

## **CAPÍTULO 3 SELECCIÓN DE ESPESOR, TAMAÑO Y GRADO DEL MATERIAL**

El diseño de los ductos toma en cuenta muchos factores para asegurar un flujo continuo y eficiente a lo largo de toda la línea. Las caídas de presión, la velocidad del flujo y las presiones internas que debe soportar son algunas de las variables que intervienen en la selección del espesor de la pared, el diámetro interno de la tubería, la longitud de la línea y el grado del material a utilizar y que definirán la eficiencia de todo el sistema.

En este capítulo se analizan a detalle estos elementos claves del diseño y se proponen técnicas para hacer el mejor diseño posible.

### **3.1 Tamaño de la línea**

Los factores más importantes al seleccionar el tamaño de la línea son, sin duda, las caídas de presión que se presentarán durante el trayecto de los fluidos a través de la tubería y la velocidad del flujo. Es importante asegurarse de que el sistema será capaz de mantener una presión suficiente para llevar los hidrocarburos de un punto a otro de manera eficiente.

Aunque a través de la tubería se presentan caídas de presión, las más importantes ocurren cuando los fluidos pasan a través de válvulas, accesorios o, en general, equipo que opera a la misma presión o cercana a ella. También es necesario diseñar el diámetro de la línea para controlar la velocidad de flujo y que ésta se mantenga en el rango deseado.

#### **3.1.1 Velocidad Erosional**

A lo largo de su trayecto, la velocidad del fluido debe mantenerse dentro de un rango que nos garantice que va a ser lo suficientemente alta para permitir el transporte de los sólidos y disminuir el oleaje y lo suficientemente baja para prevenir problemas como el ruido, el golpe de ariete y, por supuesto, la erosión.

Cuando gotas de líquido golpean las paredes de la tubería con tanta fuerza que desprenden partículas, producto de la corrosión normal, y dejan al descubierto el acero, vulnerable a ser corroído de nueva cuenta, decimos que se presenta una erosión por

fluidos. Si la velocidad del flujo es muy alta, las gotas impactarán con más fuerza, lo que provoca una mayor erosión.

Así, cuando la velocidad del flujo excede cierto valor, se presenta el flujo erosional. Para calcularlo se desarrolló, empíricamente, la siguiente fórmula:

$$V_e = \frac{c}{(\rho_m)^{\frac{1}{2}}}$$

Donde  $V_e$  es la velocidad erosional en  $[\frac{\text{pies}}{\text{seg}}]$

$\rho_m$  es la densidad del fluido en  $[\frac{\text{lb}}{\text{pies}^3}]$

C es una constante empírica.

De acuerdo a la norma API RP 14E, el valor admitido de C puede ir de 150 a 200 para un flujo continuo, sin presencia de sólidos y que no sea corrosivo o que sea de corrosión controlada. Si se tiene un flujo intermitente sin presencia de sólidos se puede llegar a un valor de hasta 250 para C sin que ocasione problemas de operación. Cuando se espera la presencia de arena se debe reducir la velocidad del flujo y estar revisando periódicamente las condiciones del flujo y del tubo.

Debido a la complejidad del fenómeno, todavía no hay una regla generalizada que aplique infaliblemente en todos los casos, por lo tanto se siguen haciendo estudios y en algunos casos simplemente se van ajustando las condiciones de manera empírica.

Para el flujo de gas en tuberías se deben tomar en cuenta otros factores importantes, por lo que la forma de calcular la velocidad erosional cambia un poco, ya que debemos tomar en cuenta las propiedades inherentes al gas.

Así, para flujo de gas, la expresión queda de la siguiente forma:

$$V_e = 0.6 C \left[ \frac{T}{S_g P} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde  $V_e$  es la velocidad erosional en  $[\frac{pies}{seg}]$

$S_g$  es la gravedad específica del gas a c.s.  $[\frac{lb}{pies^3}]$

C es una constante empírica.

