

## CAPÍTULO 4 DISEÑO DE ACUERDO A LA RESISTENCIA A ESFUERZOS

La fuerza longitudinal y las cargas a las que esté sometida la tubería pueden ocasionar que se llegue al llamado “momento límite”, más allá del cual los ductos comienzan a deformarse. A continuación se hace una breve descripción de los factores que intervienen y cómo prevenirlos.

### 4.1 Colapso y pandeo de las tuberías

#### 4.1.1 Presión externa

La corrosión y la deformación elíptica de las tuberías (cuando se ha perdido la forma ideal de las tuberías debido a las presiones que actúan sobre ella) son los dos problemas que causan que disminuya la resistencia de los ductos al colapso.

Por otro lado, la corrosión disminuye la resistencia al pandeo, que es un problema de equilibrio que ocurre cuando las cargas externas son iguales o superiores a la resistencia interna a lo largo de la sección transversal.

Tomando en cuenta estos dos efectos, se desarrolló una ecuación que permite calcular la presión que puede soportar la tubería antes de sufrir una deformación:

$$P_{\gamma}^2 - \left[ \frac{\sigma_{\gamma} h}{r_{av}} \left( 1 + 6 \frac{w_l}{h} \right) p_{e,cr} \right] P_{\gamma} + \frac{\sigma_{\gamma} h}{r_{av}} p_{e,cr} = 0$$

Donde  $p_{e,cr} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{r_{av}} \right)^3$

$P_{\gamma}$  es la presión de cedencia.

$\sigma_{\gamma}$  es el esfuerzo de cedencia.

$h$  es el espesor de la pared defectuosa.

$t$  es el espesor nominal de la pared.

$E$  es el módulo de Young.

$r_{av}$  es el radio promedio de la tubería sin defectos.

$w_l$  es la desviación de la forma circular perfecta.

$\nu$  es la relación de Poisson.

### 4.1.2 Momento de torcimiento

Cuando los ductos son sometidos a diferentes cargas empiezan a deformarse de manera global dentro de los límites elásticos del material, por lo que no se produce un cambio permanente. Si se sobrepasan los límites elásticos del material se empiezan a presentar pandeos locales, principalmente en las regiones que presentan mayor curvatura o que están dañadas por efecto de la corrosión.

Al seguir aumentando las cargas, se sigue deformando global y localmente hasta que se alcanza el punto límite en el cual se llega a la máxima resistencia al torcimiento y se produce el colapso de la tubería.

El momento de torcimiento está en función de los siguientes parámetros: relación entre diámetro y espesor de la tubería, la relación de estrés-tensión del material, imperfecciones del material, soldadura, deformación elíptica inicial, reducción del espesor de pared debido a la corrosión, grietas en el ducto, concentraciones locales de estrés, cargas adicionales.

### 4.1.3 Torcimiento

Cuando una tubería está sometida a torcimiento puro, se presentará un fenómeno por el cual la tubería se va ovalando. Al principio, este fenómeno se ve contrarrestado por el aumento de estrés en la pared debido al endurecimiento por tensión. Cuando se llega a un punto donde no se puede seguir compensando el ovalamiento, la tubería fallará.

La capacidad del momento cuando hay puro torcimiento se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$M_{C(F=0,P=0)} = \left(1.05 - 0 - 0015 \frac{D}{t}\right) MEC D^2 t$$

Donde D es el diámetro promedio de la tubería.

t es el espesor de la pared.

MEC es el esfuerzo de cedencia mínimo especificado.

#### 4.1.4 Presión interna

Cuando se alcanza la presión interna máxima que puede soportar la tubería, reventará en su sección transversal debido a la pérdida de espesor de la pared. De acuerdo al Instituto Americano del Petróleo, la presión de rompimiento se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$P_{rompimiento} = 0.5(MET + MEC) \frac{2t}{D}$$

Donde D es el diámetro promedio de la tubería.

t es el espesor de la pared.

MEC es el esfuerzo de cedencia mínimo especificado.

MET es el estrés de tensión mínimo especificado.

$0.5(MET + MEC) \frac{2t}{D}$  es el estrés circunferencial al momento del rompimiento.

#### 4.1.5 Tensión

El adelgazamiento de la pared cuando se llega al punto crítico de la resistencia a la tensión será el causante del rompimiento de la tubería. La máxima fuerza de tensión que pueden soportar los ductos se calcula así:

$$F_t = A MET$$

Donde A es el área de la sección transversal.

MET es el estrés de tensión mínimo especificado.

