

GUÍA PARA EL DISEÑO DE TUBERÍAS

Consideraciones generales y criterios de diseño

El diseño de un sistema de tuberías consiste en el diseño de sus tuberías, brida y su tortillería, empaaduras, válvulas, accesorios, filtros, trampas de vapor juntas de expansión. También incluye el diseño de los elementos de soporte, tales como zapatas, resortes y colgantes, pero no incluye el de estructuras para fijar los soportes, tales como fundaciones, armaduras o pórticos de acero.

Aun en el caso en que los soportes sean diseñados por un ingeniero estructural, el diseñador mecánico de la tubería debe conocer el diseño de los mismos, por la interacción directa entre tuberías y soportes.

Procedimiento de diseño de tuberías

La lista siguiente muestra los pasos que deben completarse en el diseño mecánico de cualquier sistema de tuberías:

- a) Establecimiento de las condiciones de diseño incluyendo presión, temperaturas y otras condiciones, tales como la velocidad del viento, movimientos sísmicos, choques de fluido, gradientes térmicos y número de ciclos de varias cargas.
- b) Determinación del diámetro de la tubería, el cual depende fundamentalmente de las condiciones del proceso, es decir, del caudal, la velocidad y la presión del fluido.
- c) Selección de los materiales de la tubería con base en corrosión, fragilización y resistencia.
- d) Selección de las clases de "rating" de bridas y válvulas.
- e) Cálculo del espesor mínimo de pared (Schedule) para las temperaturas y presiones de diseño, de manera que la tubería sea capaz de soportar los esfuerzos tangenciales producidos por la presión del fluido.

- f) Establecimiento de una configuración aceptable de soportes para el sistema de tuberías.
- g) Análisis de esfuerzos por flexibilidad para verificar que los esfuerzos producidos en la tubería por los distintos tipos de carga estén dentro de los valores admisibles, a objeto de comprobar que las cargas sobre los equipos no sobrepasen los valores límites, satisfaciendo así los criterios del código a emplear.

Si el sistema no posee suficiente flexibilidad y/o no es capaz de resistir las cargas sometidas (efectos de la gravedad) o las cargas ocasionales (sismos y vientos), se dispone de los siguientes recursos:

- a) Reubicación de soportes
- b) Modificación del tipo de soporte en puntos específicos
- c) Utilización de soportes flexibles
- d) Modificación parcial del recorrido de la línea en zonas específicas
- e) Utilización de lazos de expansión
- f) Presentado en frío

El análisis de flexibilidad tiene por objeto verificar que los esfuerzos en la tubería, los esfuerzos en componentes locales del sistema y las fuerzas y momentos en los puntos terminales, estén dentro de límites aceptables, en todas las fases de operación normal y anormal, durante toda la vida de la planta.

Normas de diseño

Las normas más utilizadas en el análisis de sistemas de tuberías son las normas conjuntas del American Estándar Institute y la American Society of Mechanical Engineers ANSI/ASME B31.1, B31.3, etc. Cada uno de estos códigos recoge la experiencia de numerosas empresas especializadas, investigadores, ingenieros de proyectos e ingenieros de campo en áreas de aplicación específicas, a saber:

- B31.1. (1989) Power Piping
- B31.3 (1990) Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping
- B31.4 (1989) Liquid Transportation System for Hydrocarbons, Petroleum Gas, Anhydrous Ammonia and Alcohols
- B31.5 (1987) Refrigeration Piping
- B31.8 (1989) Gas Transmission and Distribution Piping System
- B31.9 (1988) Building Services Piping
- B31.11 (1986) Slurry Transportation Piping System

En lo que concierne al diseño todas las normas son muy parecidas, existiendo algunas discrepancias con relación a las condiciones de diseño, al cálculo de los esfuerzos y a los factores admisibles

Cargas de diseño para tuberías

Un sistema de tuberías constituye una estructura especial irregular y ciertos esfuerzos pueden ser introducidos inicialmente durante la fase de construcción y montaje. También ocurren esfuerzos debido a circunstancias operacionales. A continuación se resumen las posibles cargas típicas que deben considerarse en el diseño de tuberías.

Cargas por la presión de diseño

Es la carga debido a la presión en la condición más severa, interna o externa a la temperatura coincidente con esa condición durante la operación normal.