T es la temperatura en  $[^{\circ}R]$

P es la presión en  $[\frac{lb}{pg^2 abs}]$

### 3.1.2 Líneas para flujo de líquido

Los ductos para flujo de líquido son diseñados de forma que se mantenga una velocidad mínima adecuada y así se evite el depósito de sólidos. Cuando comienza el flujo a través de la tubería se depositan sólidos en el fondo formando una capa. Si la velocidad del flujo va aumentando se puede llegar a una velocidad de equilibrio con la cual las partículas sólidas se erosionan de la capa al mismo ritmo que otras partículas sólidas que viajan en el flujo se depositan en la misma, por lo que el tamaño de ésta se mantiene constante.

En caso de que la velocidad de flujo aumente todavía más, la capa empieza a disminuir ya que las partículas que la forman empiezan a ser erosionadas rápidamente hasta que se alcanza otra velocidad de equilibrio. Lo mismo ocurre, pero a la inversa cuando va bajando la velocidad.

Se ha comprobado de manera práctica que una velocidad mínima de  $3[\frac{pies}{seg}]$  es suficiente para evitar que se forme una capa de sólidos tan grande que afecte el desempeño del sistema, mientras que la velocidad máxima permisible se ha fijado en alrededor de  $15[\frac{pies}{seg}]$  con la cual se minimiza el golpe de ariete, el ruido y la erosión.

La ecuación para calcular la velocidad del flujo de líquido es la siguiente:

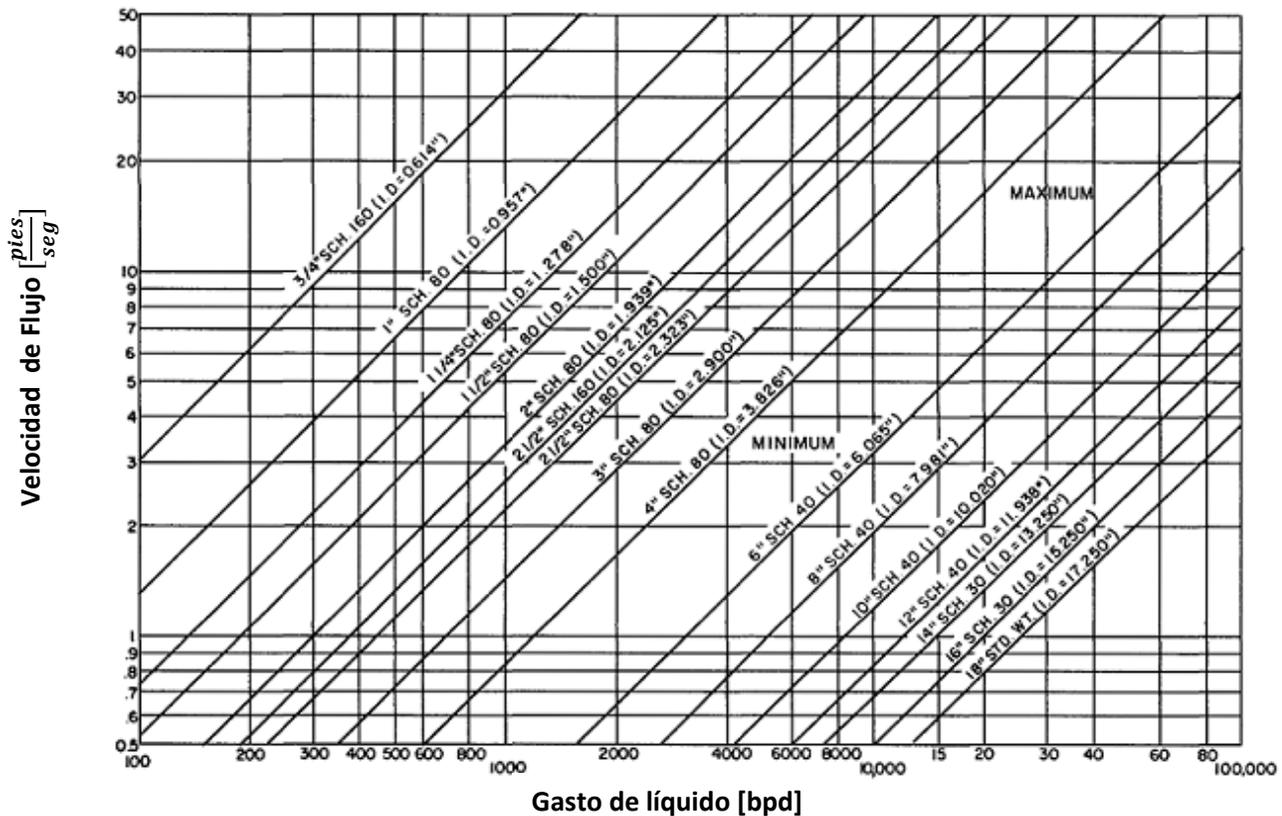
$$V = 0.012 \frac{Q_l}{d^2}$$

Donde V es la velocidad del fluido en  $[\frac{pies}{seg}]$

$Q_l$  es el gasto de líquido en [bpd]

d es el diámetro interno de la tubería en [pg]

Utilizando esta ecuación se construyó la siguiente gráfica que ayuda a facilitar los cálculos para tuberías de diferente diámetro de acuerdo a la velocidad del flujo y al gasto de líquido esperado .



ARNOLD KEN; “Surface Production Operations”, Vol.1; Butterworth-Heinemann. P.292

### 3.1.3 Líneas para flujo de gas

Cuando se tienen líneas para flujo de gas hay varios factores a tener en cuenta. Si la tubería es muy larga hay que asegurarse de que la presión disponible será suficiente para que el gas pueda llegar a su destino, y si no es suficiente debe pasar por estaciones de compresión. En el caso de tuberías muy cortas, las caídas de presión no son un problema, sino que muchas veces se tienen que utilizar elementos controladores de presión para evitar problemas operativos.

También en los ductos de gas debe cuidarse que la velocidad de flujo se mantenga por arriba de un mínimo establecido, en este caso de entre 10 y 15  $[\frac{pies}{seg}]$  para evitar el colgamiento de líquido, mientras que la velocidad máxima debe mantenerse dentro del rango de 60 y 80  $[\frac{pies}{seg}]$  y así se pueda prevenir la corrosión.

Cuando hay presencia de  $CO_2$  se vuelve muy difícil prevenir y controlar la corrosión, en especial a grandes velocidades, por lo que es recomendable mantener la velocidad debajo de los 50  $[\frac{pies}{seg}]$  en todo momento.

Esto se debe a que, debido a la presencia de partículas erosivas, cuando aumenta la velocidad de flujo se desgasta con mayor rapidez el recubrimiento protector y el acero de la tubería, lo que provoca que aumente significativamente la corrosión.

La expresión para calcular la velocidad del flujo de gas es la siguiente:

$$V = 60 \frac{q_g T Z}{d^2 P}$$

Donde V es la velocidad del gas en  $[\frac{pies}{seg}]$

T es la temperatura en  $[^{\circ}R]$

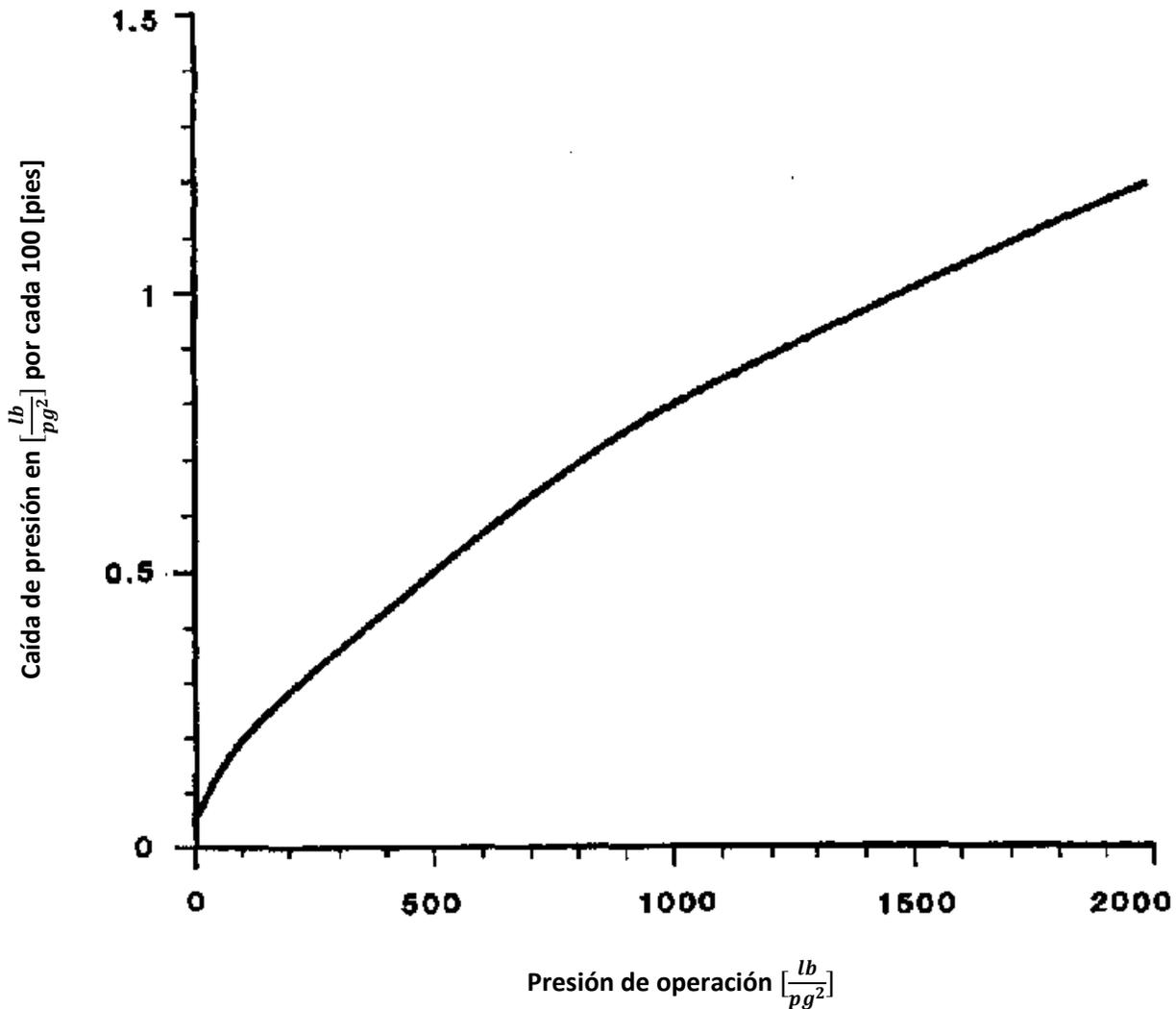
P es la presión en  $[\frac{lb}{pg^2 abs}]$

d es el diámetro interno de la tubería en [pg]

Z es el factor de compresibilidad del gas.

$q_g$  es el gasto de gas en [MMPCD]

Para seleccionar el diámetro óptimo de la línea es necesario definir la presión de operación y las caídas de presión admisibles durante el flujo a través de la tubería. Es importante buscar el balance económico entre el costo de poner una línea de mayor diámetro para minimizar las caídas de presión y el costo de nuevas estaciones de compresión. Utilizando la siguiente gráfica es posible hacer una selección directa del diámetro óptimo para líneas cortas, aunque es importante tener en cuenta que no siempre es aplicable, debido a que muchas veces la mayor caída de presión se debe a elementos controladores de presión.



