

Documento di validazione Modulo:
GIUNTI BULLONATI ACCIAIO-ACCIAIO



Documenti di validazione Modulo: **GIUNTI BULLONATI ACCIAIO-ACCIAIO**

Calcolo e verifica di giunto con piastra e bulloni in acciaio:

- Calcola le azioni agenti su ogni singolo bullone, in base alle sollecitazioni introdotte nella sezione Statica e alle caratteristiche geometriche dell'unione introdotte nella sezione Geometria.
- Esegue la trattazione delle Azioni e delle Resistenze secondo il metodo Tstub descritto in Eurocodice 3 Progettazione delle strutture in acciaio - parte 1-8 dedicata alla progettazione dei collegamenti, in riferimento alla piastra d'estremità.
- Esegue la verifica a trazione di ogni singolo bullone, dove la resistenza complessiva a trazione è calcolata come il minimo tra la resistenza a punzonamento $B_p.Rd$ e la resistenza a trazione degli elementi di connessione $F_t.Rd$ così come prescritto da NTC 2008 in §4.2.8.1.1.
- Esegue la verifica a taglio di ogni singolo bullone, dove la resistenza complessiva a taglio è calcolata come il minimo tra la resistenza a rifollamento $F_b.Rd$ e la resistenza a taglio degli elementi di connessione $F_v.Rd$ così come prescritto da NTC 2008 in §4.2.8.1.1.
- Esegue inoltre la verifica combinata di trazione e taglio, così come indicato in NTC 2008 in formula 4.2.65.
- Esegue il controllo delle distanze e degli interassi dei fori dei bulloni in riferimento alle dimensioni della piastra secondo prescrizioni NTC 2008 in §4.2.8.1.1.

Nota: eventuali lievi differenze riscontrabili tra i risultati delle formule esplicitate nella presente validazione e gli screenshots utilizzati per la stessa sono dovuti alle procedure di arrotondamento giocoforza adottate dagli algoritmi utilizzati

TEST VALIDAZIONE UNIONE ACCIAIO-ACCIAIO

Per la validazione del modulo si prenderà in esame l'esempio mostrato in *Demo Relazione* il cui report di calcolo viene riportato qui sotto:

Demo

idMod. 6 | vers.0

MATERIALI

Bulloni

Classe	8.8
fyb	640 N/mm ²
ftb	800 N/mm ²

Piastra

Classe	S275
fyk	275 N/mm ²
ftk	430 N/mm ²

GEOMETRIA

Bulloni

Øbulloni	M16
area bullone	1.57 cm ²
num. bulloni	8
tipo unione	Unioni non esposte a feno...
min. distanza	150 mm
righe sup.	2
colonne sup.	2
ph sup.	200 mm
pv sup.	100 mm
num. bulloni sup.	4
righe inf.	2
colonne inf.	2
ph inf.	200 mm
pv inf.	100 mm
num. bulloni inf.	4

Piastra

spessore	15 mm
larghezza	400 mm
altezza	500 mm
contro piastra	8 mm

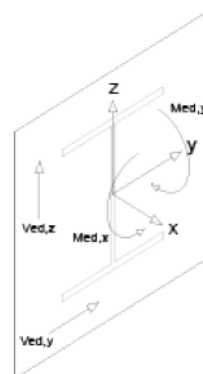
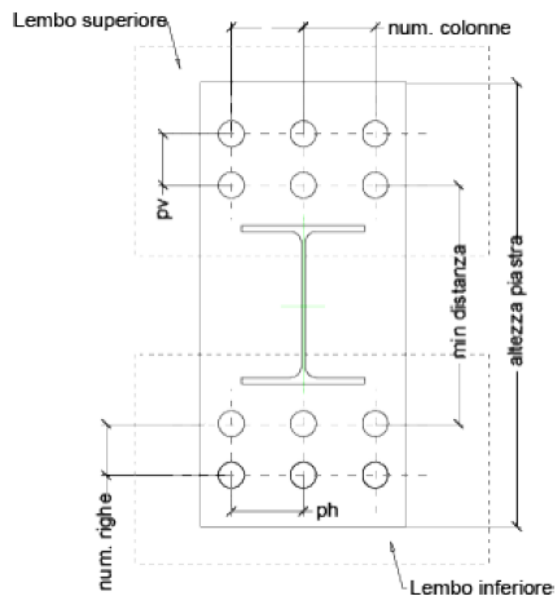
Profilo

Sezione acciaio	IPE240
-----------------	--------

STATICA

Sollecitazioni

Med,x	10 kNm
Ved,y	10 kN
Med,y	50 kNm
Ved,z	25 kN



CONTROLLO VALORI PIASTRA

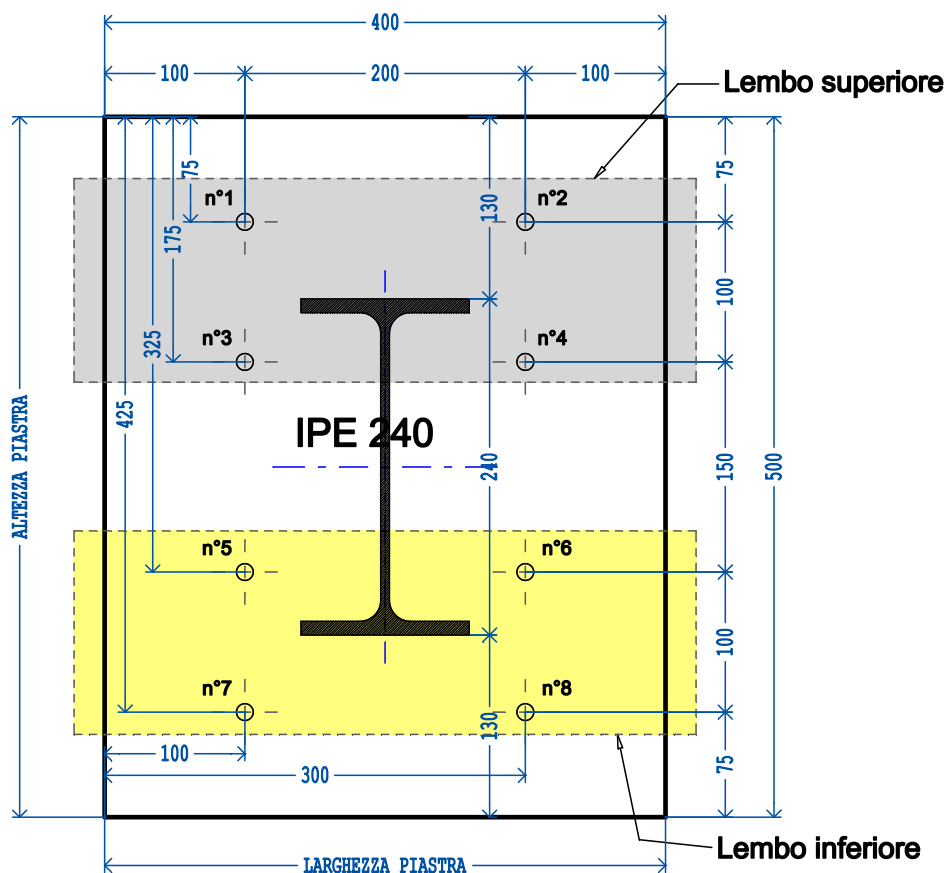
Il software controlla che i valori immessi siano congruenti, ovvero che:

- La larghezza della piastra sia maggiore dell'ingombro dei bulloni sia al lembo superiore che inferiore;
- L'altezza della piastra è maggiore della massima distanza dei bulloni;
- Inerzie flessionali e torsionali siano diverse da zero rispetto alla sollecitazione gravante;

Nel caso in esame:

- $400\text{mm} = \text{Larghezza piastra} > 200\text{mm} \cdot (\text{n}^\circ \text{colonne} - 1) = 200\text{ mm}$
 $400\text{mm} = \text{Larghezza piastra} > 200\text{mm} \cdot (\text{n}^\circ \text{colonne} - 1) = 200\text{ mm}$
- $500\text{mm} = \text{Altezza piastra} > \text{max distanza} = 400\text{mm}$
- $M_y \neq 0 \Rightarrow J_y \neq 0; \quad M_x = 0 \Rightarrow J_{tors} \neq 0;$

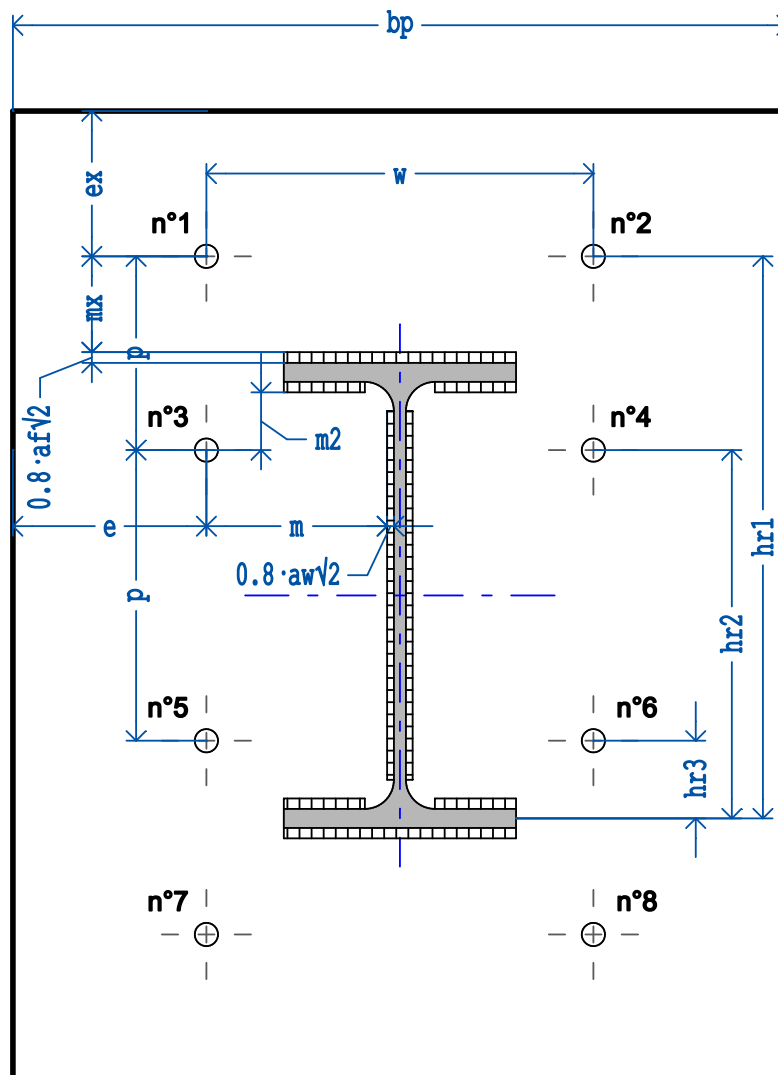
Si riporta uno schema geometrico e la numerazione bulloni del caso riportato:

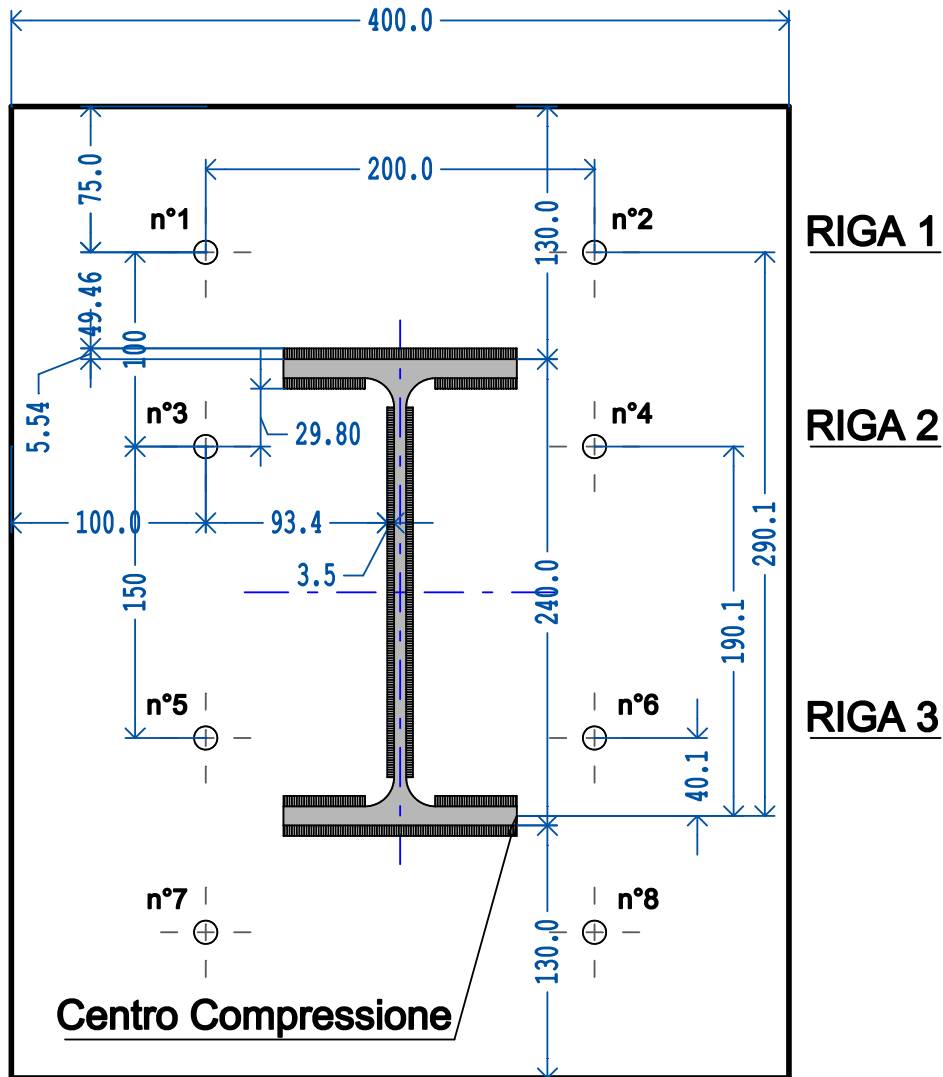


MODELLO T-STUB

Per la verifica delle giunzioni bullonate, tematica di tale modulo, sia nel calcolo delle Azioni che delle Resistenze, si fa riferimento in primo luogo alle NTC 2008 e "in mancanza di specifiche indicazioni" come recita la già citata norma, si ricorre a quanto prescritto in merito da Eurocodice 3 dedicato alla *Progettazione delle strutture in acciaio* ed in particolar modo della Parte 1-8: *Progettazione dei collegamenti*.

