in generale tenendo conto del momento d'inerzia della sezione con la detrazione degli eventuali fori.

Il calcolo di regola viene eseguito deducendo dal momento d'inerzia della sezione lorda il momento d'inerzia delle aree dei fori rispetto all'asse baricentrico della stessa sezione lorda.

Considerando i 2 profili e il diametro del foro ϕ_f si ha:

$$A_{\text{netta}} = A - 2 \cdot \phi_f \cdot s_{\text{profilo}} = 5020 - 2 \cdot 31 \cdot 12 \cong 4270 \text{mm}^2$$

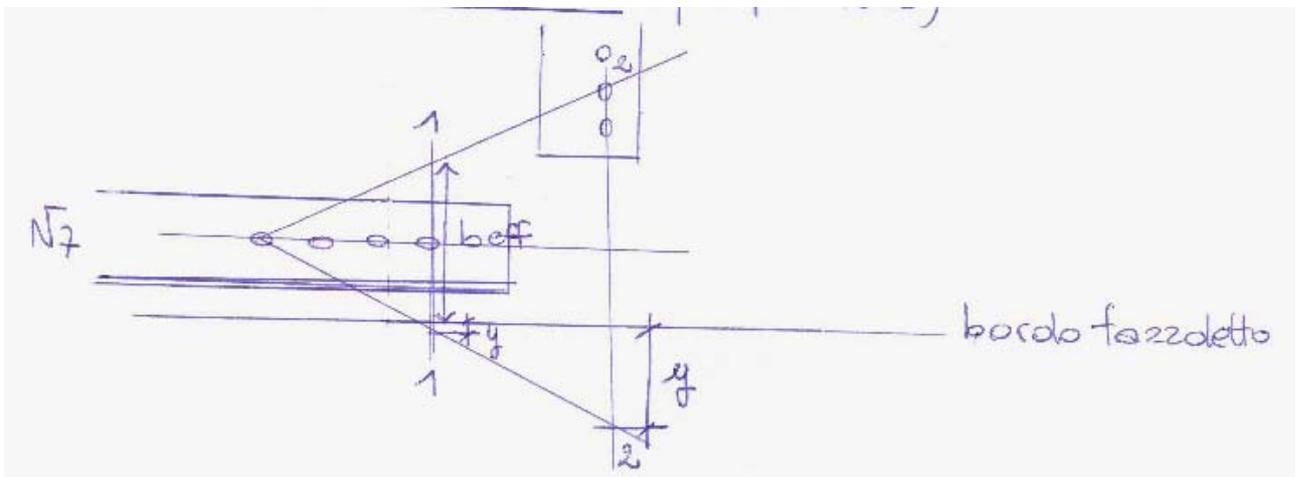
Per cui:

$$\sigma = \frac{N}{A_{netta}} = \frac{950300}{4270} = 223 \frac{N}{mm^2} < f_d = 275 \frac{N}{mm^2} \quad \text{verificato}$$

- Verifica a trazione della lamiera o piastra di nodo: per la verifica della piastra si ammette che lo sforzo di trazione trasmesso dall'asta si ripartisca secondo 2 rette inclinate di 30° con l'asse della bullonatura. Ciò significa che sull'ultimo bullone è necessaria almeno una b_{eff} pari a:

$$b_{eff} = \phi_f + \frac{N}{f_d \cdot s_{piastra}} = 31 + \frac{950300}{275 \cdot 15} \cong 260 \text{mm}$$

La stessa verifica dovrà essere condotta anche nella sezione in cui la retta inclinata incontra l'altra asta, nel caso in cui essa appaia particolarmente indebolita dai fori.



- Verifica ad attrito: se si vuole impedire qualsiasi scorrimento tra i piatti anche allo stato limite ultimo allora si effettua una verifica prevista al punto 5.3 delle Raccomandazioni.

5.3.7. Verifiche ad attrito

Per esigenze particolari della costruzione, può talvolta essere imposto che la giunzione non scorra neppure in condizioni ultime. In questo caso si dovrà verificare che:

$$V \leq \mu N_s \quad \text{stati limite}$$

$$V \leq \frac{\mu N_s}{1,5} \quad \text{tensioni ammissibili}$$

Pensando di non utilizzare superfici trattate allora dal paragrafo 4.2.2.2 e dal prospetto 4IV risulta che $\mu = 0,3$, $N_s = 251000 \text{ N}$ e vi sono 2 piani di contatto.