Cargas por peso

- a) Peso muerto incluyendo tubería, accesorios, aislamiento, etc.
- b) Cargas vivas impuestas por el flujo de prueba o de proceso
- c) Efectos locales debido a las reacciones en los soportes

Cargas dinámicas

- a) Cargas por efecto del viento, ejercidas sobre el sistema de tuberías expuesto al viento
- b) Cargas sísmicas que deberán ser consideradas para aquellos sistemas ubicados en áreas con probabilidad de movimientos sísmicos
- c) Cargas por impacto u ondas de presión, tales como los efectos del golpe de ariete, caídas bruscas de presión o descarga de fluidos
- d) Vibraciones excesivas inducidas por pulsaciones de presión, por variaciones en las características del fluido, por resonancia causada por excitaciones de maquinarias o del viento.

Este tipo de cargas no será considerado ya que forman parte de análisis dinámicos y en este proyecto sólo se realizarán análisis estáticos.

Efectos de la expansión y/o contracción térmica

- a) Cargas térmicas y de fricción inducidas por la restricción al movimiento de expansión térmica de la tubería
- b) Cargas inducidas por un gradiente térmico severo o diferencia en las características de expansión (diferentes materiales)

Efectos de los Soportes, Anclajes y Movimiento en los Terminales

- a) Expansión térmica de los equipos
- b) Asentamiento de las fundaciones de los equipos y/o soportes de las tuberías

Esfuerzos admisibles

Los esfuerzos admisibles se definen en términos de las propiedades de resistencia mecánica del material, obtenidas en ensayos de tracción para diferentes niveles de temperatura y de un factor de seguridad global.

La norma ASME B31.3 estipula dos criterios para el esfuerzo admisible. Uno es el llamado "esfuerzo básico admisible" en tensión a la temperatura de diseño, con la cual están familiarizados los que se dedican al diseño de equipos sometidos a presión, es menos conocido y se le denomina "rango de esfuerzo admisible", el cual se deriva del esfuerzo básico admisible y se emplea como base para el cálculo de la expansión térmica y para el análisis de flexibilidad.

La aplicación de cada criterio es como se observa en la tabla 1:

Tabla N° 1:

Esfuerzos Admisibles en Función de las Cargas

Para cargas aplicadas	Esfuerzos Admisibles
Esfuerzos de pared circunferenciales producidos por la presión; no deben exceder	S.E.
Esfuerzos longitudinales combinados, producidos por la presión, peso y otras cargas; no deben exceder	S

Donde:

S = Esfuerzo básico admisible a la temperatura de diseño, para el material seleccionado

E = Eficiencia de la soldadura longitudinal o factor de calidad de la fundición asociada con el diseño específico y los requerimientos de inspección

Estos esfuerzos admisibles básicos, así como el límite de fluencia y la resistencia a la tracción, están listados en el Apéndice A, Tabla A-1 y A-2, del Código B31.3 en función de la temperatura. Por ejemplo, para el acero A-106-Grado B se tiene que el límite de fluencia es, $S_y = 35$ KPsi (241,317 MPa), y la resistencia a la tracción es $S_u = 60$ KPsi (413,685 MPa).

El esfuerzo admisible básico en función a la temperatura es como se observa en la tabla 2:

Tabla N° 2

Esfuerzos Admisibles en Función de la Temperatura

Esfuerzos Admisibles, S		Temperatura, T	
Kpsi	Mpa	°F	°C
20.0	137.90	400	204.44
18.9	130.31	500	260.00
17.3	119.28	600	315.56
17.0	117.21	650	343.33
16.5	113.76	700	371.11
13.0	089.63	750	398.89

Los esfuerzos admisibles para cargas térmicas son como se observan en la tabla 3:

Tabla N° 3: Rango de Esfuerzo Admisible

Para cargas térmicas	Rango de esfuerzo admisible
Los esfuerzos de expansión no deben exceder	S_A

Donde;

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h)$$

S_c = Esfuerzo básico admisible para el material a la mínima temperatura esperada del metal durante el ciclo de desplazamiento

S_h = Esfuerzo básico admisible para el material a la máxima temperatura esperada del metal durante el ciclo de desplazamiento

f = Factor de reducción del rango admisible de esfuerzo para condiciones cíclicas según el número total de ciclos completos de cambios de temperatura sobre la vida esperada.

