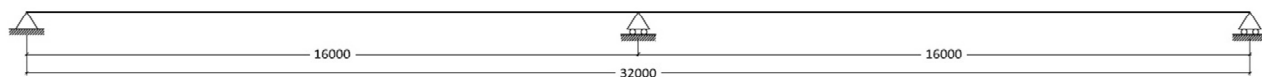


## 1. PREMESSA E PRESENTAZIONE DELLA STRUTTURA

L'oggetto dell'esercitazione è la progettazione strutturale di una passerella pedonale realizzata in acciaio, sita in Lucca. Il camminamento pedonale ha una larghezza utile di 2.00 m e la struttura è composta da due campate, entrambe di 16.00 m di luce, per un totale di 32.00 m di lunghezza.



Si è deciso di realizzare una travatura reticolare formata da elementi tubolari circolari saldati. La struttura è composta da due travature reticolari piane verticali parallele di tipo Pratt (montanti compressi e diagonali tesi) di altezza 1.40 m, distanziate tra loro di 2.40 m, unite reciprocamente da:

- traversi al livello del corrente inferiore;
- travatura reticolare piana orizzontale tipo Warren e traversi (sui quali appoggia la struttura di impalcato e i parapetti) al livello del corrente superiore.

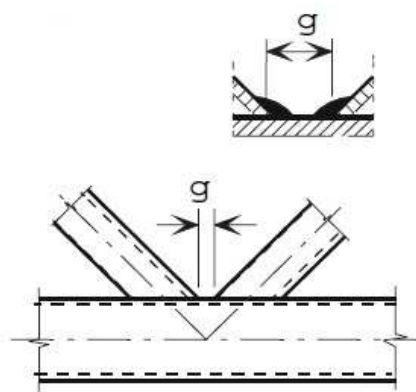
Il dimensionamento e la verifica sono stati eseguiti secondo le prescrizioni della Normativa NTC 2008. Per l'analisi dei collegamenti saldati tra i profili tubolari si è invece fatto riferimento alla normativa specialistica UNI EN 1993-1-8:2005.

Si riportano nel seguito, a titolo di esempio, le verifiche di due tipologie di giunti.

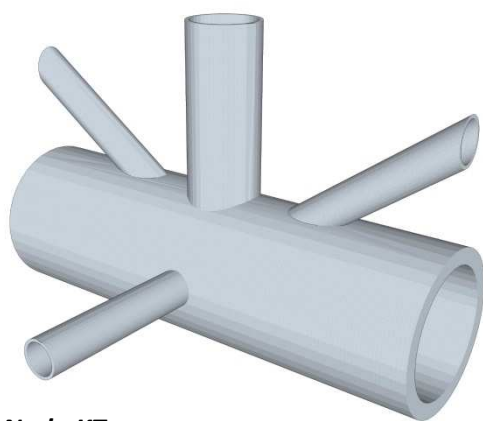
## 2. NODO TRAVATURA RETICOLARE

Premessa: si riportano brevemente le limitazioni geometriche imposte dalla UNI EN 1993-1-8:2005 sui profili metallici:

- Tutti gli elementi devono appartenere alle classi 1 o 2;
- Spessore minimo degli elementi tubolari non inferiore a 2.5 mm, mentre quello massimo deve essere limitato a 25.0 mm; questo secondo limite è finalizzato a garantire un'adeguata distribuzione delle tensioni all'interno dello spessore del tubo e ovviare anche ai problemi di strappo lamellare a seguito della saldatura di elementi ortogonali al tubo;
- L'angolo tra elementi di parete (diagonali) e correnti non può scendere al di sotto dei 30°;
- Il gap "g", indicato in figura, non deve essere inferiore alla somma degli spessori degli elementi in esso convergenti, cioè  $g \geq t_1 + t_2$



Inoltre, per elementi con sezione circolare, in funzione delle diverse tipologie di nodo (vedi tabella a fianco), l'EN 1993 – 1 – 8 propone altre limitazioni geometriche:



**Nodo KT**

Elemento	Tipologia di giunto	Classe	Prescrizione
Corrente	X	1 o 2	$10 \leq d_0 / t_0 \leq 40$
	Per le altre tipologie		$10 \leq d_0 / t_0 \leq 50$
Asta di parete	–	1 o 2	$10 \leq d_{ij} / t_{ij} \leq 50$ $0.2 \leq d_{ij} / d_0 \leq 1$

Il collegamento in figura viene analizzato secondo due piani distinti e indipendenti:

- Nodo KT, relativo al piano longitudinale;
- Nodo a T, relativo al piano orizzontale.