All'interno di tale sezione quindi viene definito il modello T-stub che può essere utilizzato per modellare la resistenza di componenti come la piastra d'estremità soggetta a flessione, oggetto del modulo in questione. Per partire, è importante inizialmente specificare le variabili geometriche derivanti dai dati di input introdotti, necessarie per l'elaborazione di diverse entità di calcolo intermedie sulla base delle quali approdare poi a varie considerazioni di confronto tra Azioni e Resistenze. Riportiamo sotto un report di tali variabili geometriche con diciture e relativi valori:





$$e=100 \text{ mm}$$

$$w=200 \text{ mm}$$

$$af=0.5 \cdot tf=4.9 \text{ mm}$$

$$m=93.4 \text{ mm}$$

$$m2=29.65 \text{ mm}$$

$$p_{1-2}=100 \text{ mm}$$

$$e_x=75 \text{ mm}$$

$$n=100 \text{ mm} (< 1.25 \cdot m)$$

$$p_{2-3}=150 \text{ mm}$$

$$m_x=49.46 \text{ mm}$$

$$aw=0.5 \cdot tw=3.1 \text{ mm}$$

I seguenti valori invece sono le distanze dell'asse del bullone dal centro di compressione che secondo il modello T-stub viene individuato in linea con la metà dello spessore della flangia del lembo compresso.

$$hr_1=290.1 \text{ mm}$$

$$hr_2=190.1 \text{ mm}$$

$$hr_3=40.1 \text{ mm}$$

In base a tali valori si entra poi nella tabella 6.6 per il calcolo delle *Lunghezze Effettive* (l_{eff}).

Posizione Riga di bulloni	Riga di bulloni considerata individualmente		Riga di bulloni considerata come parte di un gruppo di righe di bulloni	
	Modelli circolari $L_{eff,cp}$	Modelli non circolari $L_{eff,nc}$	Modelli circolari $L_{eff,cp}$	Modelli non circolari $L_{eff,nc}$
Riga di bulloni esterna alla flangia della trave in trazione	La minore di: $2\pi \cdot m_x$ $\pi \cdot m_x + w$ $\pi \cdot m_x + 2 \cdot e$	La minore di: $4 \cdot m_x + 1.25 \cdot e_x$ $e + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x$ $0.5 \cdot b_p$ $0.5 \cdot w + 2 \cdot m_x$ $+ 0.625 \cdot e_x$	-	-
Prima Riga di bulloni interna alla flangia della trave in trazione	$2\pi \cdot m$	$\alpha \cdot m$	$\pi \cdot m + p$	$0.5 \cdot p + \alpha \cdot m -$ $(2 \cdot m + 0.625 \cdot e)$
Altra Riga di bulloni più interna	$2\pi \cdot m$	$4 \cdot m + 1.25 \cdot e$	$2 \cdot p$	p
Altra finale Riga di bulloni	$2\pi \cdot m$	$4 \cdot m + 1.25 \cdot e$	$\pi \cdot m + p$	$2 \cdot m + 0.625e + 0.5p$
MODO 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ ma $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\Sigma l_{eff,1} = \Sigma l_{eff,nc}$ ma $\Sigma l_{eff,1} \leq \Sigma l_{eff,cp}$	
MODO 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\Sigma l_{eff,2} = \Sigma l_{eff,nc}$	

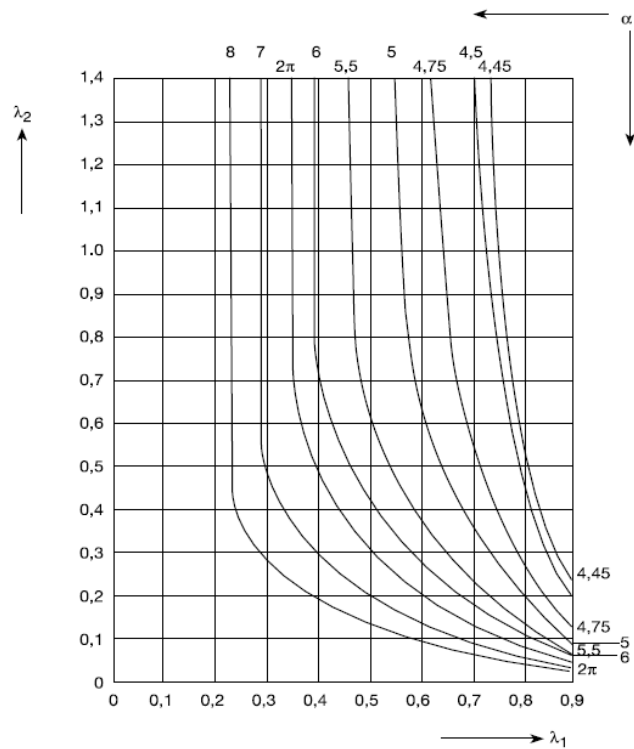
Tabella 6.6 Eurocodice 3 parte 1-8

dove α deve essere ottenuto dal grafico sottostante (figura 6.11 Eurocodice), dove entrando nel grafico con i valori:

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} = 0.4829$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} = 0.1533$$

si ottiene $\alpha = 7.99$.



Dati i valori geometrici precedentemente ricavati, la tabella relativamente alle diverse righe risulterà come sotto riportata:

Posizione Riga di bulloni	Riga di bulloni considerata individualmente		Riga di bulloni considerata come parte di un gruppo di righe di bulloni	
	Modelli circolari Leff,cp	Modelli non circolari Leff,nc	Modelli circolari Leff,cp	Modelli non circolari Leff,nc
Riga 1	La minore di: 310.74 355.37 355.37	La minore di: 291.57 245.78 200 245.78	-	-
Riga 2	586.80	747.14	443.4	572.85

Altra Riga di bulloni interna	-	-	-	-
Riga 3	586.80	498.57	393.4	299.3
MODO 1	leff,1=leff,nc ma leff,1<= leff,cp		Σleff,1=Σleff,nc ma Σleff,1<=Σleff,cp	
MODO 2	leff,2=leff,nc		Σleff,2=Σleff,nc	

Tabella 6.6 Eurocodice 3 parte 1-8 relativa all'esempio

Calcolo resistenze

Una volta calcolate le lunghezze efficaci si passa a calcolare le resistenze $F_{T,Rd}$ della flangia del modello T-stub per ogni riga di competenza secondo quanto indicato in tabella 6.2 di Eurocodice 3 parte 1-8.

