

DISEÑO DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS PRINCIPALES DE LOS APARATOS QUÍMICOS SOMETIDOS A PRESIÓN EXTERIOR.

M.Sc. Abel Goya Valdivia.
Ing. Vladimir Ibarra Hernández.
M.Sc. Rosendo Moreno Rodríguez*

Las metodologías que se proponen permiten de forma sencilla, rápida y eficiente resolver cualquier diseño de virolas, fondos y tapas sometidos a presión exterior.

Se ha realizado un estudio de las normas [4] y [5], así como de la bibliografía especializada a nuestra disposición.

INTRODUCCIÓN

Para realizar un diseño es necesario el concurso de muchos especialistas; el papel rector pertenece al *ingeniero químico* y al *ingeniero mecánico*. La elección del tipo y la construcción racional del aparato, la determinación de sus parámetros de servicio, las dimensiones principales, de los materiales de construcción y otros datos necesarios para construir y calcular su resistencia lo hace el *ingeniero químico* a base del proceso de producción elegido, del cálculo químico - tecnológico y de las particularidades del medio que se labra. A estos problemas se dedican muchas obras científico - técnicas especiales. El *ingeniero mecánico* elige el equipo estándar y elabora el equipo no estándar. En el proceso de elaboración (di-

seño) de los aparatos no estándar, el especialista debe tomar como base los documentos técnicos normativos, de los cuales existen muchos en todo el mundo, como por ejemplo, el código ASME, las normas GOST, etc. No obstante, la existencia de estos documentos, en la práctica, para nuestros especialistas, **los procesos del diseño mecánico se hacen muy complejos, por diferentes razones, como:**

- Cuba no tiene establecida una norma particular, por lo que utiliza diferentes tipos de normas, según la rama de la economía, niveles de acceso y adquisición, e incluso preferencias de algunos diseñadores, con la consecuencia negativa de que cada norma le da un enfoque particular al

* Profesores Universidad Central de Las Villas.
Centro de Estudio de Sustancias Especiales.
Centro de Estudios de Informática.

problema, en dependencia de su procedencia las exigencias para el diseño son muy variadas.

- La bibliografía especializada, existente en el país, no hace un análisis profundo de los fundamentos teóricos del diseño mecánico de aparatos químicos, ni plantea métodos de cálculo que sirvan de guía para el diseño.

Al tomar en cuenta toda la *problemática* anterior, se consideró necesario desarrollar estas metodologías de cálculo.

GENERALIDADES

Es conveniente comenzar el diseño por *elegir el material principal de construcción* que se corresponda con las principales condiciones del proceso tecnológico que se caracteriza por el medio, la presión y la temperatura; una vez elegido el material de construcción, *se compone el esquema de cálculo del elemento* en cuestión, se determinan las dimensiones exteriores principales y *se efectúa el cálculo según los criterios principales de capacidad de funcionamiento*. Es necesario efectuar los cálculos partiendo de las condiciones más desfavorables posibles en el empleo (durante el funcionamiento, puesta en marcha, parada, distintas pruebas, etc.).

Los *Parámetros de cálculo Principales* que se utilizan para *elegir el material de construcción y realizar los cálculos de resistencia* de los elementos de un aparato químico son:

1. Temperatura de cálculo ($t_{cal.}$)

Se determina a partir de la *temperatura de servicio* (temperatura del medio en el cual funciona el aparato (t_m)) según la siguiente fórmula:

$$t_{cal.} = m \acute{a}x (30^0 C; t_m)$$

2. Presión de cálculo ($P_{cal.}$)

Se determina a partir de la *presión de servicio* (excesiva interior o exterior (P)) que surge en el proceso de trabajo y de la *pre-*

sión hidrostática (P_h) del medio en el cual funciona el aparato, según la siguiente fórmula :

$$P_{cal.} = P + P_h$$

donde se cumpla que

$$(P_h / P) * 100 > 5\%$$

3. Tensiones admisibles ($[\Gamma]$)

Se determina, a partir de las *tensiones admisibles normadas* (Γ^*) del material de construcción del aparato que surgen en el proceso de trabajo y de prueba, y se afecta por el *coeficiente de corrección* (η) que toma en cuenta la forma de la pieza bruta, según la siguiente fórmula :

$$[\Gamma] = \eta \cdot \Gamma^*$$

Donde h es:

- 1 para planchas.
- 0.8 para piezas fundidas con control.
- 0.7 para piezas fundidas sin control.