Nella trattazione non si tiene conto dell'interazione tra i due collegamenti.

Elemento	Sezione [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	J [mm <sup>4</sup> ]	f <sub>yk</sub> [MPa]
Corrente	Φ190/19	10207	37768580	355
Montante	Φ88.9/4.5	1193	1065449	355
Diagonali	Φ44.5/3.2	415	89055	355

### Azioni:

N <sub>01,Ed</sub> = 212 kN	(trazione)
N <sub>02,Ed</sub> = 256 kN	(trazione)
N <sub>1,Ed</sub> = 49 kN	(trazione)
N <sub>2,Ed</sub> = 5 kN	(compr.)
N <sub>3,Ed</sub> = 24 kN	(compr.)

Verifica tensionale corrente

$$N_{p,Ed} = N_{01,Ed} = N_{02,Ed} - \sum N_i \cdot \cos \theta_i = 256.000 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} = \frac{256000}{10207} = 25.081 \text{ MPa}$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.2.1 ... (7.2)]

Calcolo parametri geometrici

$$\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3 \cdot d_0} = 0.312 \quad [\text{EN 1993-1-8 cap. 1.5 ... (6)}]$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2 \cdot t_0} = 5.00 \quad [\text{EN 1993-1-8 cap. 1.5 ... (6)}]$$

$$f_{y0} = f_{yk}(\text{acciaio S355}) = 355 \text{ MPa} \quad [\text{EN 1993-1-8 cap. 1.5 ... (3)}]$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0} \cdot \gamma_{M5}} = \frac{25.081}{355 \cdot 1} = 0.071 \quad [\text{EN 1993-1-8 cap. 1.5 ... (5)}]$$

$$k_p = 1 - 0.3 \cdot n_p \cdot (1 + n_p) = 1 - 0.3 \cdot 0.071 \cdot (1 + 0.071) = 0.977 < 1$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

$$k_g = \gamma^{0.2} \cdot \left[ 1 + \frac{0.024 \cdot \gamma^{1.2}}{1 + \exp(0.5 \cdot \frac{194}{t_0} - 1.33)} \right] = 5^{0.2} \cdot \left[ 1 + \frac{0.024 \cdot 5^{1.2}}{1 + \exp(0.5 \cdot \frac{194}{19} - 1.33)} \right] = 1.385$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

Verifica a collasso della faccia del corrente

$$N_{1,Rd} = N_{2,Rd} = k_g \cdot k_p \cdot \frac{f_{y0}}{\gamma_{M5}} \cdot \frac{t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \left( 1.8 + 10.2 \cdot \frac{d_1}{d_0} \right) = 1.385 \cdot 0.977 \cdot \frac{355}{1} \cdot \frac{19.0^2}{\sin 35^\circ} \cdot \left( 1.8 + 10.2 \cdot \frac{3.2}{19.0} \right) = 1266.728 \text{ kN}$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

$$N_{3,Rd} = k_g \cdot k_p \cdot \frac{f_{y0}}{\gamma_{M5}} \cdot \frac{t_0^2}{\sin \theta_3} \cdot \left( 1.8 + 10.2 \cdot \frac{d_3}{d_0} \right) = 1.385 \cdot 0.977 \cdot \frac{355}{1} \cdot \frac{19.0^2}{\sin 90^\circ} \cdot \left( 1.8 + 10.2 \cdot \frac{4.5}{19.0} \right) = 1139.993 \text{ kN}$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

Verifica a collasso per punzonamento (Da effettuare se  $d_i < d_0 - 2 \cdot t_0$ )

$$[d_1 = d_2 = 44.5] < [d_0 - 2 \cdot t_0 = 190.0 - 2 \cdot 19.0 = 152.0]$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

$$N_{1,Rd} = N_{2,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5}} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \cdot (\sin \theta_1)^2} = \frac{355}{\sqrt{3} \cdot 1} \cdot 19.0 \cdot \pi \cdot 44.5 \cdot \frac{1 + \sin 35^\circ}{2 \cdot (\sin 35^\circ)^2} = 1301.986 \text{ kN}$$