Verranno calcolate le resistenze di ogni modalità di collasso, ovvero lo snervamento completo dell'ala (Modo 1), la rottura dei bulloni con snervamento dell'ala (Modo 2) e la sola rottura dei bulloni (Modo 3), e ne prende la minima. Tale discorso andrà ripetuto sia per i bulloni considerati individualmente che come parte di un gruppo.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 M_{p1,1,Rd}}{m}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 M_{p1,2,Rd} + n \Sigma F_{T,Rd}}{m + n}$$

$$F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{T,Rd}$$

dove:

$$M_{p1,1,Rd} = 0.25 \Sigma l_{eff,1} \cdot t f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

$$M_{p1,2,Rd} = 0.25 \Sigma l_{eff,2} \cdot t f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

$$\Sigma F_{T,Rd} = \text{valore totale delle resistenze di tutti i bulloni}$$

Valori individuali

Nella fattispecie a titolo di esempio, si svolge il calcolo dei suddetti valori di resistenza per la **riga 2**, inizialmente relativamente alla riga di bulloni considerata *individualmente*.

Prima di inoltrarci nelle procedure derivanti dalla applicazione della Tabella 6.2, è necessario calcolare alcune entità geometriche derivanti dalla bulloneria e piastrame in gioco. Stiamo

parlando del valore L_b richiamato in tabella e che poi sarà anche in seguito necessario per il calcolo delle azioni.

Come recita la tabella 6.2, L_b è:

- la lunghezza del tratto di allungamento del bullone, considerata uguale alla lunghezza della zona di serraggio (spessore totale dei piatti e delle rondelle) più metà della somma dell'altezza della testa del bullone e dell'altezza del dado;

oppure

- la lunghezza del tratto di allungamento del tirafondo, considerata uguale alla somma di 8 volte il diametro nominale del bullone, dello strato di malta di allettamento, dello spessore della piastra, della rondella e di metà altezza del dado;

Essendo dedicato il modulo ad un'applicazione generica (sia bullonata che tirafondata), nel calcolo vengono ricavati i 2 valori e preso quello maggiore, essendo in questo caso il termine maggiore vincolante alla verifica $L_b < L_b^*$ presente nella tabella 6.2 che indirizza il calcolo delle resistenze in due filoni differenti (calcolo dei valori $F_{T,1,Rd}$ e $F_{T,2,Rd}$ oppure il solo $F_{T,1-2,Rd}$).

Nel caso in questione abbiamo:

htb	=	altezza testa del bullone	=	10 mm
htd	=	altezza testa del dado	=	13 mm
sr	=	spessore rondella	=	3 mm
sp	=	spessore piatto	=	15 mm
db	=	diámetro bullone	=	16 mm
As	=	area bullone	=	157 mm ²

quindi si avrà:

L_b come bullone	=	$2 \cdot sp + sr + (htb + hd) / 2$	=	44.5 mm
L_b come tirafondo	=	$8 \cdot db + sp + sr + hd / 2$	=	152.5 mm
$L_b = \max\{ L_b \text{ bullone}, L_b \text{ tirafondo} \}$	=		=	152.5 mm

Il calcolo dell' L_b^* invece risulta:

$$L_b^* = \frac{8 \cdot 8 \cdot m^3 \cdot A_s}{\Sigma l_{eff,1} \cdot t_f^3} \quad \text{riga 2} \rightarrow \quad L_b^* = 568.27 \text{ mm}$$

e quindi relativamente alla riga 2 si adotterà il metodo 1 della colonna $L_b < L_b^*$ della tabella 6.2.

Visti i calcoli sopra riportati (vedi tabella), si ha:

$$l_{eff,1} = 586.80 \text{ mm}$$

$$l_{eff,2}=747.14 \text{ mm}$$

$$M_{p1,1,Rd}=0.25 \cdot 586.80 \cdot 15^2 \cdot 275/1.05 = 8644879 \text{ Nmm}$$

$$M_{p1,2,Rd}=0.25 \cdot 747.14 \cdot 15^2 \cdot 275/1.05 = 11006993 \text{ Nmm}$$

$$\Sigma F_{T,Rd}=2 \cdot 0.9 \cdot 157 \cdot 800/1.25 = 180864 \text{ N}$$

e quindi si avranno le seguenti resistenze:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot 8644879}{93.39} / 1000 = 370.259 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot 11006993 + 100 \cdot 180864}{93.39 + 100} / 1000 = 207.352 \text{ kN}$$

$$F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{T,Rd} = 180.864 \text{ kN}$$

che sono i valori che si ritrovano in relazione relativamente alla riga 2:

Valori modello T-STUB (EC3 - 6.2.4)

Riga	Valori Individuali						Valori Totali		
	leff,cp mm	leff,nc mm	Ft,1,Rd kN	Ft,2,Rd kN	Ft,1-2,Rd kN	Ft,3,Rd kN	hr mm	*Ft,Rd,pot kN	**Ft,Rd,rid kN
Riga n.1	310.74	200	238.3057	156.3413	0	180.864	290.1	156.3413	156.3413
Riga n.2	586.8	747.14	370.25913	207.35207	0	180.864	190.1	180.864	180.864
Riga n.3	586.8	498.57	314.58627	169.48122	0	180.864	40.1	142.86287	38.15174

e quindi:

$$F_{T,3,Rd,2^\circ \text{ RIGAIND}}=180.864 \text{ kN}$$

Ripetiamo lo procedimento effettuato per la riga 2, relativamente alla riga 3 in quanto ci sarà necessario nel paragrafo successivo. Si avrà quindi:

$$l_{eff,1}=498.57 \text{ mm}$$

$$l_{eff,2}=498.57 \text{ mm}$$

$$M_{p1,1,Rd}=0.25 \cdot 498.57 \cdot 15^2 \cdot 275/1.05 = 7345019 \text{ Nmm}$$

$$M_{p1,2,Rd}=0.25 \cdot 498.57 \cdot 15^2 \cdot 275/1.05 = 7345019 \text{ Nmm}$$

$$\Sigma F_{T,Rd}=2 \cdot 0.9 \cdot 157 \cdot 800/1.25 = 180864 \text{ N}$$

e quindi si avranno le seguenti resistenze:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot 7345019}{93.39} / 1000 = 314.586 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot 7345019 + 100 \cdot 180864}{93.39 + 100} / 1000 = 169.481 \text{ kN}$$

$$F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{T,Rd} = 180.864 \text{ kN}$$

e quindi:

$$F_{T,3,Rd,3^{\circ} \text{ RIGA IND}} = 169.481 \text{ kN}$$

Valori come parte di un gruppo di righe di bulloni

Per il calcolo dei valori resistenti delle righe di bulloni considerate come parte di un gruppo di righe di bulloni (in seguito rinominate *Resistenze di Gruppo*), si fa riferimento alla riga 3, nella quale si può capire come realmente intervengono le componenti date dal comportamento di gruppo.