#### 4.1.6 Compresión

Cuando la tubería está sometida a grandes esfuerzos compresivos, sufrirá un pandeo o torcimiento de Euler, que al llegar a un punto crítico provocará que la tubería se rompa

debido al pandeo local. Como la tubería normalmente se encuentra restringida por todas partes menos en la dirección longitudinal, la máxima fuerza compresiva será igual a la máxima fuerza de tensión que puede resistir.

Para calcular la resistencia del ducto a la compresión utilizamos esta expresión:

$$F_c = MET A$$

Donde A es el área de la sección transversal.

MET es el estrés de tensión mínimo especificado.

#### **4.2 Diseño de ductos basado en el estado límite de resistencia**

Además de los factores inherentes a la tubería, como el material con que fue construida, el espesor y el diámetro, hay otros elementos que intervienen en la resistencia y correcta operación de los ductos, que son los llamados factores de uso.

Los que se toman en cuenta normalmente para el diseño son los siguientes: la deformación elíptica debida al uso, el rompimiento debido a la presión interna, fuerza longitudinal y torcimiento, el colapso, la fractura de la soldadura debida al torcimiento y a la tensión, fatiga debido a los cierres y el estrés plástico acumulado.

Como las tuberías operan bajo diferentes condiciones es necesario conocer la resistencia máxima en cada uno de ellos. Los escenarios operativos que se analizan para el diseño son: tubería vacía, tubería llena de agua, prueba de presión y condiciones operativas.

En cuanto a los factores seguridad, se pueden distinguir dos tipos de rutas para las tuberías, la ruta tipo 1 se refiere a una zona donde no se espera mucha actividad humana cerca de los ductos y por tanto la seguridad no es tan estricta y se le llama “zona de seguridad normal”, mientras que la tipo 2 es una zona de más riesgo, ya que se encuentra siempre rodeada de gran actividad humana y de equipo, por lo que se considera una “zona de alta seguridad”, por lo que se debe poner mucho más cuidado en el diseño para asegurarse que no habrá accidentes.

Durante la etapa de construcción de la línea, todas las rutas se consideran como “zona de baja seguridad”, debido a que las tuberías en ese momento no contienen hidrocarburos.

#### 4.2.1 Límite de deformación elíptica

La deformación elíptica es la desviación de la tubería de su forma circular original hacia una forma elíptica u ovalada. El grado de deformación está relacionado con el diámetro máximo y el diámetro mínimo de la tubería medidos desde diferentes partes de la circunferencia seccional.

Los factores que pueden aumentar la deformación elíptica son: el torcimiento invertido inelástico que se produce durante la instalación y el torcimiento cíclico que puede ocurrir cuando se cierra la línea al flujo y se permite el pandeo global para liberar la presión y reducir la temperatura debido a las fuerzas compresivas.

Durante el proceso de fabricación, la deformación elíptica no debe exceder el 1.5% y en el transcurso de toda la vida útil de la tubería no debe exceder el 4%, ya que esto ocasiona problemas de inspección y mantenimiento, obstruye las corridas de diablo y se reduce la capacidad de flujo.

La fórmula que permite calcular la deformación es:

$$f_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D}$$

#### 4.2.2 Estallamiento

Para evitar que las tuberías estallen hay que tener en cuenta diversos factores. La falla por estallamiento se debe principalmente a la acción de la presión interna y el torcimiento o a una combinación de presión interna y cargas axiales. Es necesario mantenerse por debajo de los niveles especificados del esfuerzo de cedencia y la tensión de acuerdo al material con que fue fabricado el ducto.

La tensión circunferencial debe cumplir el siguiente requisito:

$$(p_i - p_e) \frac{D - t}{2t} \leq \eta_s \min [MEC(T), 0.87MET(T)]$$

Donde  $D$  es el diámetro promedio de la tubería.

$t$  es el espesor de la pared.

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

$MET(T)$  es el estrés de tensión mínimo especificado a la temperatura  $T$ .

$p_i$  es la presión interna.

$p_e$  es la presión externa.

$\eta_s$  es el factor de uso para el esfuerzo de cedencia mínimo especificado.