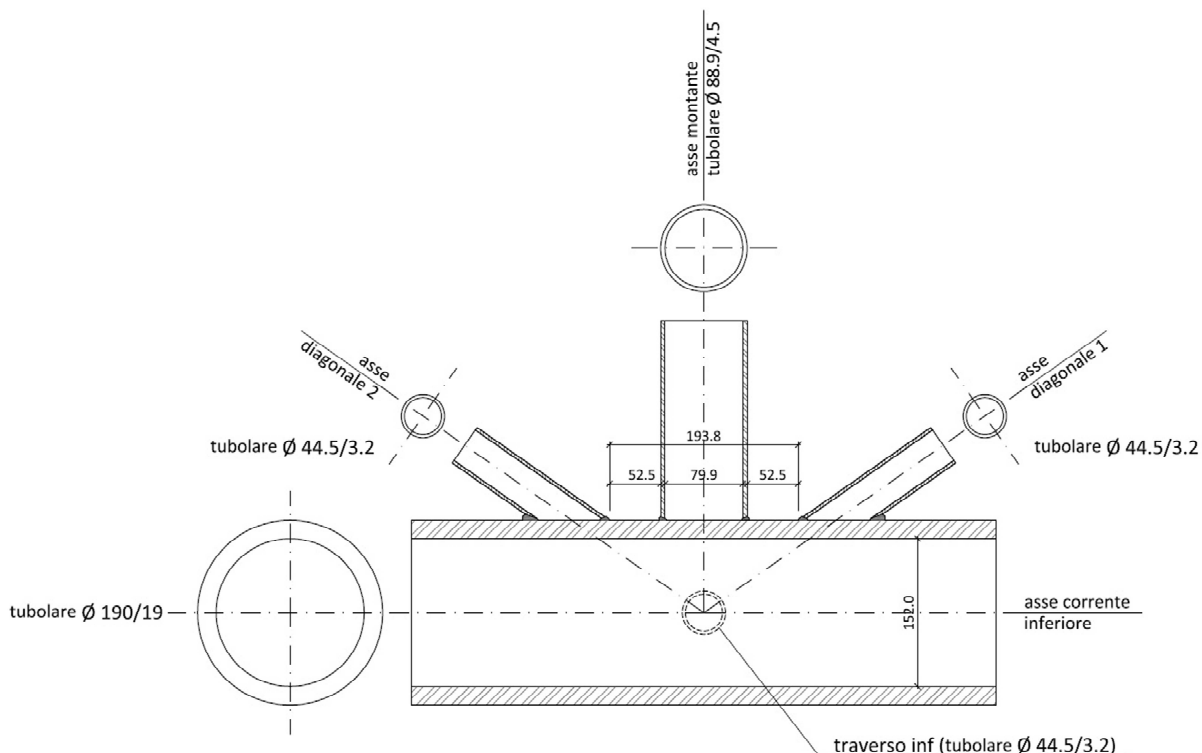
[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

$$[d_3 = 88.9] < [d_0 - 2 \cdot t_0 = 190.0 - 2 \cdot 19.0 = 152.0]$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

$$N_{3,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5}} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \frac{1 + \sin \theta_3}{2 \cdot (\sin \theta_3)^2} = \frac{355}{\sqrt{3} \cdot 1} \cdot 19.0 \cdot \pi \cdot 88.9 \cdot \frac{1 + \sin 90^\circ}{2 \cdot (\sin 90^\circ)^2} = 1087.609 \text{ kN}$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]



Verifica del nodo

$$N_{1,Rd} = N_{2,Rd} = \min\{N_{1,Rd, \text{collasso corrente}}; N_{1,Rd, \text{collasso per punzonamento}}\} = 1266.728 \text{ kN}$$

$$N_{3,Rd} = \min\{N_{3,Rd, \text{collasso corrente}}; N_{3,Rd, \text{collasso per punzonamento}}\} = 1087.609 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{49}{1266.728} = 0.039 < 1$$