Este factor es 1.0 para 7000 ciclos o menos, lo cual es un caso típico en refinerías.

Cuando S_h es mayor que σ_L , (esfuerzos longitudinales combinados), la diferencia entre ellos debe sumarse al término $(0,25 S_h)$ por lo que la expresión S_A queda:

$$S_A = f [1,25 (S_c + S_h) - S_L]$$

Presión de diseño

La presión de diseño no será menor que la presión a las condiciones más severas de presión y temperatura coincidentes, externa o internamente, que se espere en operación normal.

La condición más severa de presión y temperatura coincidente, es aquella condición que resulte en el mayor espesor requerido y en la clasificación ("rating") más alta de los componentes del sistema de tuberías.

Se debe excluir la pérdida involuntaria de presión, externa o interna, que cause máxima diferencia de presión.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño es la temperatura del metal que representa la condición más severa de presión y temperatura coincidentes. Los requisitos para determinar la temperatura del metal de diseño para tuberías son como sigue:

Para componentes de tubería con aislamiento externo, la temperatura del metal para diseño será la máxima temperatura de diseño del fluido contenido.

Para componentes de tubería sin aislamiento externo y sin revestimiento interno, con fluidos a temperaturas de 32°F (0°C) y mayores, la temperatura del metal para diseño será la máxima temperatura de diseño del fluido reducida, según los porcentajes de la tabla 4.

Tabla N° 4

Reducción de Temperatura para Componentes sin Aislamiento

Componente	$\sigma T\%$
Válvulas, tubería, uniones solapadas y accesorios soldados	5
Accesorios bridados	10
Bridas (en línea)	10
Bridas de uniones solapadas	15
Empacaduras (en uniones en línea)	10
Pernos (en uniones en línea)	20
Empacaduras (en casquetes de válvulas)	15
Pernos (en casquete de válvulas)	30

Fuente: Álvarez (2003)

Para temperaturas de fluidos menores de 32°F (0°C), la temperatura del metal para el diseño, será la temperatura de diseño del fluido contenido.

Para tuberías aisladas internamente la temperatura será especificada o será calculada usando la temperatura ambiental máxima sin viento (velocidad cero).

Espesor de pared

El mínimo espesor de pared para cualquier tubo sometido a presión interna o externa es una función de:

- a) El esfuerzo permisible para el material del tubo
- b) Presión de diseño
- c) Diámetro de diseño del tubo
- d) Diámetro de la corrosión y/o erosión

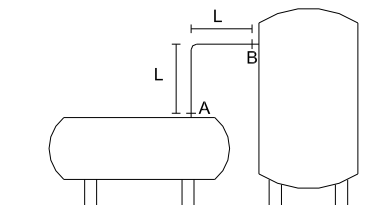
Además, el espesor de pared de un tubo sometido a presión externa es una función de la longitud del tubo, pues ésta influye en la resistencia al colapso del tubo. El mínimo espesor de pared de cualquier tubo debe incluir la tolerancia apropiada de fabricación.

Flexibilidad en sistemas de tuberías

Consideraciones generales

Con el fin de introducir los conceptos e ideas fundamentales que se manejan en el análisis de esfuerzos en sistemas de tuberías, se tomará como punto de partida un sistema sencillo como el mostrado en la figura 1.

Figura 1: Sistema de Tuberías Simple



Sea p la presión interna del fluido en la tubería y sea T la temperatura de diseño. Se designará como T_a a la temperatura ambiente. Cuando el sistema entra en operación, la presión se eleva hasta p y la temperatura cambia de T_a a T , generándose esfuerzos en el sistema. La presión interna p genera esfuerzos tangenciales y longitudinales, mientras que el cambio de temperatura $\sigma_T = T - T_a$, genera esfuerzos longitudinales de origen térmico tienen lugar debido a que la tubería no puede expandirse (o contraerse) libremente a consecuencia de encontrarse restringida en su desplazamiento a causa de los soportes y de su conexión a los equipos que conforman el sistema.