ARNOLD KEN; "Surface Production Operations", Vol.1; Butterworth-Heinemann. P.293

Una vez definida la caída de presión esperada, podemos calcular el diámetro óptimo para la línea a esas condiciones utilizando la siguiente expresión:

$$d^5 = \frac{1260S_g T f q_g^2}{P \left( \frac{\Delta P}{100[\text{pies}]} \right)}$$

Donde  $d$  es el diámetro interno de la tubería en [pg]

$S_g$  es la gravedad específica del gas.

$f$  es el factor de fricción.

$P$  es la presión en  $[\frac{lb}{pg^2abs^2}]$

$T$  es la temperatura en [°R]

$q_g$  es el gasto de gas en [MMPCD]

### 3.1.4 Líneas para flujo en dos fases

La mayoría de las veces, las líneas de flujo bifásico salen directamente de los pozos y los cabezales de producción hacia los separadores y demás instalaciones de proceso. Al momento de hacer el diseño para estas líneas es necesario tomar en cuenta, además de los factores normales como la velocidad erosional y la corrosión, la presencia de baches que pueden provocar serios problemas operativos.

El rango de velocidades admitidas varía de acuerdo a las características de flujo. En cuanto a la velocidad máxima, si tenemos presencia de  $CO_2$ , debemos mantenerla por debajo de  $50 [\frac{pies}{seg}]$ , pero si no tenemos este problema la podemos llevar hasta  $60 [\frac{pies}{seg}]$ . Para la velocidad mínima debemos tomar en cuenta los fenómenos de colgamiento y resbalamiento, ya que queremos que las dos fases se mantengan en movimiento sin ocasionar problemas, por ello se ha fijado el rango de velocidades mínimas entre 10 y  $15 [\frac{pies}{seg}]$  para mantener el flujo bifásico constante.

Se han desarrollado ecuaciones para poder hacer el diseño del diámetro de la línea tomando en cuenta los diferentes parámetros que gobiernan este tipo de flujo.

Lo primero que debe hacerse es calcular la densidad de la mezcla utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho_m = \frac{12409S_lP + 2.7S_gRP}{198.7P + ZRT}$$

Donde  $\rho_m$  es la densidad promedio de la mezcla a condiciones de flujo en  $[\frac{lb}{pies^3}]$

$T$  es la temperatura de operación en [°R]

R es la relación gas/líquido en  $[\frac{pies^3}{bbl}]$

$S_l$  es la gravedad específica del líquido.

$S_g$  es la gravedad específica del gas a condiciones estándar.

Ya teniendo la densidad promedio de la mezcla podemos calcular la velocidad erosional del flujo utilizando esta expresión:

$$V_e = \frac{C}{\sqrt{\rho_m}}$$

Así, podemos calcular el diámetro interno de la tubería mediante esta fórmula:

$$d = \left[ \frac{\left( 11.9 + \frac{ZRT}{16.7P} \right) q_l}{1000V} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde d es el diámetro interno en [pg]

$q_l$  es el gasto de líquido en  $[\frac{pies^3}{seg}]$

V es la velocidad en  $[\frac{pies}{seg}]$

### **3.2 Espesor de la pared de la línea**

Dentro del diseño de ductos, es muy importante tomar en cuenta las presiones diferenciales, las presiones externas y las cargas longitudinales a las que estarán expuestos durante su operación. Es por ello que la selección del espesor correcto de la pared se vuelve fundamental para que la tubería pueda resistir la presión interna.

### 3.2.1 Estándares y consideraciones

Actualmente, la industria ha adoptado ciertas prácticas de diseño que se enfocan en reducir lo más posible la tensión circunferencial provocada por la presión diferencial y a minimizar el estrés equivalente, dejando un poco de lado el efecto de las cargas externas que sólo son críticas en algunos casos, sobre todo para aplicaciones costa afuera.