$$\frac{|N_{2,Ed}|}{N_{2,Rd}} = \frac{5}{1266.728} = 0.004 < 1$$

$$\frac{|N_{3,Ed}|}{N_{3,Rd}} = \frac{24}{1087.609} = 0.022 < 1$$

$$[N_{1,Ed} \cdot \sin(\theta_1) + N_{3,Ed} \cdot \sin(\theta_3) = 49 \cdot \sin(35) + 24 \cdot \sin(90) = 52.105 \text{ kN}]$$

$$\leq [N_{1,Rd} \cdot \sin(\theta_1) = 1266.728 \cdot \sin(35) = 726.565 \text{ kN}]$$

$$[N_{2,Ed} \cdot \sin(\theta_2) = 5 \cdot \sin(35) = 2.868 \text{ kN}] \leq [N_{1,Rd} \cdot \sin(\theta_1) = 1266.728 \cdot \sin(35) = 726.565 \text{ kN}]$$

Nodo T

Elemento	Sezione [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	J [mm <sup>4</sup> ]	f <sub>yk</sub> [MPa]
Corrente	Φ190/19	10207	37768580	355
Traverso	Φ44.5/3.2	415	89055	355

Azioni:

$$N_{01,Ed} = 212 \text{ kN} \quad (\text{trazione})$$

$$N_{02,Ed} = 256 \text{ kN} \quad (\text{trazione})$$

$$N_{4,Ed} = -2 \text{ kN} \quad (\text{compr.})$$

Verifica tensionale corrente

$$N_{p,Ed} = N_{01,Ed} = N_{02,Ed} - \sum N_i \cdot \cos \theta_i = 256 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} = \frac{256000}{10207} = 25.081 \text{ MPa}$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.2.1 ... (7.2)]

Calcolo parametri geometrici

$$\beta = \frac{d_4}{d_0} = \frac{44.5}{190.0} = 0.234 \quad [\text{EN 1993-1-8 cap. 1.5 ... (6)}]$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2 \cdot t_0} = 5.00 \quad [\text{EN 1993-1-8 cap. 1.5 ... (6)}]$$

$$f_{y0} = f_{yk} (\text{acciaio S355}) = 355 \text{ MPa} \quad [\text{EN 1993-1-8 cap. 1.5 ... (3)}]$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0} \cdot \gamma_{M5}} = \frac{25.081}{355 \cdot 1} = 0.071 \quad [\text{EN 1993-1-8 cap. 1.5 ... (5)}]$$

$$k_p = 1 - 0.3 \cdot n_p \cdot (1 + n_p) = 1 - 0.3 \cdot 0.071 \cdot (1 + 0.071) = 0.977 < 1$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

Verifica a collasso della faccia del corrente

$$N_{4,Rd} = \gamma^{0.2} \cdot k_p \cdot \frac{f_{y0}}{\gamma_{M5}} \cdot \frac{t_0^2}{\sin \theta_4} \cdot (2.8 + 14.2 \cdot \beta^2) = 5^{0.2} \cdot 0.977 \cdot \frac{355}{1} \cdot \frac{19^2}{\sin 90} \cdot (2.8 + 14.2 \cdot 0.234^2) = 618.464 \text{ kN}$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

Verifica a collasso per punzonamento (Da effettuare se  $d_i < d_0 - 2 \cdot t_0$ )

$$[d_4 = 44.5] < [d_0 - 2 \cdot t_0 = 190.0 - 2 \cdot 19.0 = 152.0]$$

[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

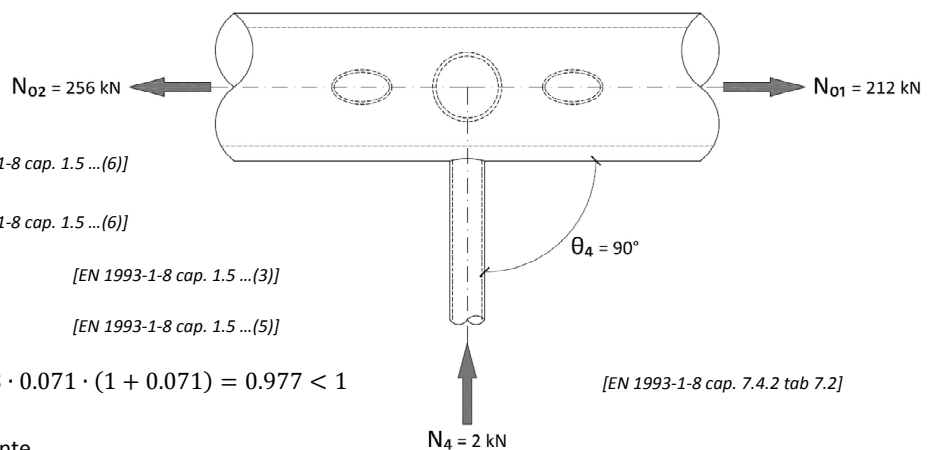
$$N_{4,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5}} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_4 \cdot \frac{1 + \sin \theta_4}{2 \cdot (\sin \theta_4)^2} = \frac{355}{\sqrt{3} \cdot 1} \cdot 19.0 \cdot \pi \cdot 44.5 \cdot \frac{1 + \sin 90}{2 \cdot (\sin 90)^2} = 544.416 \text{ kN}$$