In conclusione pertanto:

$$V = R = 248952 \text{ N} > 0,3 \cdot 251000 \cdot 2 = 150600 \text{ N} \quad \text{non verificato}$$

Poiché la verifica non risulta soddisfatta si può: o aumentare la scabrezza dei piani di contatto, o aumentare la classe del bullone.

Analogamente si deve condurre una verifica ad attrito per verificare che non esistano scorrimenti agli stati limite di esercizio, facendo pertanto un'analisi sui limiti di deformabilità. In tal caso bisogna ricalcolare le sollecitazioni sulla capriata ottenute con le combinazioni di carico opportune degli S.L.E. (cioè con i coefficienti opportuni indicati al paragrafo 3.2.3.2) e poi verificare che la risultante sia inferiore ad un valore fissato V_f come indicato sotto.

4.2.2.2. La forza $V_{f,0}$ trasmissibile per attrito da ciascun bullone per ogni piano di contatto tra gli elementi da collegare, è espressa dalla relazione:

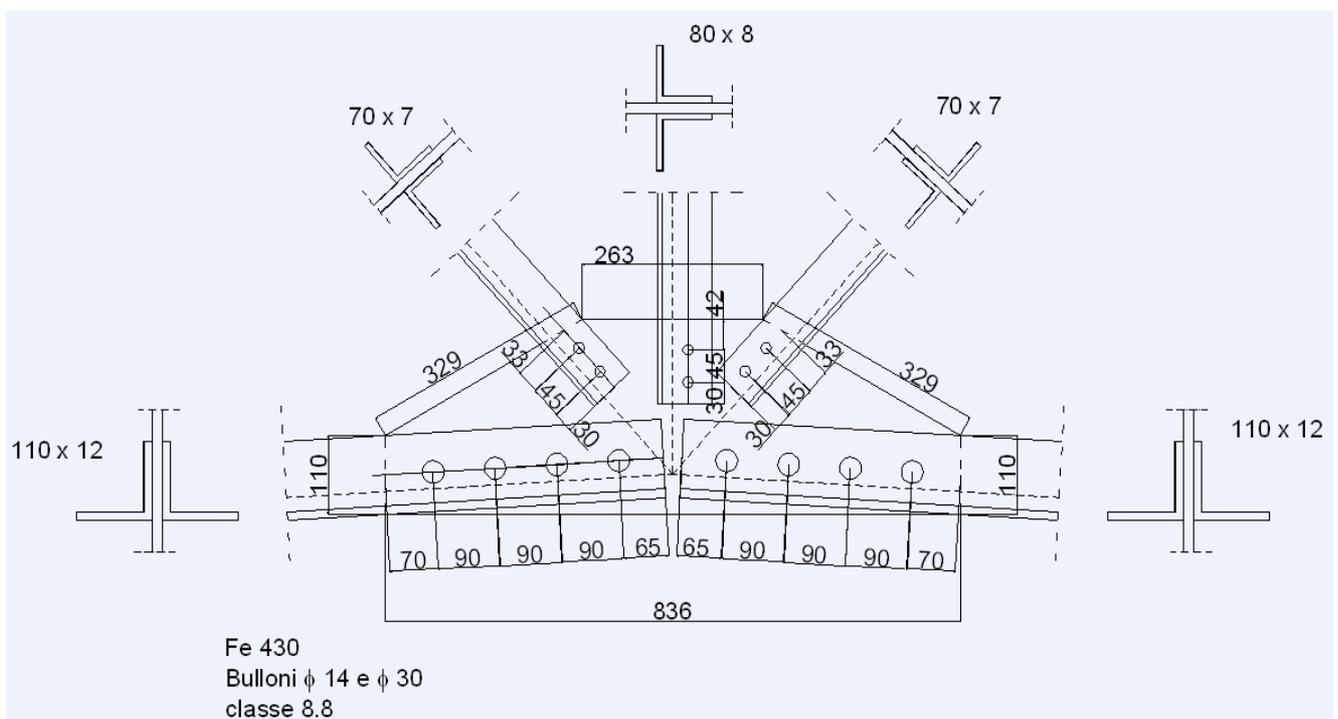
$$V_{f,0} = \mu N_s / \gamma_1$$

dove: γ_1 è il coefficiente di riduzione nei confronti dello slittamento pari a 1,25;

μ è il coefficiente di attrito da assumersi in mancanza di più esatta determinazione (vedere 4.2.2.4) pari a 0,45 per superficie trattate come indicato al punto 9.9.3 e 0,30 per superficie non particolarmente trattate e comunque nelle giunzioni effettuate in opera;

N_s è la forza di trazione nel gambo delle viti (prospetto 4-IV) conseguente il serraggio.