La evolución de la industria y la aparición de nuevas técnicas y materiales para la construcción de ductos han facilitado en gran medida el diseño y la elección del espesor de la pared de la línea, pero de cualquier forma es necesario establecer ciertos lineamientos técnicos y económicos para obtener la mejor relación costo-beneficio posible.

Así, se han establecido algunos códigos de diseño para servir como guía y estándar en la industria; a continuación se mencionan algunos de los más representativos:

#### *Códigos ASME B31*

La ASME (Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos, por sus siglas en inglés) es una entidad muy respetada que establece prácticas, códigos y estándares para todo tipo de equipos mecánicos y diseña pruebas y parámetros de revisión. Con respecto a las tuberías, la asociación estableció su primer código B31 en 1926 para tuberías de presión, al que siguieron revisiones y nuevos códigos más específicos, como el código B31.8 para la transmisión de gas o el código B31.4 para las tuberías que transportan aceite. En estos códigos se considera a las tuberías como recipientes de presión y se toma la tensión circunferencial como una fracción del esfuerzo de cedencia.

#### *Código ISO para tuberías*

Una de las organizaciones más grandes a nivel mundial para el diseño de códigos, la ISO (Organización Internacional para la Estandarización), desarrolló el código ISO 13623:2009 para la transportación por tuberías de gas y aceite. Aplica tanto para tuberías metálicas rígidas en tierra como costa afuera y da requerimientos funcionales y recomendaciones para el diseño, selección de materiales, construcción, prueba y operación de manera segura y eficiente.

### *Código API RP1111*

El instituto Americano del Petróleo establece en este documento las prácticas recomendadas para la operación, construcción y mantenimiento de tuberías de acero en instalaciones costa afuera para el transporte de gas, aceite o una mezcla de ambos, también aplica para cualquier tubería que esté sobre las plataformas o que lleve hacia las instalaciones de tratamiento y separación.

### *Reglas DNV para tuberías*

Det Norske Veritas (DNV) es una fundación independiente, de origen Noruego, que se encarga del manejo de riesgo en muchos ámbitos de la industria. En 1976 publicó por primera vez sus reglas para tuberías, siendo los pioneros en tomar en cuenta las especificaciones para instalaciones costa afuera. En su última revisión armonizan sus requerimientos con los de de la ISO 13623, pero añaden requerimientos extras que a su parecer son necesarios, por lo que se vuelve una guía de de diseño más completa.

### *Guía ABS para la construcción y clasificación de tuberías*

Esta guía utiliza el estrés de trabajo para hacer el diseño y la selección del espesor de las líneas de conducción, aunque también ofrece opciones para hacer el diseño por estado límite.

### 3.2.2 Diseño para tensión circunferencial

El criterio de estrés circunferencial estudia el límite que resiste la tubería de acuerdo a la presión diferencial que se forma entre la presión externa y la presión interna. De manera general la ecuación se escribe de la siguiente manera:

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D}{2t}$$

Donde  $p_i$  y  $p_e$  son la presión interna y externa respectivamente.

$D$  es el diámetro.

$t$  es el espesor de la pared.

Tomando en cuenta que el estrés circunferencial debe cumplir lo siguiente:

$$\sigma_h \leq f MEC k_t$$

Donde  $f$  es el factor de diseño por uso.

MEC es el esfuerzo de cedencia mínimo especificado.

$k_t$  es el factor de degradación del material debido a la temperatura, su valor depende de la guía de diseño que se utilice y las especificaciones del fabricante.

El valor del índice de uso varía de acuerdo al uso que se le dará a la tubería; por ejemplo, en plataforma el valor del factor es de 0.72 si está sobre la plataforma y 0.5 si está fuera de ella.