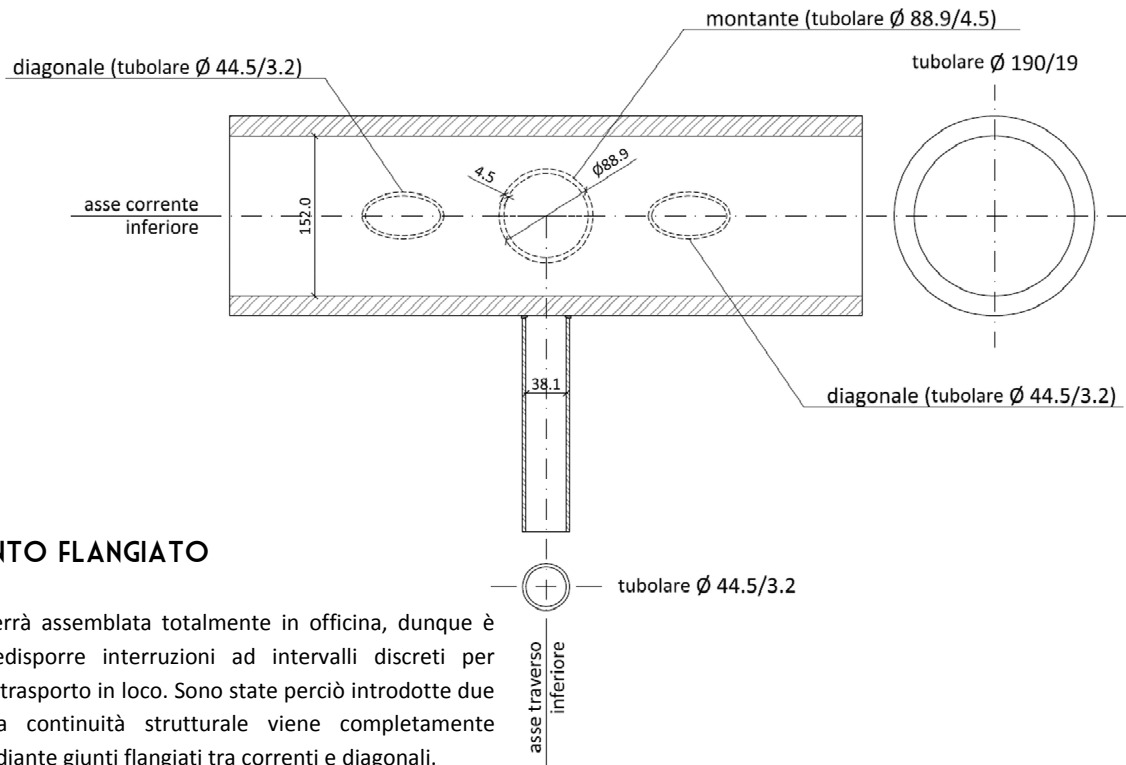
[EN 1993-1-8 cap. 7.4.2 tab 7.2]

