

RECIPIENTE IN PRESSIONE

E VERIFICA BULLONI



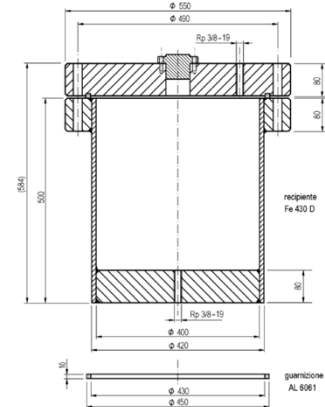
Federico Tarantino

Dati

Pressione di esercizio: $p = 8 \text{ MPa}$

Materiali:

Fe430D	$R_s = 275 \text{ MPa}$
	$E = 206000 \text{ MPa}$
Al6061-T6	$R_s = 145 \text{ MPa}$
	$E = 69000 \text{ MPa}$



1

Verifica di resistenza del mantello cilindrico utilizzando le ipotesi di piccolo spessore

Si esegue una **verifica di resistenza statica** del **mantello del recipiente**. Di esso si considerano:

- parete sottile con rapporto tra diametro interno D e spessore s superiore a 10/15;
- effetti di bordo trascurabili nella zona centrale del mantello.

Si esegue una verifica del rapporto tra diametro interno e spessore del recipiente:

$\frac{D_i}{s} = 40$. Essendo il risultato maggiore di 15, la verifica si può considerare superata.

Si utilizzano poi, le Formule di Mariotte per il calcolo degli sforzi:

- Sforzo circonferenziale: $\sigma_c = \frac{pD_i}{2s} = 160 \text{ MPa}$;
- Sforzo assiale: $\sigma_c = \frac{pD_i}{4s} = 80 \text{ MPa}$;
- Sforzo radiale all'intradosso: $\sigma_r = -8 \text{ MPa}$.

1) Verifica di resistenza all'intradosso:

Si utilizza il Criterio di Guest-Saint Venant-Tresca per calcolare lo sforzo equivalente all'intradosso. Si scrive, quindi:

$$\sigma_{GT}^* = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_\theta - \sigma_r = 168 \text{ MPa}.$$

A questo punto, impostando la disequazione di verifica, è possibile trovare il coefficiente di sicurezza all'intradosso:

$\eta = \frac{R_{sn}}{\sigma_{GT}^*} = 1,63$. La **verifica di resistenza all'intradosso** risulta, quindi, essere stata **superata**.

2) Verifica di resistenza all'estradosso:

Si segue lo stesso iter utilizzato per l'intradosso, applicando il Criterio di Guest-Saint

Venant-Tresca:

$$\sigma_{GT}^* = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_{\theta} - \sigma_r = 160 \text{ MPa},$$

A questo punto, impostando la disequazione di verifica, è possibile trovare il coefficiente di sicurezza all'estradosso:

$\eta = \frac{R_{sn}}{\sigma_{GT}^*} = 1,71$. La **verifica di resistenza** all'**estradosso** risulta, quindi, essere stata **superata**.

2

Dimensionamento dei bulloni di collegamento tra la flangia del mantello e il coperchio

Scelta del numero di bulloni

Come prima cosa si utilizza la formula empirica per il **calcolo del numero di bulloni**. Calcolando, infatti, il diametro medio di guarnizione attraverso le quote ricavabili dal disegno come: $D_{mg} = \frac{450+430}{2} = 440 \text{ mm}$, è possibile applicare la formula:

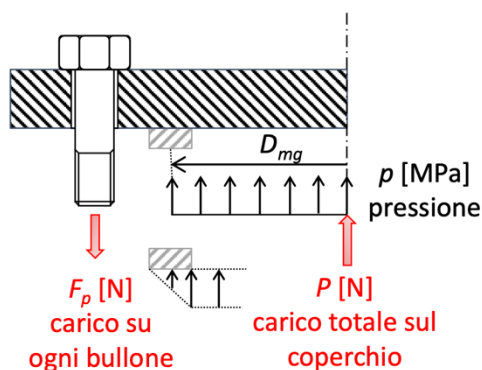
$$n_b = \text{int} \left[\frac{D_{mg}}{40} + 4 \right] = 15.$$

Il numero n_b di bulloni deve essere:

- arrotondato al multiplo di quattro più prossimo per ottenere una simmetria delle azioni di serraggio;
- non troppo basso per garantire una distribuzione uniforme delle pressioni di serraggio sulla flangia;
- non troppo elevato per lasciare lo spazio di manovra necessario all'impegno delle chiavi per il serraggio dei bulloni.