4. Espesor ejecutivo (S)

Se determina a partir de :

- **El espesor de cálculo** (depende del elemento en cuestión y de la carga a la que está sometida ($S_{cal.}$))
- **El sobreespesor** (C)

$$S = S_{cal.} + C$$

Donde

$C = C_1 + C_2 + C_3$, C_1 es la adición al espesor para compensar la pérdida de material producto de la corrosión y la erosión. Se calcula como:

$$C_1 = \begin{cases} (p_c + p_e) \cdot \tau \\ 2mm \end{cases}$$

Donde:

p_c , es la velocidad de corrosión del material de construcción por la sustancia de trabajo.

p_e , es la velocidad de erosión del material de construcción por la sustancia de trabajo.

τ , es el tiempo de servicio.

C_2 , es la adición al espesor para compensar la tolerancia negativa.

C_3 , es la adición al espesor para compensar las pérdidas por dificultades tecnológicas.

5. Módulo de elasticidad longitudinal (E)

Está en función del tipo de material y de la temperatura de cálculo. Su valor está normalizado.

6. Coeficiente de resistencia de las uniones soldadas (j).

Caracteriza la resistencia de la unión en comparación con la resistencia del material base, sus valores normados se ofrecen en función de la estructura de la costura y del procedimiento de soldadura.

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES SOMETIDOS A PRESIÓN EXTERIOR

Elementos principales a presión exterior:

I. Virola Cilíndrica.

- Vertical.
- Horizontal.

II. Fondo.

- Cónico
- Cónico rebordeado
- Elíptico rebordeado
- Circular plano
- Circular plano rebordeado
- Semiesférico
- Semiesférico rebordeado
- Casquete esférico.

III. Tapa.

- Cónica
- Cónica rebordeada
- Elíptica rebordeada
- Circular plana
- Circular plana rebordeada
- Semiesférica
- Semiesférica rebordeada
- Casquete esférico.

Metodología:

1. Selección del material.

Generalmente se selecciona un material común a todos los elementos principales de un aparato o de acuerdo con un mismo criterio.

2. Esquema de cálculo.

Depende de cada tipo de elemento principal y de las cargas que sobre él actúan.

3. Cálculo de los parámetros principales y las cargas actuantes y admisibles, según los criterios principales de capacidad de funcionamiento.

a) Temperatura de cálculo.

Se mantiene la misma fórmula para todos los elementos principales, según la definición en los *parámetros de cálculo*.

b) Tensiones admisibles.

- Si se trabaja en vacío se calcula sólo para condiciones de trabajo ($[\Gamma]$)

$$[\Gamma] = \eta \cdot \Gamma^*$$

- Si es encaquetado se calcula:
- Para condiciones de trabajo ($[\Gamma]$)

$$[\Gamma] = \eta \cdot \Gamma^*$$

- Para condiciones de prueba ($[\Gamma]_{pr.}$)

$$[\Gamma]_{pr.} = \frac{\Gamma_{pr.}}{\eta_{pr.}}$$

Donde:

$\Gamma_{fl.}$, es la tensión de fluencia del material a 30 °C .

$\eta_{fl.}$, es el coeficiente de margen de seguridad para el límite de fluidez.

c) Presión de cálculo.

En los elementos principales comunes a presión exterior la *presión hidrostática* del medio, en el cual funciona el aparato, no se considera ($P_h = 0$).

- Si se trabaja en vacío.

$$P_{cal.} = \Delta P = P_{atm.} - P_{r es.}$$

Donde:

$$P_{atm.} = 0.1 MPa.$$

$P_{r es.}$ es la presión residual.