Sostanzialmente si vanno a ricavare le stesse entità di calcolo ottenute per il comportamento individuale della riga, però facendo riferimento a quanto previsto per il comportamento di gruppo (vedi Tabella 6.6); per la riga 3 si prevederà quindi l'analisi del comportamento di gruppo della riga2 e della riga3, alla quale si sottrarrà il valore di resistenza della riga 2 precedentemente calcolato, nella redistribuzione dei valori descritta in paragrafo 6.2.4.2 di Eurocodice 3 parte 1-8.

Visti i calcoli sopra riportati (vedi tabella), relativamente alla riga 2+3 si ha:

$$l_{eff,1} = 886.8 \text{ mm}$$

$$l_{eff,2} = 897.14 \text{ mm}$$

$$M_{p1,1,Rd} = 0.25 \cdot 886.8 \cdot 15^2 \cdot 275 / 1.05 = 13064522 \text{ Nmm}$$

$$M_{p1,2,Rd} = 0.25 \cdot 897.14 \cdot 15^2 \cdot 275 / 1.05 = 13216814 \text{ Nmm}$$

$$\Sigma F_{T,Rd} = 2 \cdot 2 \cdot 0.9 \cdot 157 \cdot 800 / 1.25 = 361728 \text{ N}$$

e quindi si avranno le seguenti resistenze:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot 13064522}{93.39} / 1000 = 559.551 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot 13216814 + 100 \cdot 361728}{93.39 + 100} / 1000 = 323.726 \text{ kN}$$

$$F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{T,Rd} = 361.728 \text{ kN}$$

$$F_{T,Rd,2^{\circ} + 3^{\circ}} = \min\{F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd}, F_{T,3,Rd}\} = 323.726 \text{ kN}$$

Il valore sopra riportato costituisce la resistenza relativa al comportamento di gruppo delle righe 2 e 3, alla quale andrà tolta la componente della riga 2 calcolata sopra e considerata individualmente. Si avrà quindi:

$$\text{GRUPPO: } F_{T,Rd,3^{\circ} \text{ riga, GRUPPO}} = F_{T,Rd,2^{\circ} + 3^{\circ}} - F_{T,Rd,2^{\circ}} = 323.726 - 180.864 = 142.862 \text{ kN}$$

INDIVIDUALE: $F_{T, Rd, 3^{\circ}riga, IND} = 169.481 \text{ kN}$

Quindi il valore finale della riga 3 sarà il minimo di quanto calcolato individualmente e quanto calcolato come parte di un gruppo di righe di bulloni.

$$F_{T, Rd, 3^{\circ}riga} = 142.862 \text{ kN}$$

Una volta ottenute le resistenze involuppo dei meccanismi individuali e di gruppo (penultima colonna tabella modello T-stub di relazione), è necessario ricalibrare ulteriormente i valori di resistenza ottenuti, in ottemperanza del punto (9) del paragrafo 6.2.7.2 dell'EC, secondo la formula (6.26) riportata sotto:

$$F_{t, r, Rd} \leq F_{tx, Rd} \cdot h_r / h_x$$

nel caso in cui una precedente riga x esibisce una resistenza finale $F_{tx, Rd}$ maggiore di $1,9 \cdot F_{t, Rd}$ dove $F_{t, Rd}$ è la resistenza di un singolo bullone. Tale redistribuzione nelle righe più interne viene effettuata anche quando il valore finale di resistenza della riga (penultima colonna) risulta maggiore del valore ricavato da un andamento lineare delle resistenze a partire dal valore della riga superiore sino a giungere al centro di compressione.

In questo caso infatti, partendo dal valore sopra ricavato otteniamo:

$$F_{t, Rd, rid\ 3^{\circ}riga} = (F_{t, Rd, rid\ 3^{\circ}riga} / h_{r2^{\circ}riga}) \cdot h_{r3^{\circ}riga} = (180.864 / 190.1) \cdot 40.1 = 38,15 \text{ kN}$$

come riportato in relazione.

I valori ricavati nell'ultima colonna saranno utilizzati come termini di confronto con le azioni, ma vanno anche a comporre il momento risultante ultimo dell'unione $M_{j, Rd}$ semplicemente moltiplicando il valore di resistenza della riga per il valore della distanza della stessa dal centro di compressione, ovvero h_r . Moltiplicando quindi i valori della terzultima colonna con l'ultima si avrà:

$$M_{j, Rd} = (156.3413 \cdot 290.1 + 180.864 \cdot 190.1 + 38.15174 \cdot 40.1) / 1000 = 81.266 \text{ kNm}$$

come riportato in relazione. Tale valore verrà confrontato con il momento introdotto in input e ricavato il relativo fattore di sicurezza.

Verifica Unione (EC3 - 6.2.7.2)

Mj,Ed kNm	Mj,Rd kNm	FS
50	81.26674	1.6253

Calcolo azioni

Date le sollecitazioni in input, applicate nel baricentro della piastra, il calcolo ricava le componenti lungo le direzioni y e z date dalla sovrapposizione delle componenti di taglio, flessionali e torsionali, quest'ultime derivanti dal calcolo delle inerzie torsionali del meccanismo, mentre invece facendo riferimento a quanto previsto dal modello T-stub in merito alla ripartizioni delle azioni derivanti da azione flessionale,

Per prima cosa quindi si calcola il baricentro dell'insieme dei bulloni, partendo dallo spigolo alto sinistro della piastra come è la convenzione delle coordinate e della numerazione bulloni:

$$z_G = \sum z_i / n^\circ = (75 \cdot 2 + 175 \cdot 2 + 325 \cdot 2 + 425 \cdot 5) / 8 = 250 \text{ mm}$$

$$y_G = \sum y_i / n^\circ = (100 \cdot 4 + 300 \cdot 4) / 8 = 200 \text{ mm}$$

per poi ricavarsi l'inerzia torsionale dalla sommatoria svolta punto per punto:

$$J_{tors} = \sum [(y_i - y_G)^2 + (z_i - z_G)^2] = 225000 \text{ mm}^2$$

Al momento torsionale M_x introdotto inoltre dovrà essere aggiunta la componente derivante dal taglio V_y per il braccio costituito dalla distanza del punto di applicazione della sollecitazione (baricentro della piastra) dal baricentro dei bulloni. In questo caso tale distanza risulta uguale a zero, essendo coincidenti i 2 valori.

Dopodiché andranno aggiunte le componenti di taglio derivanti dalla ripartizione dei 2 tagli V_y e V_z nelle 2 direzioni tra tutti i bulloni in gioco.