Viste tali considerazioni, il numero di bulloni per l'applicazione è **16**.

Scelta del diametro dei bulloni



Come primo passaggio è necessario trovare il **carico agente su ogni bullone F_p** . Da disegno si ricava un diametro sede fuori bulloni $D_{sf} = 490 \text{ mm}$, con il quale è possibile trovare il perimetro di sede fuori bullone come: $P_{sf} = 2\pi \left(\frac{D_{sf}}{2} \right) = 1539,38 \text{ mm}$. Posto un coefficiente di sicurezza minimo pari a 1,5, si può calcolare il carico totale agente sui bulloni attraverso la

formula:

$$P = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{mg})^2 \cdot \frac{p}{1000} = 1216,42 \text{ kN}.$$

Dividendo questo valore per il numero di bulloni fissato in precedenza, si trova il carico F_p agente su ogni singolo bullone:

$$F_p = \frac{P}{n_b} = 76,02 \text{ kN}.$$

Calcolata la sollecitazione agente su ogni singolo bullone, le due incognite che ci poniamo ora sono il **diametro di nocciolo** e la **classe dei bulloni**.

A partire dalla formula per il calcolo della sollecitazione dovuta alla pressione p , che sappiamo dalla teoria:

$$\sigma_b = \frac{F_{b,0}}{A_{n,bull}} = \frac{1,2F_p}{\frac{\pi(d_n)^2}{4}} = \frac{1,2 \frac{P}{n_b}}{\frac{\pi(d_n)^2}{4}} = \frac{1,2 \frac{\frac{\pi(D_{mg})^2}{4}}{n_b}}{\frac{\pi(d_n)^2}{4}} \leq \sigma_{amm} = \frac{R_{p,0.2}}{\eta}$$

è possibile ricavare il valore del diametro di nocciolo. È necessario prima però **scegliere la classe dei bulloni** in modo da fissare il Carico Unitario di Snervamento, così da poter invertire la formula sopra e ricavare d_n . Si sceglie la classe 8.8:

$$\text{CLASSE 8.8} = \begin{cases} R_m = 8 \cdot 100 = 800 \text{ MPa} \\ R_{p,0.2} = 8 \cdot 8 \cdot 10 = 640 \text{ MPa} \end{cases}$$

Invertendo, quindi, la formula per la verifica dello sforzo dovuto alla pressione si ricava il valore del diametro di nocciolo:

$$d_n = \sqrt{\frac{1,2 \frac{\frac{\pi(D_{mg})^2}{4}}{n_b}}{\frac{R_{p,0.2}}{\eta}}} \cdot \frac{4}{\pi} = 16,5 \text{ mm}, \text{ che corrisponde al diametro di nocciolo minimo.}$$

È possibile calcolare l'area della sezione resistente come: $A_{res} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_m + d_n}{2} \right)^2$, anche se, in via cautelativa, è anche accettabile assumerla pari all'area della sezione di nocciolo.

Ricavato, quindi, il diametro di nocciolo minimo è possibile **scegliere il Bullone ISO più adatto** (che abbia, quindi, un diametro di nocciolo maggiore o uguale a quello calcolato. Si sceglie un bullone **M24**, che ha le seguenti caratteristiche:

- Diametro nominale della vite = 24 mm;
- Passo = 3 mm;
- Diametro medio = 22,051 mm;
- Diametro di nocciolo della vite = 20,319 mm;
- Area della sezione resistente = 353 mm²;
- Area della sezione di nocciolo = 324 mm².

Poiché il diametro di nocciolo del Bullone ISO scelto è maggiore del diametro minimo prima calcolato, la **verifica sul diametro può considerarsi superata**. L'ultima **verifica** che si fa è quella sull'**ingombro dei bulloni**: è, quindi, necessario verificare che il perimetro del bullone scelto sia minore perimetro di sede fuori bullone. Poiché $d_n \cdot n \cdot 3 < P_{sf}$, anche questa verifica **può considerarsi superata** e il **bullone selezionato è corretto**.