- Si el recipiente es enchaquetado con presión en la camisa.

$$P_{cal.} = P_{cam.} + Ph_{cam.}$$

Donde:

$P_{cam.}$ es la presión en la camisa.

$Ph_{cam.}$ es la presión hidrostática en la camisa. Se calcula como:

$$Ph_{cam.} = 9.81 \cdot \rho_{mc.} \cdot h_{liq.} \cdot 10^{-6}$$

Donde:

$\rho_{mc.}$ es la densidad del medio en la camisa.

$h_{liq.}$ es la altura del líquido en la camisa.

- Si el recipiente es enchaquetado y, además, trabaja en vacío.

$$P_{cal.} = \Delta P + P_{cam.} + Ph_{cam.}$$

d) Presión de prueba.

- Si trabaja en vacío.

$$P_{pr.} = 0.2 MPa.$$

- Si es enchaquetado $P_{pr.}$ se calcula por la misma tabla utilizada en el diseño de los elementos a presión interior, tomando $P_{cal.} = P_{cam.}$.

A todos los elementos mencionados se les aplica el método anterior. Seguidamente se le dará continuidad a la metodología, desarrollando las ecuaciones para el cálculo del espesor y las cargas actuantes y admisibles, considerando las particularidades.

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LAS VIROLAS CILÍNDRICAS A PRESIÓN EXTERIOR

a) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \text{máx.} \left\{ \begin{array}{l} \frac{K_2 \cdot D}{100} \\ \frac{1,1 \cdot P_{cal.} \cdot D}{2 \cdot [\Gamma]} \\ \frac{1,1 \cdot P_{pr.} \cdot D}{2 \cdot [\Gamma]_{pr}} \end{array} \right.$$

Donde:

$$K_2 = f(K_1; K_3)$$

$$K_1 = \frac{\eta_{est} \cdot P_{cal.}}{2,4 \cdot 100 \cdot E}$$

$$K_3 = \frac{L}{D}$$

si la posición espacial es vertical en lugar de L se utiliza H.

K_2 se determina por el nomograma [4], [5] entrando con los valores de K_1 .

η_{est} es el coeficiente de estabilidad. Se toma:
 2.4 para trabajo;
 1.8 para prueba.

b) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$)
Es la presión de cálculo.
- Fuerza axial actuante (F)
Depende de la disposición espacial.
- Momento flector actuante.
Sólo se le aplica a la virolas cilíndricas horizontales colocadas sobre apoyos espaciados.
- Esfuerzo cortante actuante.
Sólo se le aplica a la virolas cilíndricas horizontales colocadas sobre apoyos espaciados.

c) Cargas admisibles.

- Presiones admisibles.
Determinación de la presión exterior admisible según la resistencia mecánica.

$$[P_{ex.}]_r = \frac{2 \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{D + S - C}$$

Determinación de la presión exterior admisible según la estabilidad geométrica. (Está en dependencia de la disposición del aparato).

Determinación de la presión exterior admisible según ambos factores.

$$[P_{ex.}] = \frac{[P_{ex.}]_r}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P_{ex.}]_r}{[P_{ex.}]_e} \right)^2}}$$

Si $P_{cal.} \geq [P_{ex.}]$ se repiten los cálculos a partir de **f)** con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

- Fuerzas axiales admisibles.

Determinación de la fuerza axial admisible según la resistencia mecánica.

$$[F]_r = \Pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\Gamma]$$

Determinación de la fuerza axial admisible según la estabilidad geométrica.

Está en dependencia de la disposición del aparato.

Determinación de la fuerza axial admisible según ambos factores.

$$[F] = \frac{[F]_r}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_r}{[F]_e} \right)^2}}$$

Si $F \geq [F]$ se repiten los cálculos a partir de **f)** con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

- Momentos flectores admisibles.

Determinación del momento flector según la resistencia mecánica.

Sólo se le aplica a la virolas cilíndricas horizontales colocadas sobre apoyos espaciados.

Determinación del momento flector admisible según la estabilidad geométrica.