Los valores del factor de uso se asignan de acuerdo a la siguiente tabla:

Clase del material	Factor de uso	Zona de Baja Seguridad	Zona de Seguridad Media	Zona de Alta seguridad
Clases B y C	$\eta_s$	0.85	0.80	0.70
Clase A	$\eta_s$	0.83	0.77	0.67

Mientras que el criterio de estrés nos dice que en situaciones de una excesiva presión interna, tanto el estrés equivalente permisible como el estrés longitudinal permisible se calculan con el siguiente producto:  $\eta MEC(T)$ , utilizando el factor de diseño como se muestra:

Combinaciones de cargas a las que está sometida la tubería	Factor de Diseño $\eta$
Cargas ambientales y de construcción	1.0
Cargas funcionales y ambientales	0.9
Cargas funcionales, ambientales y accidentales	1.0

#### 4.2.3 Colapso y Pandeo local

Cuando las líneas están sometidas a fuerzas longitudinales, torcimiento y presión se puede presentar el pandeo local, lo que provoca el pandeo en el lado compresivo del ducto o la cedencia de la sección transversal. La deformación elíptica y las cargas cíclicas derivadas de la operación pueden agravar el pandeo local.

El *máximo momento de torcimiento* permisible se puede calcular con esta expresión:

$$M_{permisible(f.p)} = \frac{\eta_{RM}}{\gamma_c} M_p \sqrt{1 - (1 - \alpha^2) \left(\frac{p}{\eta_{RP}}\right)^2} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\frac{\gamma_c F}{\eta_{RP} F_t} - \alpha \frac{P}{\eta_{RP} P_l}}{\sqrt{1 - (1 - \alpha^2) \left(\frac{p}{\eta_{RP}}\right)^2}}\right)$$

Donde  $M_{permisible}$  es el máximo momento de torcimiento permisible.

$M_p$  es el momento plástico.

$P_l$  es la presión límite.

$p$  es la presión que actúa en la tubería.

$F_t$  es la fuerza longitudinal límite.

$F$  es la fuerza longitudinal que actúa en la tubería.

$\alpha$  es el factor de corrección.

$\gamma_c$  es el factor de condición de carga.

$\eta_R$  es el factor de fuerza de uso.

El valor del factor de corrección se calcula de la siguiente forma de acuerdo a cómo está actuando la presión sobre la tubería:

$$\alpha = 0.25 \frac{P_l}{F_t} \text{ cuando hay sobrepresión externa o interna.}$$

También hay que calcular los demás factores de resistencia límite de los ductos, para evitar deformaciones y problemas operativos:

El *momento plástico límite* se calcula de la siguiente forma:

$$M_{C(F=0)} = \left(1.05 - 0.0015 \frac{D}{t}\right) MEC D^2 t$$

Y el valor de la *fuerza longitudinal límite* se obtiene así:

$$F_l = 0.5 (MEC + MET) A$$

La *presión límite para una condición de sobrepresión externa* se puede calcular utilizando esta ecuación:

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

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

$$p_p = \eta_{fab} MEC \left( \frac{2t}{D} \right)^3$$

$f_o$  es la deformación elíptica inicial,  $\frac{(D_{max}-D_{min})}{D}$

E es el módulo de Young.

$\nu$  es la relación de Poisson.

El valor de  $\eta_{fab}$  es un factor de uso que depende del proceso de fabricación, 1.0 para tuberías sin costuras, 0.85 para las tuberías fabricadas por el proceso UOE donde se suelda interna y externamente la tubería y luego se somete a un proceso de expansión en frío y 0.925 para las tuberías fabricadas por el proceso "UO" en el que se utiliza una prensa en forma de "U" y posteriormente una en forma de "O" para moldear la tubería y se hace el soldado mediante arco sumergido.

La *presión límite para una condición de sobrepresión interna* será igual a la presión de estallamiento dada por:

$$p_l = 0.5(MET - MEC) \frac{2t}{D}$$



En la siguiente tabla encontramos los valores de los factores de carga y uso:

Simbolo	Factor	Seguridad Baja	Seguridad Normal	Seguridad Alta
$\gamma_c$	Lecho marino irregular	1.07	1.07	1.07
$\gamma_c$	Prueba de Presión	0.93	0.93	0.93
$\gamma_c$	Soportado rígidamente	0.82	0.82	0.82
$\gamma_c$	Cualquier otro caso diferente	1.00	1.00	1.00
$\eta_R$	Presión	0.95	0.93	0.90
$\eta_R$	Fuerza longitudinal	0.90	0.85	0.80
$\eta_R$	Momento	0.80	0.73	0.65

Cuando se presenta más de uno de estos fenómenos, se pueden combinar los factores multiplicándolos. Por ejemplo, si se presentan condiciones de carga sobre una tubería para pruebas de presión, que descansa sobre un lecho marino irregular el factor se calcula como  $0.93 \times 1.07 = 0.995$

#### 4.2.4 Fatiga

Las tuberías y sus componentes deben ser evaluados para el daño por fatiga para evitar que fallen. Entre las causas más comunes de la fatiga están las vibraciones, las cargas de presión cíclicas y las cargas por expansión térmica.