3 Calcolo del momento di serraggio dei bulloni (effetto guarnizione)

Fase di serraggio

Si inizia a valutare il **carico di serraggio**, ponendo le condizioni e l'intervallo per la scelta:

- snervamento della guarnizione:

$$V_g = V_0 \geq V_{0,min} = R_{sn,g} \cdot A_g = R_{sn,g} \cdot \frac{\pi D_{mg} b}{n_b};$$
- snervamento del bullone:

$$V_b = V_0 < V_{0,max} = R_{p,0.2} \cdot A_n.$$

Da queste considerazioni, posta una larghezza b della guarnizione pari a 10 mm (ricavabile dal disegno fornito), è possibile ricavare l'area della sezione della guarnizione sfruttando la prima equazione scritta:

$$A_g = \frac{\pi D_{mg} b}{n_b} = 863,93 \text{ mm}^2. \text{ Grazie ad essa si ricava il carico di serraggio minimo}$$

$$V_{0,min}, \text{ pari a: } V_{0,min} = \frac{R_{sn,g} \cdot A_g}{1000} = 92,8 \text{ kN}.$$

Sfruttando, invece, la seconda equazione scritta, si ricava il carico di serraggio

$$\text{massimo: } V_{0,max} = \frac{R_{p,0.2} \cdot A_n}{1000} = 207,36 \text{ kN}.$$

Poiché $V_{0,max} > V_{0,min}$, la verifica della fase di serraggio può considerarsi superata.

La scelta del carico di serraggio ricade sul valore di **126,3 kN**.

Dopo il serraggio, il bullone è sollecitato con un carico V_0 e allungato di una quantità pari a $\Delta l_b = \frac{V_0}{k_b}$, mentre la guarnizione è compressa da V_0 e il suo spessore si riduce di $\Delta l_g = -\frac{V_0}{k_g}$. Per poter eseguire questi calcoli, però, è necessario prima trovare tutti i valori necessari.

- Modulo elastico del materiale del bullone: $E_b = 206000 \text{ MPa}$
- Modulo elastico del materiale della guarnizione: $E_b = 145 \text{ MPa}$
- Area del settore di guarnizione considerato: $A_g = 863,93 \text{ mm}^2$

- Area della sezione della vite tratto non filettato: $A_{bl} = \pi \left(\frac{d_{nom}}{2} \right)^2 = 452,38 \text{ mm}^2$
- Area della sezione di nocciolo della vite: $A_n = 324 \text{ mm}^2$
- Lunghezza totale della vite: $l_b = 164 \text{ mm}$
- Lunghezza del tratto non filettato della vite: $l_{bl} = 109,33 \text{ mm}$
- Lunghezza del tratto filettato della vite: $l_{bf} = 54,66 \text{ mm}$
- Larghezza della guarnizione: $b = 10 \text{ mm}$
- Altezza della guarnizione: $h = 10 \text{ mm}$

Grazie a questi valori si calcolano:

Rigidezza del settore di guarnizione: $k_g = \frac{E_g \cdot A_g}{h} = 5961,17 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$

Rigidezza del bullone: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Tratto filettato: } k_{bf} = \frac{E_b \cdot A_n}{l_{bf}} = 1220,92 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \\ \text{Tratto non filettato: } k_{bl} = \frac{E_b \cdot A_l}{l_{bl}} = 852,36 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \end{array} \right.$

$\rightarrow k_b = \left(\frac{1}{k_{bf}} + \frac{1}{k_{bl}} \right)^{-1} = 501,94 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$

A questo punto è possibile calcolare:

$\Delta l_b = \frac{V_0}{k_b} = 0,18 \text{ mm}$ e $\Delta l_b = \frac{V_0}{k_b} = -0,01 \text{ mm}.$

Condizione di esercizio

Scrivendo le equazioni di equilibrio e congruenza, è possibile ottenere il **carico aggiuntivo sul bullone** e sulla **guarnizione**, proporzionale alla rigidezza:

- Carico aggiuntivo sul bullone: $\Delta V_b = \frac{F_p \cdot k_b}{k_g + k_b} = 5,90 \text{ kN}$;
- Carico aggiuntivo sul settore di guarnizione: $\Delta V_g = \frac{F_p \cdot k_g}{k_g + k_b} = 70,12 \text{ kN}.$

Dopo aver messo in pressione il recipiente, il carico si redistribuisce:

- sul bullone: $V'_b = V_b + \Delta V_b = 98,70 \text{ kN}$;
- sulla guarnizione: $V'_g = V_g - \Delta V_g = 22,67 \text{ kN}.$

Il fine ultimo dei calcoli seguenti è ricavare tutti i dati necessari al calcolo dei parametri per eseguire le **verifiche di resistenza nelle nuove condizioni di esercizio**.