Sólo se le aplica a la virolas cilíndricas horizontales colocadas sobre apoyos espaciados.

Determinación del momento flector admisible según ambos factores.

Sólo se le aplica a la virolas cilíndricas horizontales colocadas sobre apoyos espaciados.

- Esfuerzos cortantes admisibles.

Determinación del esfuerzo cortante según la resistencia mecánica.

Sólo se le aplica a la virolas cilíndricas horizontales colocadas sobre apoyos espaciados.

Determinación del esfuerzo cortante admisible según la estabilidad geométrica.

Sólo se le aplica a las virolas cilíndricas horizontales colocadas sobre apoyos espaciados.

Determinación del esfuerzo cortante admisible según ambos factores.

Sólo se le aplica a la virolas cilíndricas horizontales colocadas sobre apoyos espaciados.

A) Metodología de diseño de las virolas cilíndricas verticales a presión exterior.

a) Cargas actuantes.

- Fuerza axial actuante.

$$F = \Delta P \cdot A + G \cdot 10^{-6}$$

Donde

$G = m \cdot g \cdot 10^{-6}$, es el peso total del aparato

m , es la masa del aparato lleno,

$g = 9.81 \text{ m/seg}^2$, es la aceleración de la gravedad y

$A = \frac{\Pi}{4} \cdot (D + 2 \cdot S)^2$ es el área de la tapa correspondiente.

b) Cargas admisibles.

- Presiones admisibles.

Determinación de la presión exterior admisible según la estabilidad geométrica.

- Si $H \leq h_{crit.}$ entonces;

$$[P_{ex}] = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\eta_{est.}} \cdot \frac{D}{H} \cdot \left(\frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (S - C)}{D}}$$

- Si $H > h_{crit.}$ entonces;

$$[P_{ex}] = \frac{2,21 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\eta_{est.}} \cdot \frac{D}{H} \cdot \left(\frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right)^3$$

Donde:

H , es la altura de la virola.

$h_{crit.}$, es la altura crítica.

- Fuerzas axiales admisibles.

Determinación de la fuerza axial admisible según la estabilidad geométrica.

Si $\frac{H}{D} < 10$ entonces

$$[F]_E = [F]_{E1}$$

En caso contrario,

$$[F]_E = \min\{[F]_{E1}, [F]_{E2}\}$$

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\eta_{est.} \cdot P_{cal.}} \cdot D^2 \cdot \left(\frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (S - C)}{D}}$$

$$[F]_{E2} = \frac{\Pi \cdot (D + (S - C)) \cdot (S - C) \cdot E}{\eta_{est.}} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda_f} \right)^2$$

Donde:

$$\lambda_f = 2.83 \cdot \frac{H}{D + (S - C)}$$

c) Condición general de estabilidad

$$\frac{P_{cal}}{[P]} + \frac{F}{[F]} \leq 1$$

Si no se cumple la condición, se repiten los cálculos a partir de **f**) con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

B) Metodología de diseño de las virolas cilíndricas horizontales a presión exterior.

a) Cargas actuantes.

- Fuerza axial actuante.

$$F = \Delta P \cdot A + \frac{f \cdot G}{2}$$

Donde

f , es el coeficiente de fricción en los apoyos.

Momento flector actuante ($M_{m\acute{a}x}$)

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{W \cdot l^2}{8}$$

$W = \frac{G}{l}$, es la carga distribuida y

l , es la distancia entre apoyos.

Esfuerzo cortante actuante (Q)

$$Q = W \cdot \frac{l}{2}$$

b) Cargas admisibles.

- Presiones exteriores admisibles.

Determinación de la presión exterior admisible según la estabilidad geométrica.

Si $L \leq l_{crit}$, entonces

$$[P_{ex}] = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\eta_{est.}} \cdot \frac{D}{L} \cdot \left(\frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (S - C)}{D}}$$

Si $L > l_{crit}$ entonces

$$[P_{ex}] = \frac{2,21 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\eta_{est.}} \cdot \frac{D}{L} \cdot \left(\frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right)^3$$

Donde

$$l_{crit.} = 8,15 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (S - C)}}$$

L , es la longitud de la virola.