Verifica del nodo

$$N_{4,Rd} = \min\{N_{4,Rd, \text{collasso corrente}}; N_{4,Rd, \text{collasso per punzonamento}}\} = 544.416 \text{ kN}$$

$$\frac{|N_{4,Ed}|}{N_{4,Rd}} = \frac{2}{544.416} = 0.004 < 1$$





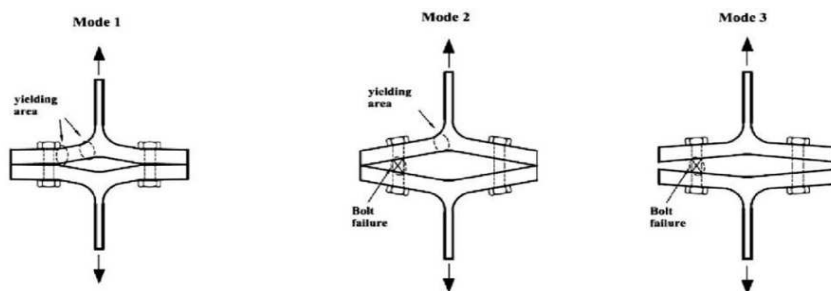
### 3. GIUNTO FLANGIATO

La struttura verrà assemblata totalmente in officina, dunque è necessario predisporre interruzioni ad intervalli discreti per permetterne il trasporto in loco. Sono state perciò introdotte due interruzioni: la continuità strutturale viene completamente ripristinata mediante giunti flangiati tra correnti e diagonali.

I metodi di calcolo e di verifica delle unioni bullonate tra elementi a sezione cava in acciaio non differiscono da quelli tra elementi a sezione aperta e si basano sull'impiego congiunto di relazioni e risultati sperimentali. La resistenza ultima della connessione è valutata sulla base di modelli comportamentali semplificati nell'ipotesi di distribuzione uniforme delle pressioni sui fori e sul gambo dei bulloni.

L'EN 1993 – 1 – 8 considera in generale i seguenti tre modi di collasso plastico:

- Modo 1: completo snervamento della piastra di collegamento;
- Modo 2: crisi dei bulloni con snervamento parziale delle piastre;
- Modo 3: crisi dei bulloni senza deformazioni plastiche della piastra.



Nel caso in esame il giunto collega i correnti inferiori. In particolare esso è costituito da due piastre con diametro esterno di 290 mm e spessore pari a 10 mm. I bulloni adottati sono M16 di classe 8.8.

#### Modo 1: Snervamento completo della piastra

$$r_2 = \frac{D_{bullonatura}}{2} = \frac{240}{2} = 120 \text{ mm}$$

$$\sum l_{eff} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 = 2 \cdot \pi \cdot 120 = 753.98 \text{ mm}$$

$$l_{eff} = \frac{\sum l_{eff}}{n_b} = \frac{753.98}{6} = 125.66 \text{ mm}$$

$$m = \frac{D_{bullonatura} - D_{tubo}}{2} = \frac{240 - 190}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$M_{pl,Rd} = 0.25 \cdot \sum l_{eff} \cdot t_f^2 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0.25 \cdot 753.98 \cdot 10^2 \cdot \frac{355}{1.1} = 6083.25 \text{ Nm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,Rd}}{m} = \frac{4 \cdot 6083.25}{0.025} = 973319.6 \text{ N} = 973.32 \text{ kN}$$

[EN 1993-1-8 cap. 6.2.6.5 tab6.6]

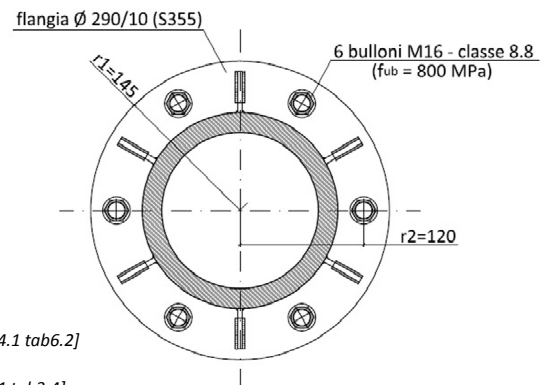
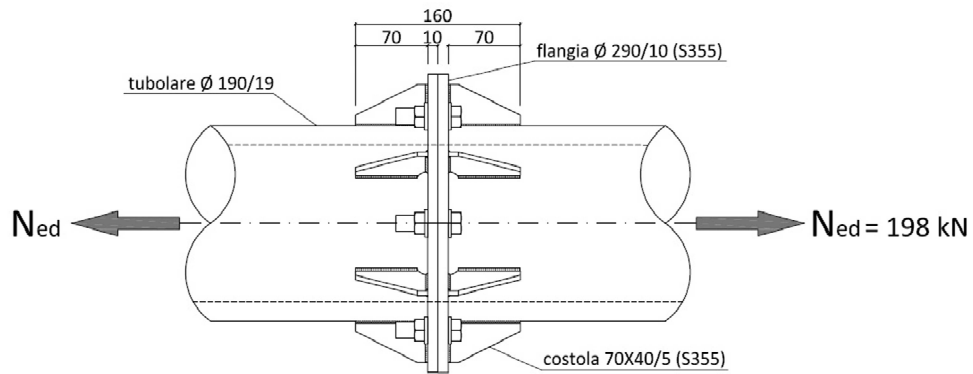
[EN 1993-1-8 cap. 6.2.6.5 tab6.6]