De acuerdo al código que se utilice varía el valor de los factores y ciertas características, por eso se revisan a continuación los cálculos para las diferentes partes del diseño bajo diferentes criterios :

#### *Criterio de tensión circunferencial de DNV*

Lo que se busca principalmente en la selección del espesor de la pared de la tubería es que sea capaz de resistir el estrés generado por la diferencia de presiones. Este estrés no debe exceder el valor definido mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D - t_1}{2t_1} \leq \eta (MEC - k_t)$$

Donde  $\sigma_h$  es la tensión circunferencial.

$p_i$  y  $p_e$  son la presión interna y externa respectivamente.

$D$  es el diámetro externo nominal de la pared.

$t_1$  es el espesor mínimo de la pared.

$t_1$  es el espesor nominal de la pared-tolerancia de fábrica-resistencia a la corrosión

MEC es el esfuerzo de cedencia mínimo especificado.

$k_t$  es el factor de degradación del material debido a la temperatura.

Mientras que el factor de resistencia a la presión se obtiene así:

$$\eta = \frac{2\alpha_u}{\sqrt{3\gamma_m\gamma_{sc}\gamma_{inc}}}$$

Donde  $\alpha_u$  es el factor de fuerza del material.

$\gamma_m$  es el factor de resistencia del material.

$\gamma_{sc}$  el factor de seguridad de clase.

$\gamma_{inc}$  el ritmo de presión incidental de diseño.

*Criterio de tensión circunferencial de la ABS*

El nivel de estrés circunferencial aceptable que se puede utilizar para los cálculos se puede determinar utilizando la siguiente ecuación:

$$F_h \leq \eta MEC k_t$$

Donde  $\eta$  es el factor de diseño.

MEC es el esfuerzo de cedencia mínimo especificado.

$k_t$  es el factor de degradación del material debido a la temperatura.

(Cuando la temperatura es mayor a 50[°C]).

Los valores de  $\eta$  están contenidos en la siguiente tabla:

	Tensión circunferencial	Estrés longitudinal	Estrés equivalente
Tuberías para gas y aceite, tuberías y para hidrocarburos líquidos	0.72	0.80	0.90
Tuberías para gas en plataformas que no sean de producción	0.60	0.80	0.90
Tuberías para gas en plataformas productoras	0.50	0.80	0.90

Para calcular la tensión circunferencial utilizamos la siguiente fórmula:

$$F_h = (P_i - P_e)(D - t)/(2t)$$

Donde  $F_h$  es la tensión circunferencial.

$P_i$  y  $P_e$  son la presión interna y externa respectivamente.

$D$  es el diámetro externo nominal de la pared.

$t$  es el espesor mínimo de la pared.

#### *Diseño de presión interna máxima*

La presión hidrostática de prueba, la presión de diseño y la sobrepresión incidental no deben exceder las que establecen la siguientes fórmula debido a que la tubería se puede romper.

$$P_t \leq f_d f_e f_t P_b$$

$$P_d \leq 0.80 P_t$$

$$P_a \leq 0.90 P_t$$

Donde  $f_d$  factor de diseño de presión interna.

0.90 para tuberías.

0.75 para risers.

$f_e$  factor de la junta soldada.

$f_t$  factor de degradación por temperatura.

1.0 para temperaturas menores a 121[°C]

$P_a$  sobrepresión incidental (presión interna menos externa)

$P_b$  mínima presión interna especificada.

$P_d$  presión de diseño de la tubería.

$P_t$  presión hidrostática de prueba.

Tomando esto en cuenta, la presión interna mínima debe es:

$$P_b = 0.90(MEC - MET)\left(\frac{t}{D - t}\right)$$

Donde MET es el estrés de tensión mínimo especificado.

MEC es el esfuerzo de cedencia mínimo especificado.

Y la presión interna máxima que puede soportar la tubería es:

$$P_d \leq 0.80f_d f_e f_t 0.90(MEC - MET)\left(\frac{t}{D - t}\right)$$

### 3.2.3 Diseño para tensión equivalente y colapso hidrostático

#### *Criterio de tensión equivalente*

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{ec} = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_h^2 - \sigma_l \sigma_h + 3\tau_c^2} \leq \eta MEC(T)$$

Donde  $\sigma_l$  es la tensión longitudinal característica.