N.B.: ulteriori indicazioni generali sulle unioni bullonate sono presenti al paragrafo 9.9.2 della CNR



• Dimensionamento e verifica dei nodi: soluzione saldata

a) Scelta del tipo di saldatura: cordoni d'angolo

b) Metodo di calcolo: Stati limite ultimi

c) Esempio dimensionamento nodo centrale briglia inferiore:

Introduzione

La saldatura è un processo di giunzione che permette di unire elementi metallici realizzando la continuità del materiale mediante la fusione. Rispetto alle unioni bullonate la soluzione saldata si presenta più rigida e semplice da realizzare evitando anche la verifica dei profili che vengono forati nella soluzione bullonata. A fronte di ciò tuttavia la saldatura può manifestare alcuni problemi importanti che ne compromettono il corretto funzionamento: cricche che portano la formazione di fessure, mancanza di penetrazione, inclusioni cioè presenza di sostanze diverse da quelle del metallo durante la fusione, ecc..

Si possono definire diversi giunti nella saldatura a seconda della posizione reciproca dei pezzi da collegare: giunti testa a testa, giunti a T, giunti d'angolo.

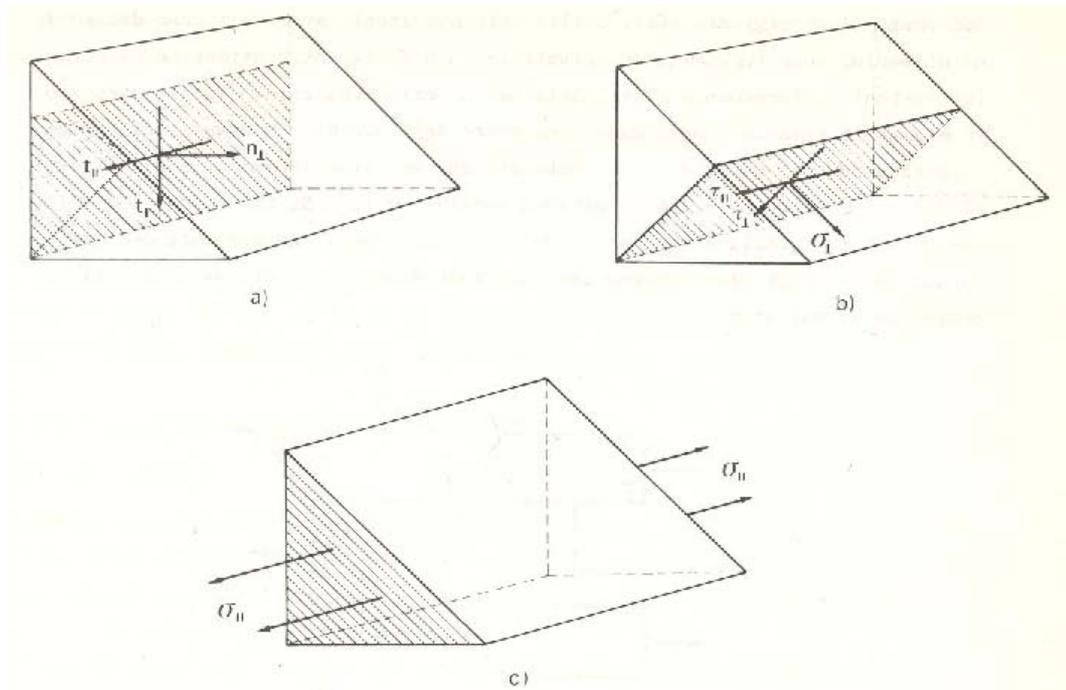
Nei giunti realizzati a cordone d'angolo è fondamentale individuare una sezione resistente della saldatura. Attualmente i metodi di calcolo assumono che le tensioni si distribuiscano uniformemente sulla sezione di gola: essa ha come lunghezza quella del cordone stesso e come larghezza a l'altezza del triangolo inscritto nella sezione trasversale del cordone.