$l_{crit.}$, es la longitud crítica.

- Fuerzas axiales admisibles.

Determinación de la fuerza axial admisible según la estabilidad geométrica.

$$\text{Si } \frac{L}{D} < 10$$

entonces

$$[F]_E = [F]_{E1}$$

En caso contrario,

$$[F]_E = \min\{[F]_{E1}, [F]_{E2}\}$$

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\eta_{est.} \cdot P_{cut.}} \cdot D^2 \cdot \left(\frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (S - C)}{D}}$$

$$[F]_{E2} = \frac{\Pi \cdot (D + (S - C)) \cdot (S - C) \cdot E}{\eta_{est.}} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda_f} \right)^2$$

Donde:

$$\lambda_f = \frac{2,83 \cdot L}{D + (S - C)}$$

- Momentos flectores admisibles.

Determinación del momento flector según la resistencia mecánica.

$$[M]_r = 0,25 \cdot \Pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\Gamma]$$

Determinación del momento flector admisible según la estabilidad geométrica.

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\eta_{est}} \cdot D^3 \cdot \left(\frac{100 \cdot (S-C)}{D} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (S-C)}{D}}$$

Determinación del momento flector admisible según ambos factores.

$$[M] = \frac{[M]_r}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_r}{[M]_E} \right)^2}}$$

Si $M_{m\acute{a}x} \geq [M]$ se repiten los cálculos a partir de **f)** con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

- Esfuerzos cortantes admisibles.
Determinación del esfuerzo cortante según la resistencia mecánica.

$$[Q]_r = 0,25 \cdot \Pi \cdot D \cdot (S-C) \cdot [\Gamma]$$

Determinación del esfuerzo cortante admisible según la estabilidad geométrica.

$$[Q]_E = \frac{2,4 \cdot E \cdot (S-C)^2}{\eta_{est}} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot \frac{D \cdot (S-C)}{l^2} \right]$$

Determinación del esfuerzo cortante admisible según ambos factores.

$$[Q] = \frac{[Q]_r}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_r}{[Q]_E} \right)^2}}$$

Si $Q \geq [Q]$ se repiten los cálculos a partir de **f)** con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

h) Condición general de estabilidad.

$$\frac{P_{cal.}}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M_{m\acute{a}x}}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1$$

Si no se cumple la condición, se repiten los cálculos a partir de **f)** con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LOS FONDOS A PRESIÓN EXTERIOR

a) Espesor de cálculo.

Está en dependencia de la forma geométrica.

b) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$)

c) Cargas admisibles.

- Presiones admisibles.

Determinación de la presión exterior admisible según la resistencia mecánica.

Está en dependencia de la forma geométrica.

Determinación de la presión exterior admisible según la estabilidad geométrica.

Está en dependencia de la forma geométrica.

Determinación de la presión exterior admisible según ambos factores.

Está en dependencia de la forma geométrica.

A) Metodología de diseño para fondo cónico a presión exterior.

a) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = máx. \left\{ \begin{array}{l} K_2 \cdot D_E \cdot 10^{-2} \\ \frac{1,1 \cdot P_{cal.} \cdot D_E}{2 \cdot [\Gamma]} \\ \frac{1,1 \cdot P_{pr.} \cdot D_E}{2 \cdot [\Gamma]_{pr}} \end{array} \right.$$

$$K_2 = f(K_1, K_3)$$

K_1 y K_3 se calculan igual que en las virolas a presión exterior, tomando

$$L = L_E \text{ y } D = D_E$$

$$L_E = \frac{D - D_0}{2 \cdot \text{sen}(\alpha)}, \text{ longitud efectiva y}$$

$$D_E = máx. \left\{ \begin{array}{l} \frac{D + D_0}{2 \cdot \text{sen}(\alpha)} \\ \frac{V}{\cos(\alpha)} - 0,31 \cdot (D + D_0) \cdot \text{tang}(\alpha) \cdot \sqrt{\frac{D + D_0}{100 \cdot (S_v - C)}} \end{array} \right.$$

es el diámetro efectivo,

Donde

S_v , es el espesor de la virola asociada con el fondo,

D_0 es el diámetro inferior de la base del fondo,

D es el diámetro superior de la base del fondo que se une a una virola.

b) Cargas actuantes.