La vida útil pre-fatiga se refiere al tiempo que se tarda en desarrollarse una grieta a través de todo el espesor de la pared.

Los cálculos para analizar la fatiga están basados en las curvas S-N y se definen mediante la siguiente fórmula:

$$\log N = \log a - m \log \Delta \sigma$$

Donde  $N$  es el número de ciclos de estrés permisibles.

$a$  y  $m$  son parámetros que definen las curvas, dependientes del material.

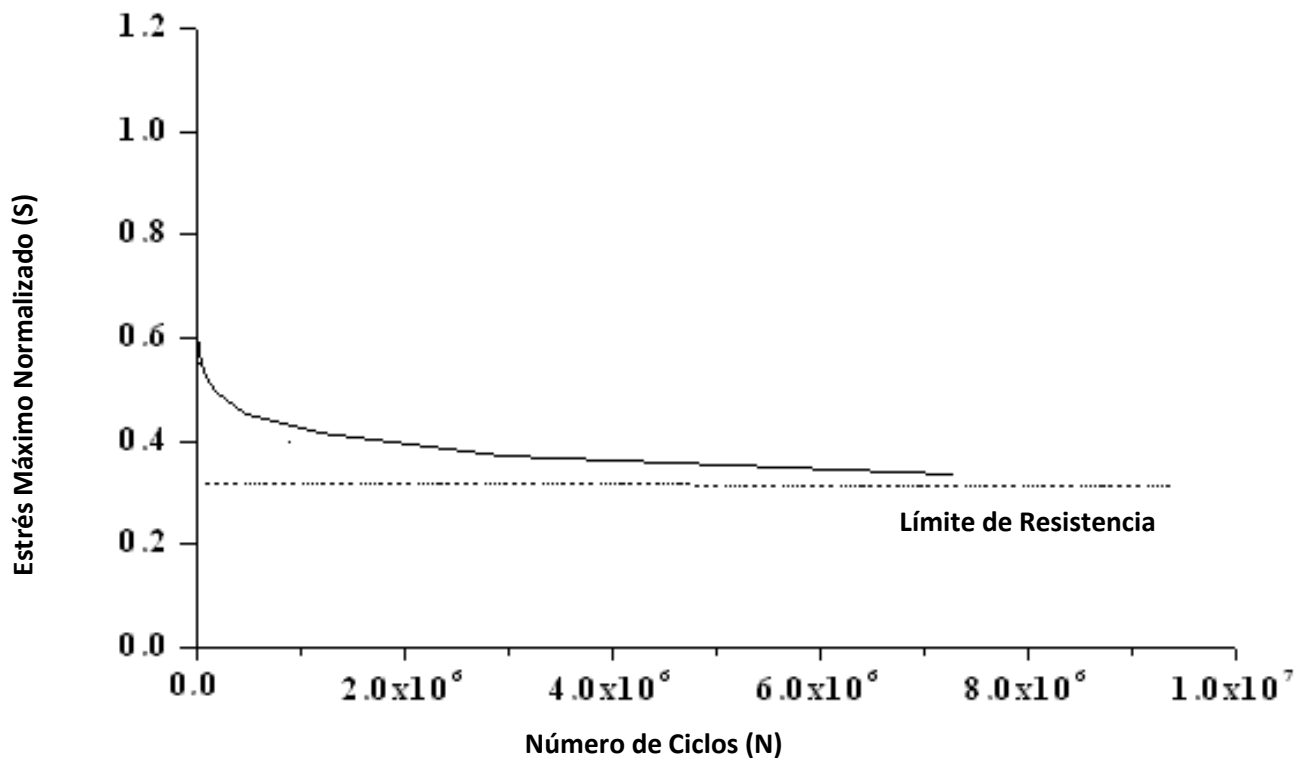
$\Delta\sigma$  es el rango de estrés, incluyendo los factores de concentración.

Si el espesor de la tubería excede los 22 [mm] la curva S-N toma la siguiente forma:

$$\log N = \log a - \frac{m}{4} \log \frac{t}{22} - m \log \Delta\sigma$$

Donde  $t$  es el espesor nominal de la tubería.

Una curva S-N típica sería de la siguiente forma:



El daño por fatiga se puede asociar a la ley de acumulación de Palmgren-Miner que dice:

$$D_{fat} = \sum_{i=1}^{M_c} \frac{n_i}{N_i} \leq \eta$$

Donde  $D_{fat}$  es el daño por fatiga acumulado.