$\sigma_h$  es la tensión circunferencial característica.

$\eta$  es el factor de diseño.

MEC (T) es el esfuerzo de cedencia mínimo especificado a la temperatura T.

$\tau_c$  es el estrés tangencial característico.

Para esta ecuación, la tensión circunferencial se calcula así:

$$\sigma_h = (\Delta P) \frac{D - t_2}{2t_2}$$

Donde D es el diámetro externo.

$$t_2 \text{ es } t - t_{corr}$$

### *Colapso Hidrostático*

La presión límite externa es igual a la presión de colapso de la tubería y puede ser calculada, basándose en los estándares de la ABS y la DNV , de la siguiente manera:

$$p_i^3 - p_{ei}p_i^2 - \left( p_p^2 + p_{ei}p_p f_o \frac{D}{t} \right) p_i + p_{ei}p_p^2 = 0$$

$$\text{Donde } p_{ei} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left( \frac{t}{D} \right)^3$$

$$P_p = \eta MEC \left( \frac{2t}{D} \right)$$

$$f_o = \left( \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \right) \text{ (pérdida de redondez inicial)}$$

D es el diámetro promedio.

E es el módulo de Young.

$\nu$  es el número de Poisson.

$\eta$  es el factor de fabricación

### **3.3 Grado del material**

De acuerdo a las necesidades particulares de cada línea, su localización y el tipo de fluido que va a transportar, en la industria petrolera se utilizan varios tipos de acero para la fabricación de ductos, desde los aceros al carbón regulados por el Instituto Americano

del Petróleo hasta los aceros más complejos, como el acero dúplex que es una aleación de acero austeno-ferrítico que provee una gran durabilidad y resistencia a la corrosión, aunque su costo es muy elevado.

Los factores más importantes a tener en cuenta durante la selección del material son los siguientes: costo, resistencia a la corrosión, requerimiento de peso y facilidad para soldar. Mientras más alto es el grado del acero, mayor es su costo por volumen, pero en los últimos años el precio de fabricación de los aceros de grado medio-alto ha bajado considerablemente gracias a los avances tecnológicos, lo que ha permitido que cada vez se usen mayores grados en la fabricación de tuberías.

La selección del material a utilizar tendrá un impacto directo en varios factores como la fabricación, instalación y operación de las tuberías.

#### *Fabricación*

A pesar de que el costo del acero se incrementa mientras más alto es el grado, un acero de mayor grado permite la fabricación de tuberías de menor espesor de pared pero con la misma resistencia. Tomando esto en cuenta, muchas veces resulta menos costoso fabricar una tubería de grado mayor.

#### *Instalación*

En cuanto a los costos de instalación, siempre resulta más barato instalar tubería de grado bajo, sobre todo porque son más fáciles de soldar. La ventaja de las de grado alto es que debido a que son menos pesadas son más manejables y se pueden transportar más fácilmente.

#### *Operación*

Las tuberías pueden presentar diversos problemas operativos que se deben principalmente a las características del fluido que transportan.

Los más comunes son la corrosión y erosión interna y la corrosión inducida por ácido sulfhídrico. Es posible no tener que hacer consideraciones para corrosión de acuerdo al grado de material utilizado y a la presencia de inhibidores de corrosión.

*Optimización del grado del material*

La optimización de la selección del grado de material se hace cada vez más necesaria para disminuir los costos, pero se debe hacer un estudio riguroso para poder minimizar los costos de fabricación e instalación y aún así cumplir las especificaciones del diseño

**REFERENCIAS**

**ARNOLD KEN; "Surface Production Operations", Vol.1; Butterworth-Heinemann.**

**YONG Bai, Pipelines and risers; Elsevier 2001.**

**BEGGS Dale; Production Optimization Using Nodal Analysis; OGCI Publications; Tulsa.**