[EN 1993-1-8 cap. 6.2.4.1 fig6.2]

[EN 1993-1-8 cap. 6.2.4.1 tab6.2]

[EN 1993-1-8 cap. 6.2.4.1 tab6.2]

Elemento	Sezione [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	J [mm <sup>4</sup> ]	f <sub>yk</sub> [MPa]
Correnti	Φ190/19	10207	37768580	355
Bullone	M16-cl 8.8	201*	-	800



### **Modo 2: Snervamento completo della piastra e**

#### **crisi dei bulloni**

$$r_1 = \frac{D_{piastra}}{2} = \frac{290}{2} = 145 \text{ mm}$$

$$e_{min} = r_1 - r_2 = 145 - 120 = 25 \text{ mm} \quad [EN 1993-1-8 \text{ cap. 6.2.4.1 fig.6.2}]$$

$$n = \min\{e_{min}; 1.25 \cdot m\} = \min\{25; 1.25 \cdot 25\} = 25 \text{ mm} [EN 1993-1-8 \text{ cap. 6.2.4.1 tab.6.2}]$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 800 \cdot 157}{1.25} = 90432 \text{ N} \quad [EN 1993-1-8 \text{ cap. 3.6.1 tab.3.4}]$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{(2 \cdot M_{pL,Rd}) + (n \cdot n_b \cdot F_{t,Rd})}{m+n} = \frac{(2 \cdot 6083.25) + (0.025 \cdot 6 \cdot 90432)}{0.025 + 0.025} = 514626 \text{ N} = 514.63 \text{ kN} \quad [EN 1993-1-8 \text{ cap. 6.2.4.1 tab.6.2}]$$

### **Modo 3: Crisi dei bulloni**

$$F_{T,3,Rd} = n_b \cdot F_{t,Rd} = 6 \cdot 90432 = 542592 \text{ N} = 542.59 \text{ kN} \quad [EN 1993-1-8 \text{ cap. 6.2.4.1 tab.6.2}]$$

### **Verifica del giunto**

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = 514.63 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{F_{T,Rd}} = \frac{198}{514.63} = 0.385 < 1$$

### **Resistenza a taglio dei bulloni**

La formula seguente valuta la resistenza a taglio del bullone "per ciascun piano di taglio". In questo caso i bulloni hanno un unico piano di taglio.

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot 800 \cdot 157}{1.25} = 60288 \text{ N/bullone} \quad [EN 1993-1-8 \text{ cap. 3.6.1 tab.3.4}]$$

$$V_{v,Rd} = n_b \cdot F_{v,Rd} = 6 \cdot 60288 = 361728 \text{ N} = 361.73 \text{ kN} \gg V_{Ed}$$

### **Resistenza imbutimento flangia**

$$d_m \cong 1.5 \cdot \Phi_{bullone} = 1.5 \cdot 16 = 24 \text{ mm}$$

$$B_{p,Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_f \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot 24 \cdot 7 \cdot 10 \cdot 510}{1.25} = 205340 \text{ N} = 205.34 \text{ kN} \quad [EN 1993-1-8 \text{ cap. 3.6.1 tab.3.4}]$$

$$\frac{N_{Ed}}{n_b} = \frac{198}{6} = 33 \text{ kN} < [B_{p,Rd} = 205.34 \text{ kN}]$$

La saldatura tra la flangia e il tubolare sarà realizzata a "completa penetrazione" in modo da ripristinare la continuità dell'elemento portante.