A titolo di esempio si svolge il calcolo delle componenti di taglio di un bullone al lembo superiore (n°1).

bullone n.1:

$$z = 75 \text{ mm}$$

$$y = 100 \text{ mm}$$

$$V_y = 10000 / 8 \text{ bulloni} + 10000000 / 225000 \text{ mm}^2 \cdot (75 - 250) = -6.527 \text{ kN}$$

$$V_z = 25000 / 8 \text{ bulloni} + 10000000 / 225000 \text{ mm}^2 \cdot (100 - 200) = -1.319 \text{ kN}$$

come riportato in relazione.

Azioni	z mm	y mm	Traz kN	Vz kN	Vy kN	Vtot kN
bullone n.1	75	100	66.47422	-1.31944	-6.52778	6.65979

Per quanto riguarda le componenti flessionali invece si fa riferimento a quanto prescritto in Eurocodice 3 parte 1-8 al capitolo 6.3.3 relativo alle unioni con piatto di estremità con due o più righe di bulloni. Il procedimento sostanzialmente ripartisce le azioni flessionali in base alle rigidità espresse dalle diverse righe di bulloni. Le rigidità considerate nel calcolo saranno il valore k_5 relativo a *flangia d'estremità in flessione* e il valore k_{10} relativo ai *bulloni in trazione* elencati nella Tabella 6.11 di EC3 parte 1-8.

$$k_5 = \frac{(0.9 \cdot l_{eff} \cdot t_f^3)}{m^3} \qquad k_{10} = 1.6 \cdot A_s \cdot I_b$$

Le diverse componenti di rigidità verranno poi pesate nella formula:

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}}$$

Ricavato il valore per ogni riga, si passa poi alla formula del braccio della coppia interna:

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r}$$

Tale valore, essendo unico, determinerà anche un unico valore di azione per tutte le righe di bulloni; essa verrà quindi ripartita lungo le varie righe scomponendo il denominatore secondo il contributo della riga di competenza, ovvero:

$$E_{d,r} = M_d \frac{k_{eff,r} \cdot h_r}{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r^2}$$

Quindi facendo riferimento ai valori già calcolati al paragrafo precedente, e prendendo come l_{eff} il valore minore tra quelle considerate come individuali che quelle di gruppo, con rottura circolare e non (cp e nc), si avrà:

riga 1:

$$l_{eff,cp,ind} = 310.74 \text{ mm} \quad l_{eff,cp,ind} = 200 \text{ mm}$$

$$\rightarrow l_{eff,calcolo} = 200 \text{ mm}$$

$$k_5 = (0.9 \cdot 200 \cdot 15^3) / 49.45^3 = 5.02 \text{ mm}$$

$$k_{10} = 1.6 \cdot 157 / 152.5 = 1.64 \text{ mm}$$

$$\rightarrow k_{eff} = 1.24 \text{ mm}$$

riga 2:

$$l_{eff,cp,ind} = 586.90 \text{ mm} \quad l_{eff,cp,ind} = 747.14 \text{ mm} \quad l_{eff,cp,gru} = 443.40 \text{ mm} \quad l_{eff,cp,gru} = 572.85 \text{ mm}$$

$$\rightarrow l_{eff,calcolo} = 443.4 \text{ mm}$$

$$k_5 = (0.9 \cdot 443.4 \cdot 15^3) / 93.39^3 = 1.65 \text{ mm}$$

$$k_{10} = 1.6 \cdot 157 / 152.5 = 1.64 \text{ mm}$$

$$\rightarrow k_{\text{eff}} = 0.82 \text{ mm}$$

riga 3:

$$l_{\text{eff,cp,ind}} = 586.90 \text{ mm} \quad l_{\text{eff,cp,ind}} = 498.57 \text{ mm} \quad l_{\text{eff,cp,gru}} = 443.40 \text{ mm} \quad l_{\text{eff,cp,gru}} = 324.28 \text{ mm}$$

$$\rightarrow l_{\text{eff,calcolo}} = 324.28 \text{ mm}$$

$$k_5 = (0.9 \cdot 324.28 \cdot 15^3) / 93.39^3 = 1.21 \text{ mm}$$

$$k_{10} = 1.6 \cdot 157 / 152.5 = 1.64 \text{ mm}$$

$$\rightarrow k_{\text{eff}} = 0.69 \text{ mm}$$

Il valore delle azioni si ricaverà quindi secondo le formula:

$$E_{d,\text{riga1}} = 50000000 \frac{1.24 \cdot 290.1}{1.24 \cdot 290.1^2 + 0.82 \cdot 190.1^2 + 0.69 \cdot 40.1^2} / 1000 = 132.94 \text{ kN}$$

$$E_{d,\text{bullone1-2}} = E_{d,\text{riga1}} / 2 = 66.47 \text{ kN}$$

$$E_{d,\text{riga2}} = 50000000 \frac{0.82 \cdot 190.1}{1.24 \cdot 290.1^2 + 0.82 \cdot 190.1^2 + 0.69 \cdot 40.1^2} / 1000 = 57.95 \text{ kN}$$

$$E_{d,\text{bullone3-4}} = E_{d,\text{riga2}} / 2 = 28.97 \text{ kN}$$

$$E_{d,\text{riga3}} = 50000000 \frac{0.69 \cdot 40.1}{1.24 \cdot 290.1^2 + 0.82 \cdot 190.1^2 + 0.69 \cdot 40.1^2} / 1000 = 10.33 \text{ kN}$$

$$E_{d,\text{bullone5-6}} = E_{d,\text{riga3}} / 2 = 5.16 \text{ kN}$$

come riportato in relazione.

Azioni	z mm	y mm	Traz kN	Vz kN	Vy kN	Vtot kN
bullone n.1	75	100	66.47422	-1.31944	-6.52778	6.65979
bullone n.2	75	300	66.47422	7.56944	-6.52778	9.99542
bullone n.3	175	100	28.97783	-1.31944	-2.08333	2.46601
bullone n.4	175	300	28.97783	7.56944	-2.08333	7.85091
bullone n.5	325	100	5.16568	-1.31944	4.58333	4.76947
bullone n.6	325	300	5.16568	7.56944	4.58333	8.84892

Da precisare che sia nell'analisi delle resistenze che delle azioni, il modulo in questione per gli aspetti flessionali circoscrive l'analisi alle righe e le colonne previste dal modello T-stub, ovvero quelle che rientrano all'interno delle casistiche della Tabella 6.6. Altre righe al di fuori dello schema previsto saranno protagoniste esclusivamente delle componenti taglianti e torsionali.