Le sollecitazioni agenti sulla sezione di gola sono convenzionalmente individuate con:

- σ_{\perp} tensione che agisce in direzione perpendicolare alla sezione di gola
- τ_{\perp} tensione che agisce nella sezione di gola in direzione perpendicolare all'asse del cordone
- τ_{\parallel} tensione che agisce nella sezione di gola in direzione parallela all'asse del cordone
- σ_{\parallel} tensione che agisce in direzione parallela all'asse del cordone nella sezione trasversale

Le rispettive tensioni nella sezione di gola ribaltata sul piano che contiene il lato del cordone sono chiamate n_{\perp} , t_{\perp} , e τ_{\parallel} .



Le prescrizioni normative fornite dal Decreto del 1996 e le raccomandazioni del CNR 10011 paragrafo 5.1.2. esprimono come bisogna condurre la verifica dei giunti a cordone d'angolo che sono utilizzati in questa esercitazione.

Si evidenzia come la normativa italiana consideri una nomenclatura differente rispetto a quella di letteratura per le tensioni agenti sulla sezione di gola ribaltata su un lato del cordone; pertanto si dovrà far riferimento a:

$$n_{\perp} \rightarrow \sigma_{\perp}$$

$$t_{\perp} \rightarrow \tau_{\perp}$$

$$t_{\parallel} \rightarrow \tau_{\parallel}$$

5.1.2.3. Il calcolo convenzionale delle tensioni deve essere eseguito ribaltando su uno dei lati del cordone la sezione di gola (vedere figura 5-3). La tensione risultante dalle azioni esterne sulla sezione di gola deve essere scomposta secondo tre direzioni ortogonali nelle componenti di modulo τ_{\perp} , σ_{\perp} e τ_{\parallel} , come indicato nella figura 5-3.

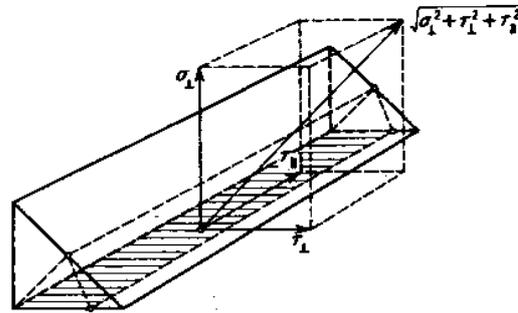


Fig. 5-3

Per la verifica i valori assoluti delle componenti di tensione $|\tau_{\perp}|$, $|\sigma_{\perp}|$ e $|\tau_{\parallel}|$ devono soddisfare le limitazioni di cui al punto seguente.

5.1.2.4. Verifiche stati limite

Nel caso siano presenti tutte e tre le componenti di tensione τ_{\perp} , σ_{\perp} e τ_{\parallel} devono essere verificate le seguenti limitazioni:

$$\sqrt{\tau_{\perp}^2 + \sigma_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2} \leq \begin{cases} 0,85 f_d \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,70 f_d \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510;} \end{cases} \quad [1]$$

$$|\tau_{\perp}| + |\sigma_{\perp}| \leq \begin{cases} f_d \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,85 f_d \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510.} \end{cases} \quad [2]$$

Nel caso in cui siano presenti le sole componenti di tensione τ_{\perp} e τ_{\parallel} è sufficiente verificare l'espressione [2] e nel contempo accertare che sia:

$$|\tau_{\perp}| \leq \begin{cases} 0,85 f_d \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,70 f_d \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510;} \end{cases}$$

$$|\sigma_{\perp}| \leq \begin{cases} 0,85 f_d \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,70 f_d \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510.} \end{cases}$$

Nel caso in cui siano presenti le sole componenti di tensione τ_{\perp} e τ_{\parallel} ovvero σ_{\perp} e τ_{\parallel} è sufficiente verificare l'espressione [1]. Ove sia presente solo una delle componenti di tensione τ_{\perp} , σ_{\perp} o τ_{\parallel} basta ovviamente verificare che sia:

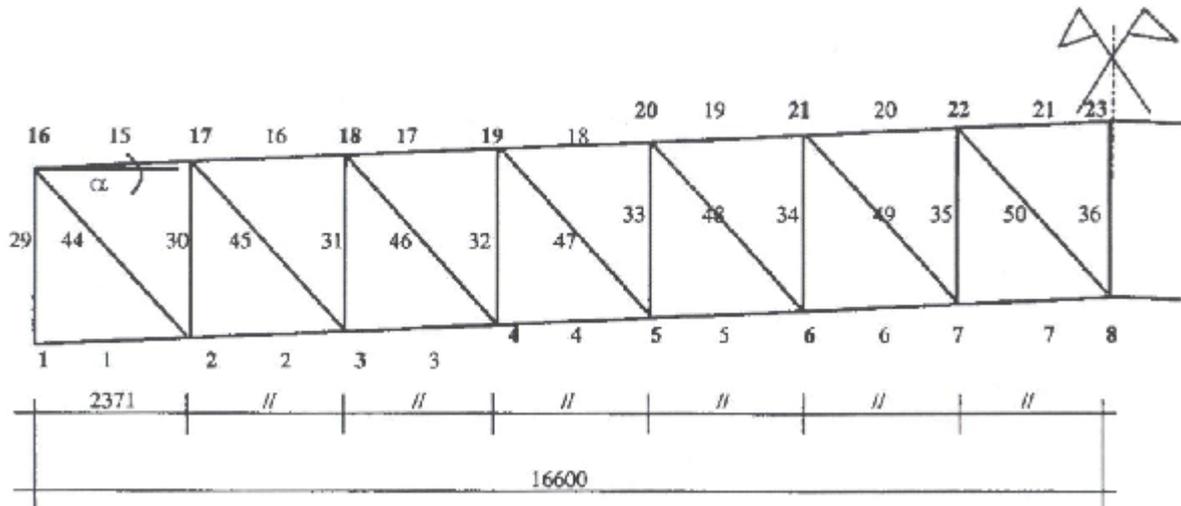
$$|\tau_{\perp}|, |\sigma_{\perp}|, |\tau_{\parallel}| \leq \begin{cases} 0,85 f_d \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,70 f_d \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510.} \end{cases}$$

N.B.: analoghe considerazioni sono prescritte per altri tipi di giunti saldati, che però non sono analizzati in questa esercitazione.

Ulteriori vincoli inerenti gli spessori dei cordoni d'angolo e in generale le unioni saldate sono indicati al paragrafo 9.2 della suddetta CNR.

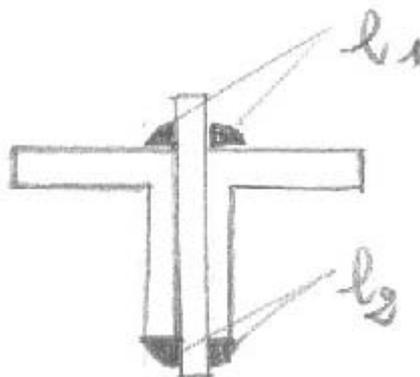
Dimensionamento

Si consideri il nodo n°8 (combinazione 3):



Come illustrato precedentemente l'asta 7 ha una sollecitazione pari a $N_7 = 950,3 \text{ kN}$.

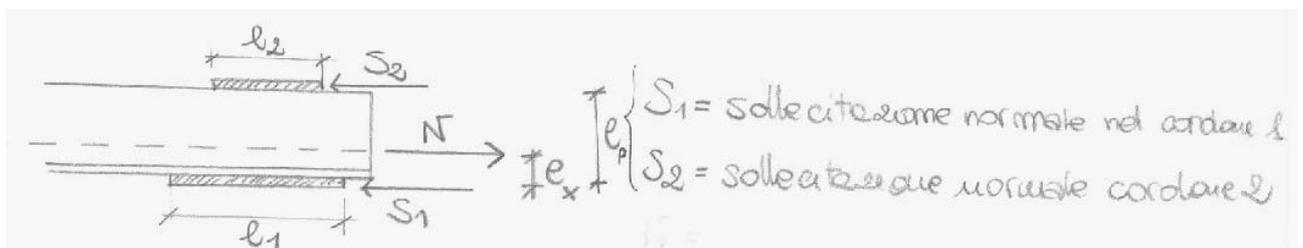
Considerando cordoni d'angolo a lati uguali, poiché la saldatura tra il singolo profilo e il piatto di nodo avverrà su due lati



sono possibili 2 strade differenti:

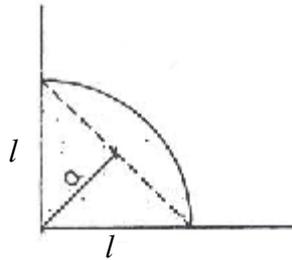
- mantenere lo stesso lato di cordone e far variare la lunghezza
- mantenere la stessa lunghezza di cordone e far variare il lato

Si sceglie la prima strada per questa esercitazione come raffigurato.