Si adicionalmente se considera el efecto del peso de la tubería, así como el de su contenido se tendrá también la presencia de esfuerzos longitudinales y de corte análogos a los producidos por la expansión térmica.

Todos estos estados de cargas deben considerarse en el análisis de un sistema de tubería. Como regla general, el esfuerzo más limitante y de mayor relevancia es el de la expansión térmica.

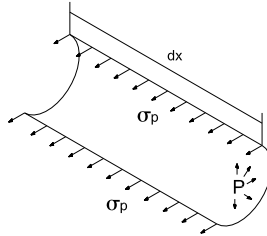
Esfuerzos por Presión (Hoop)

La presión del fluido dentro de la tubería produce un esfuerzo tangencial o circunferencial σ_{Lp} que ocasiona un aumento en el diámetro de la tubería, y un esfuerzo longitudinal σ_{Lp} que produce un aumento en la longitud de la misma.

Si el espesor t de la tubería es pequeño comparado con el diámetro exterior D ($D/t > 6$), puede suponerse que estos esfuerzos se distribuyen uniformemente a lo largo del espesor.

Para determinar el esfuerzo tangencial σ_p , se pasa un plano longitudinal imaginario que divida a la tubería en dos partes iguales. La figura 2 muestra el diagrama del cuerpo libre.

Figura 2: Diagrama de cuerpo libre de una tubería



La fuerza resultante de los esfuerzos tangencial σ_p debe estar en equilibrio con la resultante de la presión interna p sobre la mitad de la superficie de la tubería. Esto es:

$$2(\sigma_p \cdot t dx) = p \cdot D dx$$

De aquí se tiene que:

$$\sigma_p = \frac{P \cdot D}{2t}$$

En los códigos B31.3 y B31.3 esta ecuación es ajustada en dos sentidos:

Dado que en realidad σ_p no es uniforme a lo largo del espesor, el valor dado por la ec (7) puede tomarse como un valor promedio. Ahora bien, ¿qué diámetro debe tomarse?

Si se usa el diámetro interno d , se tendría:

$$\sigma_p = \frac{p \cdot d}{2t} = \frac{p(D - 2t)}{2t} = \frac{p \cdot D}{2t} - p$$

Si se usa el diámetro medio d_m , se obtendría:

$$\sigma_p = \frac{p \cdot d_m}{2t} = \frac{p(D - t)}{2t} = \frac{p \cdot D}{2t} - \frac{1p}{2}$$

Por último, si se usa el diámetro externo se tendría como resultado la ec (9).

Los códigos establecen que el esfuerzo por presión debe calcularse como:

$$\sigma_p = \frac{P \cdot D}{2t} - Y \cdot p$$

Donde Y es un factor que depende de la temperatura de diseño y del tipo de material. En la tabla 5 se muestra este factor para diversas temperaturas. Observe que en un amplio rango de temperaturas de diseño $Y = 0.4$, con lo cual la ecuación recomendada se acerca a la deducida utilizando el diámetro medio.

Tabla Nº 5 : Factor Y para $t \leq D/6$

Temperatura (°F)	<900	<950	<1000	<1050	<1100	<1150
Aceros ferríticos	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Aceros austeníticos	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Otros materiales dúctiles	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

Para que la tubería no falle por presión,

$$P < E \cdot S$$

Donde $S_p = ES$, es el esfuerzo admisible por presión, S es el esfuerzo admisible básico a la temperatura de diseño y E es el llamado factor de calidad. Este factor e se interpreta, según sea el caso, como un factor de calidad de la función E_c para tuberías de hierro fundido o como un factor de calidad de la soldadura E_j , para tuberías de acero con costuras. Estos factores de calidad están tabulados en los códigos para diferentes casos. Generalmente $E_c = 0.80$ y $0.60 < E_j < 1.0$

Esfuerzos por cargas sostenidas (Gravedad)

Los esfuerzos por cargas sostenidas son aquellos esfuerzos longitudinales producidos por la presión, el peso de la tubería, su contenido, el aislante y otras cargas de gravedad tales como el peso de las válvulas, bridas, filtros, etc.