- Presión de cálculo.

c) Cargas admisibles.

- Presiones admisibles.

Determinación de la presión exterior admisible según la resistencia mecánica.

$$[P]_{\Gamma} = \frac{2 \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{\frac{D}{\cos(\alpha)} + (S - C)}$$

Determinación de la presión exterior admisible según la estabilidad geométrica.

Si $L_E \leq l_{crit}$ entonces:

$$[P]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D_E}{\eta_{ex} \cdot L_E} \cdot \left(\frac{100(S-C)}{D_E} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (S-C)}{D_E}}$$

Si $L_E > l_{crit}$ entonces:

$$[P]_E = \frac{2,21 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\eta_{ex}} \cdot \left(\frac{100 \cdot (S-C)}{D_E} \right)^3$$

Donde

$$l_{crit.} = 8,15 \cdot D_E \cdot \sqrt{\frac{D_E}{100 \cdot (S - C)}}$$

Determinación de la presión exterior admisible según ambos factores.

$$[P_{ex.}] = \frac{[P_{ex.}]_{\Gamma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P_{ex.}]_{\Gamma}}{[P_{ex.}]_E} \right)^2}}$$

Si $P_{cal.} > [P_{ex.}]$ se repiten los cálculos a partir de **f)** con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

Para el caso de que este fondo sea **rebordeado** se toma:

La altura del reborde:

$$h = 4 \cdot S$$

El radio del reborde:

$$r = 0,1 \cdot D$$

B) Metodología de diseño para fondo elíptico rebordeado a presión exterior.

a) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = máx. \left\{ \begin{array}{l} P_{cal.} \cdot \frac{R}{2 \cdot [\Gamma]} \\ P_{pr.} \cdot \frac{R}{2 \cdot [\Gamma]_{pr.}} \\ \frac{K_0 \cdot R}{510} \sqrt{2,4 \cdot \frac{P_{cal.}}{10^{-6} \cdot E}} \\ \frac{K_0 \cdot R}{510} \sqrt{1,8 \cdot \frac{P_{cal.}}{10^{-6} \cdot E}} \end{array} \right.$$

Donde:

$$K_0 = 0,9 \text{ y } R = D$$

b) Cargas actuantes.

- Presión de Cálculo.

c) Cargas admisibles.

Determinación de la presión exterior admisible según la resistencia mecánica.

$$[P]_{\Gamma} = \frac{2 \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{R + (S - C)}$$

Determinación de la presión exterior admisible según la estabilidad geométrica.

$$[P]_{E} = \frac{26 \cdot E \cdot 10^{-6}}{\eta_{est.}} \cdot \left(\frac{100 \cdot (S - C)}{K_e \cdot R} \right)^2$$

$$K_e = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot X) \cdot X}{1 + (3 + 10 \cdot X) \cdot X}$$

Donde:

$$X = 10 \cdot \frac{S - C}{D} \cdot \left[\frac{D}{2 \cdot H_f} - \frac{2 \cdot H_f}{D} \right]$$

$$H_f = 0,25 \cdot D$$

Determinación de la presión exterior admisible según ambos factores.

$$[P] = \frac{[P]_{\Gamma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P]_{\Gamma}}{[P]_{E}} \right)^2}}$$

Si $P_{cal.} \setminus [P]$ se repiten los cálculos a partir de **f)** con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

La altura del reborde:

$$h = 3,5 \cdot S$$

El radio del reborde:

$$r = 0,1 \cdot D$$

Si $h > 0,8 \cdot \sqrt{D \cdot (S - C)}$ el espesor del fondo no ha de ser menor que el de su virola asociada.