$\eta$  es la relación de daño permisible, debe ser tomada como 0.1

$N_i$  es el número de ciclos hasta la falla al  $i$ -ésimo rango de estrés definido por la curva S-N.

$n_i$  es el número de ciclos de estrés con el rango de ciclos en el bloque  $i$ .

El rango de estrés en el umbral de falla  $S_o$  se especifica como el punto abajo del cual no aumenta el tamaño de la grieta o se produce daño por fatiga.

#### 4.2.5 Deformación plástica

Se refiere a la deformación plástica significativa provocada por las cargas cíclicas en tuberías expuestas a alta presión y alta temperatura. El efecto que tiene esta deformación sobre la deformación elástica inicial, el pandeo local y la fractura es considerable.

Se pueden diferenciar dos tipos de deformación elástica:

1.- Deformación elástica cuando la tubería se expande radialmente: es el resultado de la inversión del torcimiento en las tuberías operadas a alta presión interna y alta temperatura. El límite permisible de esta deformación es del 0.5%

2.- Deformación elástica de curvatura u ovalamiento debido al curvamiento cíclico y a la presión externa. El ovalamiento acumulativo el valor crítico que corresponde al torcimiento local.

Un código simplificado basado en un material elástico, perfectamente plástico, indica que la deformación plástica no debe exceder el 0.1%, asumiendo el nivel de referencia cero como el estado original de la tubería después de su construcción.

#### 4.2.6 Deformación plástica acumulada

Si se excede el límite de cedencia, la tubería va a acumular estrés plástico, el cual puede reducir la ductilidad y la resistencia del material, es por eso que periódicamente se deben realizar pruebas de deformación plástica por la edad y de resistencia.

La deformación plástica acumulada se define como la suma de los incrementos de deformación sin importar el signo o la dirección. Los incrementos deben ser calculados desde el punto en que la curva de estrés-deformación del material se desvía de su relación lineal y la deformación acumulada se calcula desde el momento de la fabricación hasta el final de su vida útil. El objetivo de limitar la deformación plástica acumulada es evitar que las propiedades del material con que fue construido el ducto se reduzcan.

La deformación plástica acumulada también puede provocar que se incremente la dureza del material, lo que lo haría más susceptible a agrietarse debido al estrés y a la corrosión, principalmente en presencia de  $H_2S$ .

Debido a las consideraciones de acuerdo al tipo de material, el nivel de deformación permanente y plástica permisible es del 2%. En caso de que se exceda este límite, el material debe ser sometido regularmente a pruebas de deformación por el tiempo de uso. De cualquier manera, se ha comprobado recientemente que una deformación plástica acumulada de entre 5 y 10% puede ser aceptable.

#### 4.2.7 Fractura

Para hacer los cálculos de fractura las partes soldadas es recomendable utilizar el método de valoración de aceptabilidad de fallas en las estructuras soldadas.

Este método se apoya en el diagrama de evaluación de fallas, que combina los dos tipos de fallas que podrían presentarse, falla por quiebre y colapso plástico, e indica hasta que

punto estas fallas son aceptables. La gráfica provee un medio para determinar el estrés crítico de acuerdo al defecto y al material.

Es necesario convertir el estrés crítico en torcimiento crítico, esto se hace mediante la ecuación de Ramberg-Osgood:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 + \frac{3}{7} \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.7}} \right)^{n-1} \right]$$

Donde  $\sigma_{0.7} = 430$  [MPa] a 20 [°C]

n= factor que varía de acuerdo al grado del material.

La corrosión puede reducir en gran medida el valor crítico de fractura si hay una falla en la superficie de la soldadura corroída, tanto que si no presenta corrosión o es muy poca el valor puede alcanzar hasta el 0.5%, mientras que si hay corrosión significativa, el valor decrece hasta el 0.1%.

Se ha observado que todos los cálculos para la evaluación de falla conducen a que  $S_r = 1$ , donde:

$$S_r = \frac{\sigma_{cr}}{\frac{1 - \left(\frac{a}{t}\right)}{1 + \frac{t}{c}}}$$

Donde  $\sigma_{cr}$  es el estrés crítico.

a es la profundidad del defecto.

c es la mitad del espesor del defecto.

t es el espesor de la pared.

## **REFERENCIAS**

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

**GUO Boyun; Petroleum Production Engineering: A computer assisted approach; Elsevier Science and Technology Books; USA 2007.**