RESISTENZE BULLONE

Resistenza a Taglio e Punzonamento (uguale per tutti i bulloni):

$$F_{v,Rd} = 0.6 \cdot \text{area} \cdot f_{tb} / \gamma_{M2} = 0.6 \cdot 157 \cdot 800 / 1.25 = 60.288 \text{ kN}$$

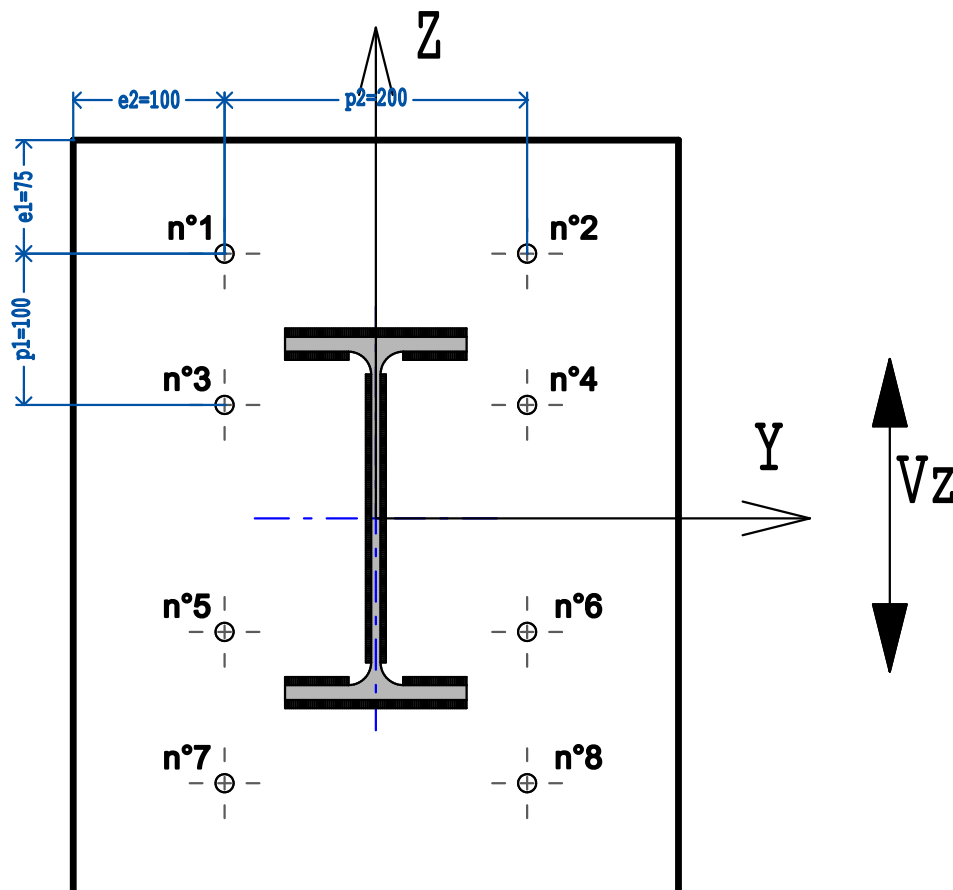
$$B_{p,Rd} = 0.6 \cdot \Pi \cdot d_m \cdot s_{p\text{piastra}} \cdot f_{tk} / \gamma_{M2} = 0.6 \cdot 3.14 \cdot 25 \cdot 855 \cdot 15 \cdot 430 / 1.25 = 251.47 \text{ kN}$$

Resistenze	Taglio ($F_{v,Rd}$) kN	Trazione ($F_{t,Rd}$) kN	Punzonamento ($B_{p,Rd}$) kN
	60.288	90.432	251.47532

mentre invece la resistenza a trazione sarà la massima resistenza tra le diverse righe ottenuta con modello T-stub.

Resistenza a rifollamento (specifico per ogni bullone):

La resistenza a rifollamento va valutata bullone per bullone e in entrambi le direzioni y e z, in quanto in base a queste si delineano le diverse casistiche che vengono prese in considerazione al cap. 4.2.8.1.1 di NTC e relativamente alla formula (4.2.61) in cui α e k possono cambiare in ogni situazione (vedi Fig. 4.2.3).



In base a tale schema si avranno i seguenti valori:

Si calcolano quindi i 4 valori di α e di k :

$$\alpha_{\text{bordo}} = \min\{e_1 / (3 \cdot d_0); f_{tb} / f_{tk}, 1\};$$

$$\alpha_{\text{int}} = \min\{p_1 / (3 \cdot d_0) - 0.25; f_{tb} / f_{tk}; 1\};$$

$$k_{\text{bordo}} = \min\{2.8 \cdot e_2 / d_0 - 1.7; 2.5\};$$

$$k_{\text{int}} = \min\{1.4 \cdot p_2 / d_0 - 1.7; 2.5\};$$

che nella direzione in questione diventano:

$$\alpha_{\text{bordo}} = \min\{75 / (3 \cdot 17); 800 / 430; 1\} = \min\{1.47; 1.86; 1\} = 1;$$

$$\alpha_{\text{int}} = \min\{100 / (3 \cdot 17) - 0.25; 800 / 430; 1\} = \min\{1.71; 1.86; 1\} = 1;$$

$$k_{\text{bordo}} = \min\{2.8 \cdot 100 / 17 - 1.7; 2.5\} = \min\{14.77; 2.5\} = 2.5;$$

$$k_{\text{int}} = \min\{1.4 \cdot 100 / 17 - 1.7; 2.5\} = \min\{6.53; 2.5\} = 2.5;$$

Prendendo ad esempio il bullone n.1, essendo esso di bordo, si avrà:

$$F_{b,Rd} = k_{\text{bordo}} \cdot \alpha_{\text{bordo}} \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t / \gamma_{M2} = 1 \cdot 2.5 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 15 / 1.25 = 206400 \text{ N}$$

Il bullone n.5 pur essendo interno esibirà la seguente resistenza:

$$F_{b,Rd} = k_{\text{int}} \cdot \alpha_{\text{int}} \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t / \gamma_{M2} = 1 \cdot 2.5 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 15 / 1.25 = 206400 \text{ N};$$

Vista la geometria in gioco i valori si ripeteranno identici anche nella direzione Y (vedi report relazione), anche se il calcolo esegue ogni verifica distinta per bullone, assegnando alle formule quanto di competenza al bullone in questione.

Valori rifollamento	z mm	y mm	Fb,rd,z kN	Fb,rd,y kN	FS,z	FS,y
bullone n.1	75	100	206.4	206.4	156.43	31.62
bullone n.2	75	300	206.4	206.4	27.27	31.62
bullone n.3	175	100	206.4	206.4	156.43	99.07
bullone n.4	175	300	206.4	206.4	27.27	99.07
bullone n.5	325	100	206.4	206.4	156.43	45.03
bullone n.6	325	300	206.4	206.4	27.27	45.03
bullone n.7	425	100	206.4	206.4	156.43	22.86
bullone n.8	425	300	206.4	206.4	27.27	22.86

La verifica a rifollamento di ogni bullone terrà in considerazione entrambe le direzioni ed elaborerà un fattore di sicurezza finale a rifollamento uguale al minore tra quelli nelle due direzioni.