C) Metodología de diseño para fondo semiesférico a presión exterior.

a) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = máx. \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{cal.} \cdot R}{2 \cdot [\Gamma]} \\ \frac{P_{pr.} \cdot R}{2 \cdot [\Gamma]_{pr.}} \\ \frac{K_0 \cdot R}{510} \sqrt{2,4 \cdot \frac{P_{cal.}}{10^{-6} \cdot E}} \\ \frac{K_0 \cdot R}{510} \sqrt{1,8 \cdot \frac{P_{pr.}}{10^{-6} \cdot E}} \end{array} \right.$$

Donde

$$K_0 = 1 \text{ y } R = 0,5 \times D$$

b) Cargas actuantes.

- Presión de Cálculo.

c) Cargas admisibles.

Determinación de la presión exterior admisible según la resistencia mecánica.

$$[P]_{\Gamma} = \frac{2 \cdot [\Gamma] \cdot (S - C)}{R + (S - C)}$$

Determinación de la presión exterior admisible según la estabilidad geométrica.

$$[P]_{E} = \frac{26 \cdot E \cdot 10^{-6}}{\eta_{est.}} \cdot \left(\frac{100 \cdot (S - C)}{K_e \cdot R} \right)^2$$

$$K_e = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot X) \cdot X}{1 + (3 + 10 \cdot X) \cdot X}$$

Donde

$$X = 10 \cdot \frac{S - C}{D} \cdot \left[\frac{D}{2 \cdot H_f} - \frac{2 \cdot H_f}{D} \right]$$

Donde:

$$H_f = 0,25 \times D$$

Determinación de la presión exterior admisible según ambos factores.

$$[P] = \frac{[P]_{\Gamma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P]_{\Gamma}}{[P]_{E}} \right)^2}}$$

Si $P_{cal.}$ y $[P]$ se repiten los cálculos a partir de **f)** con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

Para el caso de que este fondo sea **rebordeado** se toma:

La altura del reborde:

$$h = 3 \cdot S$$

Si $h > 0,3 \cdot \sqrt{D \cdot (S - C)}$, el espesor del fondo no a de ser menor que el de su virola asociada.

d) Metodología de diseño para fondo circular plano a presión exterior.

e) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \text{máx.} \left\{ \begin{array}{l} k \cdot K_{deb.} \cdot D_{cal.} \cdot \sqrt{\frac{P_{cal.}}{\phi \cdot [\Gamma]}} \\ k \cdot K_{deb.} \cdot D_{cal.} \cdot \sqrt{\frac{P_{pr.}}{\phi \cdot [\Gamma]_{pr.}}} \end{array} \right.$$

Donde:

$D_{cal.}$ y k están en dependencia de la solución constructiva del conjunto fondo-virola.

$K_{deb.}$ - Depende del número de orificios que presente el fondo, según la siguiente tabla:

Número de orificios	Fórmula
0	$K_{deb.} = 1$
1	$K_{deb.} = \sqrt{1 + \left(\frac{d}{D_{cal.}} \right)^2 + \left(\frac{d}{D_{cal.}} \right)^2}$
> 1	$K_{deb.} = \sqrt{\frac{1 - \sum \left(\frac{d_i}{D_{cal.}} \right)^3}{1 - \left(\sum \frac{d_i}{D_{cal.}} \right)}}$

Donde:

d_i es la máxima de longitudes de cuerdas de los orificios en la sección diametral más debilitada.

d_i - es el valor de cada longitud de cuerda o del diámetro del orificio.

f) Cargas actuantes.

- Presión actuante ($P_{cal.}$) Es la presión de cálculo definida en los parámetros principales y calculada en el paso c).

f) Cargas admisibles.

