

Volume 3 – Capitolo 10

Recipienti in pressione

1. Calcolo di resistenza di cilindri in pressione

1.1 Recipienti cilindrici di piccolo spessore

Un **recipiente in pressione** è progettato per contenere gas o liquidi a pressione diversa, solitamente più elevata, da quella esterna. Alcuni esempi di recipienti in pressione sono: serbatoi, polmoni smorzatori per compressori alternativi, colonne di distillazione nella petrolchimica.

Il recipiente va progettato per resistere allo stato di tensione conseguente alla differenza di pressione, senza sollecitazioni che possano portare a perdite, rotture e pericoli per persone e cose. Oltre alla pressione va tenuta in considerazione la temperatura di esercizio, che può influenzare le proprietà meccaniche del materiale e provocare deformazioni permanenti (scorrimento a caldo).

La tipologia del fluido a contatto con il recipiente può essere influente in caso di rischio di attacco chimico al materiale del recipiente, con conseguenti fenomeni di corrosione o di fragilizzazione. Variazioni cicliche della pressione e della temperatura possono ridurre la durata del recipiente per una sollecitazione a fatica.

In un tubo di diametro interno D e spessore s , con pressione interna p , se lo spessore è piccolo rispetto al raggio di curvatura (inferiore a 7-10% del diametro) e non vi sono discontinuità, come brusche piegature, le tensioni si possono calcolare con buona approssimazione trascurando la flessione della parete del serbatoio, supponendo cioè che le tensioni di trazione sulle pareti siano costanti attraverso lo spessore in direzione circonferenziale:

$$\sigma_c = p \cdot D / 2 \cdot s$$

Nella parte cilindrica dei recipienti in pressione è presente anche la sollecitazione assiale, di direzione parallela all'asse del cilindro:

$$\sigma_a = p \cdot D / 4 \cdot s$$

Per i recipienti in pressione le sollecitazioni ammissibili sono ricavabili da appositi regolamenti; il Boiler & Pressure Vessel Code dell'ASME prevede, nel caso si utilizzino i comuni acciai da costruzione, che la tensione ammissibile sia la minore tra:

- 1/4 della tensione di rottura a trazione alla temperatura di lavoro;
- 5/8 della tensione di snervamento a trazione alla temperatura di lavoro;
- la tensione che produce l'1% di *creep* in 100000 ore alla temperatura di lavoro;
- l'80% della tensione che provoca rottura al termine delle 100000 ore alla temperatura di lavoro.

Per i recipienti che lavorano a temperatura ambiente, ci si può riferire alla sola tensione di snervamento utilizzando un coefficiente di sicurezza pari a 1,5.

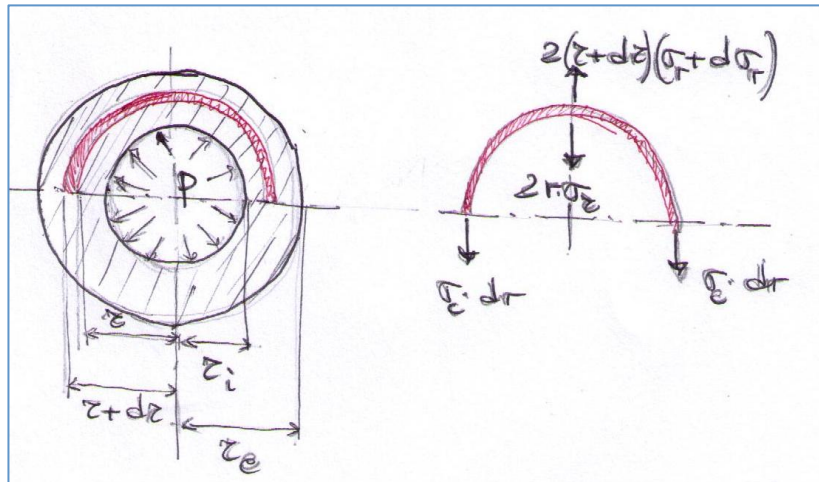
Le sollecitazioni nei fondi dei recipienti dipendono dalla loro conformazione; per fondi sferici lo stato di sollecitazione è biassiale con tensioni principali σ_1 e σ_2 :

$$\sigma_1 = \sigma_2 = p \cdot D / 4 \cdot s$$

1.2 Recipienti cilindrici di grande spessore

In caso di grande spessore deve essere presa in considerazione la variazione della tensione circonferenziale σ_c lungo il raggio. Inoltre non possono essere trascurate le sollecitazioni radiali σ_r ; nel caso di pressione interna, si ha:

- all'interno $\sigma_r = -p$
- all'esterno $\sigma_r = 0$.



All'interno di un cilindro soggetto a pressione interna (in figura) si considera l'equilibrio di un semianello di spessore infinitesimo dr ; trattandosi di un problema iperstatico, si considerano anche le deformazioni supponendo che quelle assiali siano costanti al variare del raggio. Si realizza quindi uno stato di deformazione piano: la deformazione è radiale, simmetrica rispetto all'asse del cilindro.

Con procedimenti matematici si ottengono le **formule di Lamè** per calcolare la sollecitazione radiale e quella circonferenziale in funzione della distanza r dall'asse:

$$\sigma_r = p \frac{r_i^2 r_e^2 - r_i^2}{r^2} \frac{1 - r_e^2}{1 + r_e^2}$$

$$\sigma_c = p \frac{r_i^2 r_e^2 - r_i^2}{r^2} \frac{1 + r_e^2}{1 + r_e^2}$$

La tensione varia con andamento parabolico nello spessore del recipiente e la regione più sollecitata è quella interna, a contatto con il fluido. La tensione circonferenziale σ_c risulta sempre positiva e massima all'interno; quella radiale σ_r risulta sempre negativa e minima all'interno.