La resistenza complessiva della singola unione a trazione sarà poi ottenuta come la minore tra la resistenza a trazione e la resistenza a punzonamento degli elementi di connessione. (NTC 2008 - §4.2.8.1.1).

$$\text{Resistenza Trazione} = \min [F_{t,rd}, B_{p,rd}] = \min [78.17; 251.47] = 78.17 \text{ kN}$$

La resistenza complessiva della singola unione a taglio sarà ottenuta come la minore tra la resistenza a taglio e la resistenza a rifollamento degli elementi di connessione. (NTC 2008 - §4.2.8.1.1). Essendo tuttavia la trattazione della resistenza a taglio condotta con la sollecitazione composta, mentre la resistenza a rifollamento condotta con le sollecitazioni scomposte nelle due direzioni, si farà riferimento ai fattori di sicurezza ricavati nelle rispettive verifiche.

La procedura infatti si ricaverà la casistica in cui viene esibito il minore fattore di sicurezza e questo diventerà il fattore di sicurezza complessivo della singola unione a taglio (FS Tag (2)).

Sempre relativamente ai bulloni della prima riga infatti avremo:

BULLONE n.1:

VERIFICA TAGLIO BULLONE

$$\text{Resistenza Taglio Bullone} = \text{RES Tag,b} = 60.288 \text{ kN}$$

$$\text{Azione Taglio Bullone} = \text{Taglio,b} = 6.65979 \text{ kN}$$

$$\text{FS Taglio Bullone} = \text{FS Tag,b(1)} = 9.05$$

VERIFICA COMPLESSIVA SINGOLA UNIONE

$$\text{FS Resistenza Taglio} = \text{FS Tag (2)} =$$

$$\min [\text{FS Fv,rd}; \text{FS Fb,rd,y}; \text{FS Fb,rd,z}] = \min [9.05; 31.62; 156.43] = 9.05$$

BULLONE n.2:

VERIFICA TAGLIO BULLONE

$$\text{Resistenza Taglio Bullone} = \text{RES Tag,b} = 60.288 \text{ kN}$$

$$\text{Azione Taglio Bullone} = \text{Taglio,b} = 9.99542 \text{ kN}$$

$$\text{FS Taglio Bullone} = \text{FS Tag,b(1)} = 6.03$$

VERIFICA COMPLESSIVA SINGOLA UNIONE

FS Resistenza Taglio= FS Tag (2)=

$$\min [FS F_{v,Rd}; FS F_{b,Rd,y}; FS F_{b,Rd,z}] = \min [6.03; 31.62; 27.27] = 6.03$$

Verifiche	Traz kN	Res Traz kN	FS Traz	Taglio,b kN	Res Tag,b kN	FS Tag,b(1)	FS Tag(2)	Coeff 4.2.65
bullone n.1	71.50386	78.17065	1.09*	6.65979	60.288	9.05	9.05	0.76
bullone n.2	71.50386	78.17065	1.09*	9.99542	60.288	6.03	6.03	0.82*
bullone n.3	21.648	90.432	4.18	2.46601	60.288	24.45	24.45	0.21
bullone n.4	21.648	90.432	4.18	7.85091	60.288	7.68	7.68	0.3
bullone n.5	3.5273	19.07587	5.41	4.76947	60.288	12.64	12.64	0.21
bullone n.6	3.5273	19.07587	5.41	8.84892	60.288	6.81	6.81	0.28
bullone n.7	0	0	-	9.12369	60.288	6.61	6.61	0.15
bullone n.8	0	0	-	11.78122	60.288	5.12	5.12*	0.2

I risultati **CONFERMANO I VALORI RIPORTATI IN RELAZIONE.**

Anche nel calcolo del coefficiente dell'eq.4.2.65, la procedura terrà conto dei 3 valori ricavati nel calcolo della resistenza complessiva della singola unione a taglio.

Nella formula:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}}$$

il rapporto $F_{v,Ed}/F_{v,Rd}$ verrà eseguito nel caso in cui il valore venga massimizzato e quindi nel caso in cui il fattore di sicurezza venga minimizzato, già ricavato nelle verifiche precedenti.

CONTROLLO DISTANZE E POSIZIONI

Il controllo delle distanze e delle posizioni dei vari bulloni farà riferimento a quanto prescritto per l'acciaio da NTC 2008 alla Tab.4.2.XIII, dove, come mostrato nello schema grafico di riferimento, vanno le distanze e_1 e e_2 in p_1 e p_2 .

I rispettivi valori di controllo per ogni distanza, relativamente alla direzione z (Figura 4.2.3 di NTC 2008), risultano:

Controllo p_1

$$p_{1 \min} = 2.2 \cdot d_0 = 37.4 \text{ mm};$$

$$p_{1 \max} = (\text{Unioni esposte a fenomeni corrosivi}) = \min\{14 \cdot 15; 200\} = 200 \text{ mm};$$

Essendo p_1 al lembo superiore pari a $=200\text{mm}$, la VERIFICA RISULTA SODDISFATTA
come pure:

Essendo p_1 al lembo inferiore pari a $=200\text{mm}$, la VERIFICA RISULTA SODDISFATTA

Controllo p_2

$$p_{2 \min} = 2.4 \cdot d_0 = 40.8 \text{ mm};$$

$$p_{2 \max} = (\text{Unioni esposte a fenomeni corrosivi}) = \min\{14 \cdot 15; 200\} = 200 \text{ mm};$$

Essendo p_2 al lembo superiore pari a $=100\text{mm}$, la VERIFICA RISULTA SODDISFATTA
come pure:

Essendo p_2 al lembo inferiore pari a $=100\text{mm}$, la VERIFICA RISULTA SODDISFATTA

Riferendosi alla direzione z :

Controllo e_1

$$e_{1 \min} = 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 17 = 20.4 \text{ mm};$$

$$e_{1 \max} = (\text{Unioni esposte a fenomeni corrosivi}) = 4 \cdot t + 40 = 100\text{mm}$$

, essendo $e_1 = 75\text{mm}$ (dal calcolo geometrico della piastra), la VERIFICA RISULTA SODDISFATTA

Controllo e_2

$$e_{2 \min} = 1.2 \cdot d_0 = 1.2 \cdot 17 = 20.4 \text{ mm};$$

$$e_{1 \max} = (\text{Unioni esposte a fenomeni corrosivi}) = 4 \cdot t + 40 = 100 \text{ mm}$$

Essendo $e_2 = 50 \text{ mm}$ (dal calcolo geometrico della piastra), la VERIFICA RISULTA SODDISFATTA

Stesso discorso andrà fatto per i valori presi considerando l'azione presa in direzione Y, secondo lo schema di Figura 4.2.3 di NTC 2008.

I risultati **CONFERMANO I VALORI RIPORTATI IN RELAZIONE:**

Controllo posizioni e distanze bulloni (NTC 2008 Tab.4.2.XIII)

Controllo e1

Controllo e2

Controllo p1

Controllo p2