- Presión admisible para condiciones de trabajo.

$$[P] = \left[\frac{S - C}{k \cdot K_{deb.} \cdot D_{cal.}} \right]^2 \cdot [\Gamma] \cdot \varphi$$

- Presión admisible para condiciones de prueba.

$$[P]_{pr} = \left[\frac{S - C}{k \cdot K_{deb.} \cdot D_{cal.}} \right]^2 \cdot [\Gamma]_{pr} \cdot \varphi$$

Para el caso de que este fondo sea **rebordeado** se toma:

La altura del reborde:

$$h = 4 \cdot S$$

El radio del reborde:

$$r = 50 \text{ mm}$$

E) Metodología de diseño para fondo casquete esférico a presión exterior.

a) Espesor de cálculo.

$$S_{cal.} = \text{máx.} \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,72 \cdot P_{cal.} \cdot D}{\varphi \cdot [\Gamma]} \\ \frac{0,72 \cdot P_{pr.} \cdot D}{\varphi \cdot [\Gamma]_{pr.}} \end{array} \right.$$

b) Cargas actuantes.

- Presión de cálculo.

c) Cargas admisibles.

Determinación de la presión exterior admisible

$$[P] = 0,466 \cdot n_1 \cdot E \left(\frac{S - C}{D} \right)^2$$

Donde

$$n_1 = f(r)$$

La fórmula anterior es aplicable a condición de que:

$$\frac{R}{S - C} \geq \frac{n_2 \cdot E}{\Gamma_f}$$

Donde:

$$n_2 = f(r).$$

$$\rho = \frac{6,6 \cdot H_f}{S - C}, \text{ parámetro del grado de declive del fondo.}$$

$$H_f = 0,134 \times D, \text{ Altura del fondo.}$$

Si $P_{cal.}$ y $[P]$ se repiten los cálculos a partir de f) con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LAS TAPAS A PRESIÓN EXTERIOR

En el caso del diseño de las tapas las ecuaciones de cálculo son las mismas que las utilizadas en los fondos, excepto en las tapas de casquete esférico.

Metodología de diseño para tapa casquete esférico a presión exterior

a) **Espesor de cálculo.**

$$S_{cal.} = máx. \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,58 \cdot P_{cal.} \cdot D}{\varphi \cdot [\Gamma]} \\ \frac{0,58 \cdot P_{pr.} \cdot D}{\varphi \cdot [\Gamma]_{pr.}} \end{array} \right.$$

b) **Cargas actuantes.**

- Presión de cálculo.

c) **Cargas admisibles.**

Determinación de la presión exterior admisible

$$[P] = 0,466 \cdot n_1 \cdot E \left(\frac{S - C}{D} \right)^2$$

Donde:

$$n_1 = f(r).$$

La fórmula anterior es aplicable a condición de que :

$$\frac{R}{S - C} \geq \frac{n_2 \cdot E}{\Gamma_{fl.}}$$

Donde:

$$n_2 = f(r).$$

$\rho = \frac{6,6 \cdot H_f}{S - C}$, parámetro del grado de declive de la tapa.

$H_f = 0,134 \times D$, Altura de la tapa.

Si $P_{cal.} \geq [P]$

se repiten los cálculos a partir de **f)** con el espesor ejecutivo aumentado al valor normado próximo.

RECOMENDACIONES

- Divulgar estas metodologías, con el objetivo de lograr su utilización intensiva y retroalimentar a los autores con las sugerencias y recomendaciones que surjan en la práctica docente y de proyectos.
- Implementar, a partir de estas metodologías, un sistema computacional para facilitar las actividades de diseño.

BIBLIOGRAFÍA

ASME Boiler and pressure vessel code. Section VIII. Division 1. United Engineering Center. New York, 1992.

GOYA, V. A.; IBARRA, E. V. Metodologías de cálculo de los elementos constructivos principales comunes de los aparatos químicos. (Inédito).

LASCHINSKI, A. A. Construcción de aparatos químicos soldados, manual del ingeniero. Moscú: Vneshtorgizdat, 1983.

MIJALEV, M. F. Cálculo y diseño de máquinas y aparatos de la industria química /M. F. Mijalev, N. P. Tretiakov, A. I. Milchenko, V. V. Zobnin. Moscú: Vneshtorgizdat, 1986.

Normas GOST para el Diseño de recipientes sometidos a presión. Moscú, 1986.