Si pone lato del cordone “l” = 12 mm di conseguenza la larghezza “a” della sezione di gola è

$$a = \frac{l \cdot \sqrt{2}}{2} = 12 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 8,5 \text{ mm con cordoni d'angolo a lati uguali.}$$



Si può osservare che i cordoni sono soggetti solo a tensioni tangenziali parallele τ_{\parallel} .

La verifica risulta quindi $|\tau_{\parallel}| \leq 0,7 f_d$ (acciaio Fe 430)

Scrivendo un sistema di equazioni in modo tale che sia rispettato l'equilibrio si ha:

$$\begin{cases} N = S_1 + S_2 \\ S_2 \cdot (l_p - e_x) = S_1 \cdot e_x \end{cases}$$

Uguagliando le tensioni τ_{\parallel} con quelle limite previste dalla Normativa, cioè:

$$\tau_{\parallel 1} = 0,7 \cdot f_d = \frac{S_1}{2 \cdot a \cdot l_1} \Rightarrow S_1 = 2 \cdot a \cdot l_1 \cdot 0,7 \cdot f_d$$

$$\tau_{\parallel 2} = 0,7 \cdot f_d = \frac{S_2}{2 \cdot a \cdot l_2} \Rightarrow S_2 = 2 \cdot a \cdot l_2 \cdot 0,7 \cdot f_d$$

E sostituendo nel sistema si ottiene:

$$\begin{cases} N = 2 \cdot a \cdot l_1 \cdot 0,7 \cdot f_d + 2 \cdot a \cdot l_2 \cdot 0,7 \cdot f_d = 2 \cdot a \cdot 0,7 \cdot f_d \cdot (l_1 + l_2) \\ 2 \cdot a \cdot l_2 \cdot 0,7 \cdot f_d \cdot (l_p - e_x) = 2 \cdot a \cdot l_1 \cdot 0,7 \cdot f_d \cdot e_x \Rightarrow l_1 = l_2 \cdot \left(\frac{l_p - e_x}{e_x} \right) \end{cases}$$

Sostituendo ancora:

$$\begin{cases} N = 2 \cdot a \cdot 0,7 \cdot f_d \cdot \left(l_2 \cdot \left(\frac{l_p - e_x}{e_x} \right) + l_2 \right) \\ l_1 = l_2 \cdot \left(\frac{l_p - e_x}{e_x} \right) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} l_2 = \frac{N}{2 \cdot a \cdot 0,7 \cdot f_d \cdot \left(1 + \left(\frac{l_p - e_x}{e_x} \right) \right)} \\ l_1 = l_2 \cdot \left(\frac{l_p - e_x}{e_x} \right) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} l_2 = \frac{950300}{2 \cdot 8,5 \cdot 0,7 \cdot 275 \cdot \left(1 \cdot \left(\frac{110 - 31,5}{31,5}\right) + 1\right)} \cong 84mm \\ l_1 = l_2 \cdot \left(\frac{l_p - e_x}{e_x}\right) = 84 \cdot \left(\frac{110 - 31,5}{31,5}\right) \cong 210mm \end{cases}$$

Il risultato è coerente fisicamente: infatti essendo che la sollecitazione normale è più vicina al bordo inferiore del profilo (osservando i disegni sopra) sarà necessaria una lunghezza di cordone maggiore.

Tendenzialmente poiché vi possono essere delle difficoltà di eseguire una perfetta saldatura e soprattutto per non far lavorare al limite il materiale, è possibile aggiungere alla lunghezza minima determinata una quota pari al 15%-20%.

N.B.: se i cordoni fossero realizzati di lunghezza uguale e di sezione di gola uguale allora il momento agente non è più assorbito dalle sole tensioni τ_{\parallel} grazie alle geometria della saldatura, ma si avrebbero anche delle tensioni σ_{\perp} .

Verifica

- Verifica della saldatura: ovviamente tale verifica in questo caso risulta automaticamente soddisfatta avendo determinato la lunghezza di saldatura minima che possa resistere alla sollecitazione di calcolo.

- Verifica a trazione della lamiera: come nel caso della bullonatura si procederà ad una verifica per determinare le dimensioni opportune della piastra in modo che una diffusione della tensione di 30° a partire dal bordo della piastra non possa causare il raggiungimento del limite di resistenza della stessa.

Il dimensionamento e la verifica delle soluzioni saldata sarà poi analoga a quella mostrata in precedenza.