La sollecitazione assiale è costante e di valore intermedio fra σ_c e σ_r :

$$\sigma_r = p \frac{r_i^2 r_e^2 - r_i^2}{r^2}$$

Quando la pressione interna è molto elevata può risultare conveniente ricorrere a **cilindri multistrato**, ottenuti forzando uno dentro l'altro due o più cilindri, montati con interferenza. Dopo l'accoppiamento a caldo, il raffreddamento tende a riportare il cilindro esterno alle dimensioni originarie, comprimendo quindi il cilindro interno. Lo stato di tensione dovuto alla compressione è opposto a quello indotto dal fluido in pressione durante l'esercizio e migliora la resistenza del recipiente.

Nel caso di fluidi chimicamente aggressivi l'uso di materiali speciali può

essere limitato al solo strato interno.

Lo stesso principio vale per i **recipienti fasciati**: sulla parete esterna sono avvolti e fissati a caldo alcuni nastri; a seguito del raffreddamento si genera uno stato di compressione utile per la resistenza del cilindro alla pressione interna del fluido.

In alternativa, per limitare lo spessore di un cilindro soggetto a grande pressione interna si può sottoporre il cilindro ad una sovrappressione tale da provocare lo snervamento per trazione al bordo interno; a causa della plasticizzazione nel materiale permane uno stato di tensione anche quando è stata eliminata la pressione. Questo stato di tensione residua è utile perché si oppone a quello dovuto alla pressione interna, migliorando quindi la resistenza del recipiente.

2. NORMATIVA PER APPARECCHIATURE IN PRESSIONE

La riorganizzazione normativa del settore delle apparecchiature in pressione è avvenuta a livello europeo nel 1997 attraverso la **Direttiva PED** (*Pressure Equipment Directive*) relativa alla progettazione, fabbricazione e valutazione di conformità delle attrezzature ed insiemi sottoposti ad una pressione relativa maggiore di 0,5 bar. Il rispetto della normativa PED è condizione per la libera circolazione delle attrezzature in pressione all'interno dell'Unione Europea.

In Italia il contenuto della Direttiva PED è stato recepito con il Decreto Legislativo n.93 del 25/2/2000, la cui applicazione è divenuta obbligatoria dal 29/5/ 2002.

Sono considerate **attrezzature a pressione**: *“recipienti, tubazioni, accessori di sicurezza e accessori a pressione ivi compresi gli elementi annessi a parti pressurizzate quali flange, raccordi, manicotti, supporti e alette mobili”*. Vanno inoltre considerati gli **insiemi** definiti come *“varie attrezzature a pressione montate da un fabbricante per costituire un tutto integrato e funzionale”*.

Rientrano tra le apparecchiature in pressione soggette alla PED:

- i recipienti progettati e costruiti per contenere fluidi pressurizzati, quali compressori, autoclavi, condensatori, recipienti a gas o a vapore, reattori, scambiatori, ecc.
- tubazioni destinate al trasporto dei fluidi e i relativi componenti, quali giunti di smontaggio, giunti di dilatazione, flange, raccordi, ecc.;
- accessori in pressione, come valvole idrauliche, saracinesche, valvole a farfalla, sfiati, valvole di non ritorno, ecc;
- accessori di sicurezza, destinati a proteggere le attrezzature da sovrappressioni che comportino il superamento dei limiti ammissibili.

Dalla direttiva sono escluse tutte le apparecchiature per cui la pressione non costituisce un fattore di rischio, oltre a pompe, compressori, turbine, motori a combustione interna e a quelle già coperte da altre direttive di prodotto (direttiva sui recipienti semplici a pressione, Direttiva Macchine, Bassa Tensione, Ascensori, etc.). Sono escluse anche *“le condotte comprendenti una tubazione o un sistema di tubazioni per il trasporto di qualsiasi fluido o sostanza da o verso un impianto, in mare aperto o sulla terra ferma, a partire dall'ultimo organo di isolamento situato nel perimetro dell'impianto...”*.

Gli apparecchi a pressione sono classificati in quattro **categorie di rischio** in base a:

- tipologia (recipiente a pressione, generatore di vapore, tubazioni)
- energia contenuta sotto forma di pressione
- volume
- fluido utilizzato.

Definita la categoria, vengono proposte differenti procedure con cui il fabbricante può affrontare la valutazione di conformità ai requisiti essenziali di sicurezza contemplati nella direttiva.

Gli aspetti tecnico-progettuali sono trattati nei primi tre allegati, che riguardano:

- la definizione dei Requisiti Essenziali di Sicurezza (progettazione, costruzione, materiali impiegati e verifiche finali)
- le tavole di classificazione in categorie di rischio
- le procedure di valutazione della conformità.

Come tutte le direttive di prodotto, anche la PED stabilisce i requisiti minimi di sicurezza che le apparecchiature a pressione devono garantire, ma demanda alle **norme tecniche armonizzate** il compito di fornire informazioni utili su come raggiungerli; esse costituiscono le linee guida per la progettazione.

I principali gruppi di norme tecniche armonizzate in materia di attrezzature a pressione sono:

EN13445 “Unfired pressure vessels” (CEN/TC/54)

EN 13480 “Metallic industrial piping” (CEN/TC/267)

EN 12952 “Water-tub boilers and auxiliary installations” (CEN/TC/269)

EN 12953 “Shell boilers” (CEN/TC/269)

Oltre alle norme tecniche, nel campo delle apparecchiature a pressione merita attenzione il **codice ASME** “*Boiler & Pressure Vessel Code*”: nato circa un secolo fa per iniziativa dell’istituzione privata *American Society of Mechanical Engineers* e sottoposto a nuova edizione ogni tre anni, è ancora oggi un punto di riferimento a livello mondiale per tali prodotti.