Il primo dato da ricavare è quello del **momento di serraggio M_s** , che deve vincere le forze di attrito. Esso sarà costituito dalla somma di due diversi contributi:

1. M'_s : sulla superficie di contatto dado-lamiera. Posto un coefficiente di attrito $f = 0,15$ e un $D_m = 1,5d_{nom} = 36 \text{ mm}$, è possibile calcolare il momento come:

$$M'_s = V_0 f \frac{D_m}{2} = 250,56 \text{ Nm}$$

2. M''_s : sulle superfici dei filetti (attrito vite-madrevite). Posto d_m il diametro medio della vite, l'angolo di avvolgimento dell'elica $\alpha = \arctan\left(\frac{p}{\pi \cdot d_m}\right) = 0,039 \text{ rad}$, $\vartheta = 30^\circ$ e l'angolo di attrito pari a $\varphi^* = \arctan(f^*) = \arctan\left(\frac{f}{\cos(\vartheta)}\right) = 0,171 \text{ rad}$, si calcola il momento come:

$$M''_s = V_0 \frac{d_m}{2} \tan(\alpha + \varphi^*) = 219,44 \text{ Nm}$$

Il momento di serraggio risultante è, quindi:

$$M_s = M'_s + M''_s = 470 \text{ Nm}$$

L'ultimo dato da calcolare è relativo all'**angolo di inflessione totale**: anch'esso sarà dato dalla somma di due contributi, cioè l'angolo di inflessione della flangia e l'angolo di inflessione del coperchio. Per il calcolo del primo sono richiesti due dati preliminari:

- 1) il sistema continuo di momenti torcenti (coppie) uniformemente distribuiti corrispondenti a tanti momenti delle coppie concentrate quanti sono i bulloni, che si calcola come:

$$m = \frac{n_b V_b e}{\pi D_{mf}} = 26,45 \text{ Nm}$$

- 2) il momento d'inerzia della flangia, che si trova con la formula:

$$J_f = \frac{b_f h_f^3}{12} = 3200000 \text{ mm}^4$$

A questo punto, chiamati D_{mf} il diametro medio della flangia ed e l'eccentricità tra forza su bullone e guarnizione, si calcola l'angolo di inflessione della flangia:

$$\theta_{flangia} = \frac{m D_{mf}^2}{4 E J_f} = 0,0022 \text{ rad}$$

Il secondo contributo è dato dall'angolo di inflessione del coperchio, che può essere ipotizzato pari alla metà di quello della flangia, quindi:

$$\theta_{coperchio} \cong 0,5 \theta_{flangia} = 0,0011 \text{ rad}$$

Quindi, l'angolo di inflessione totale è:

$$\theta_{totale} = \theta_{flangia} + \theta_{coperchio} = 0,0033 \text{ rad}$$

Avendo calcolato tutti i parametri necessari, è ora possibile andare a verificare le nuove condizioni di esercizio. Calcolando il valore di $F_{p,min} = 2,5 \cdot p \cdot A_g = 17,27 \text{ kN}$, è possibile eseguire le due seguenti verifiche:

1) **Verifica della tenuta di guarnizione:** $V'_g = V_0 - \Delta V_g \geq F_{p,min}$. Poiché V'_g risulta essere maggiore di $F_{p,min}$, la verifica può considerarsi superata;

2) **Verifica della resistenza del bullone:** per questa seconda verifica è necessario considerare tutte le componenti di sforzo in gioco. Si calcolano quindi:

- componente di sforzo assiale del bullone: $\sigma_a = \frac{V'_b}{A_n} = 304,64 \text{ MPa}$;
- componente di sforzo torsionale del bullone: $\tau_{max} = \frac{16 \cdot M''_s}{\pi \cdot (d_n)^3} = 133,22 \text{ MPa}$;
- componente di sforzo flessionale del bullone: $\sigma_f = \frac{\theta_{tot} \cdot E \cdot d_n}{2 \cdot l_b} = 43,33 \text{ MPa}$.

Lo sforzo equivalente di von Mises del bullone si trova, quindi, come:

$$\sigma_{VM,b}^* = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_f)^2 + 3(\tau_{max})^2} = 417,53 \text{ MPa}$$

Utilizzando come valore di $R_{p,0.2}$ quello relativo alla classe di bulloni scelta (M24), è possibile impostare la disuguaglianza per la verifica di resistenza statica:

$$\sigma_{VM,b}^* \leq \frac{R_{p,0.2}}{\eta}, \text{ con cui si calcola il } \underline{\text{coefficiente di sicurezza}} \eta = \frac{R_{p,0.2}}{\sigma_{VM,b}^*} = 1,53 .$$

Essendo il coefficiente di sicurezza maggiore del valore minimo, pari a 1,5, la **verifica di resistenza statica dei bulloni** si può considerare **superata**.