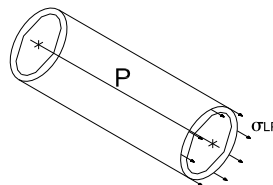
Este esfuerzo puede expresarse como:

$$\sigma_L = \sigma_{LP} + \sigma_{Lg}$$

donde σ_{LP} es el esfuerzo longitudinal debido a la presión y σ_{Lg} es el esfuerzo longitudinal debido a las cargas de gravedad.

Para evaluar σ_{LP} se pasa un plano imaginario transversal y se hace un diagrama de cuerpo libre, como se muestra en la figura 3.

Figura 3: Esfuerzo por cargas sostenidas



Escribiendo la ecuación de equilibrio de fuerzas en la dirección longitudinal se tiene:

$$p \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \sigma_{Lp} \cdot \pi \cdot D \cdot t \quad (15)$$

de donde:

$$\sigma_{Lp} = \frac{p \cdot D}{4t} \quad (16)$$

El código establece que debe usarse como espesor $t - t_c$ - Luego

$$\sigma_{Lp} = \frac{p \cdot D}{4(t - t_c)} \quad (17)$$

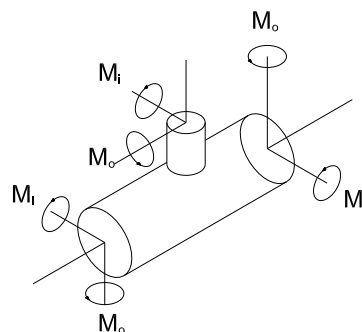
El peso de la tubería y de otras cargas concentradas genera en cada sección transversal de la tubería momentos flectores M_i y M_o (figura 5)

En general, cuando una viga está sometida a flexión pura por un momento flector M , los esfuerzos se distribuyen de acuerdo con la ecuación

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (18)$$

donde M es el momento flector, "y" es la distancia del eje centroidal al punto donde se desea calcular el esfuerzo e I es el momento de inercia de la sección transversal. El esfuerzo máximo ocurre en el punto más alejado del eje centroidal, esto es, en $y = D/2$.

Figura 4: Momentos en conexiones



Entonces,

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot D}{2I} \quad (19)$$

O bien,

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z} \quad (20)$$

donde:

$$Z = \frac{I}{D/2} \quad (21)$$

es el módulo de sección.

En este caso,

$$M = \sqrt{(i_i \cdot M_i)^2 + (i_o \cdot M_o)^2} \quad (22)$$

$$Z = \frac{\frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)}{\frac{D}{2}} \quad (23)$$

Luego,

$$\sigma_{Lg} = \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_i)^2 + (i_o \cdot M_o)^2}}{Z} \quad (24)$$

Usando las ecuaciones (17) y (24) se puede determinar el esfuerzo total longitudinal por cargas sostenidas. El código B31.3 establece que este esfuerzo viene dado por:

$$\sigma_L = \frac{P \cdot D}{4(t - t_c)} + \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_i)^2 + (i_o \cdot M_o)^2}}{Z_c} \quad (25)$$

donde:

M_i = Momento flector en el plano

M_o = Momento flector del plano

i_i = Factor de intensificación de esfuerzos en el plano

i_o = Factor de intensificación de esfuerzos fuera del plano

Z_c = Módulo de sección basado en $t - t_c$, esto es:

$$Z_c = \frac{\pi}{32D} [D^4 - (D - 2t - 2t_c)^4] \quad (26)$$

Los factores de intensificación de esfuerzos se observan en los anexos. Para que la tubería no falle debido al efecto de las cargas sostenidas, debe cumplirse que:

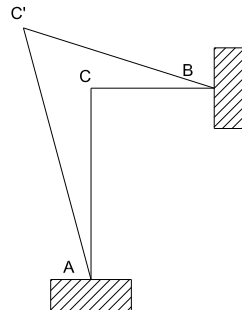
$$\sigma_L \leq S_h \quad (27)$$

Donde S_h es el esfuerzo admisible básico a la temperatura de diseño.

Esfuerzos por cargas de expansión

Cuando la temperatura del sistema se eleva desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación, la tubería se expande. Debido a que no puede hacerlo libremente por las restricciones impuestas por los equipos y soportes, se dobla y se tuerce (figura 5), generándose momentos flectores M_i y M_o , así como un momento torsor M_t en cada sección transversal de la tubería.

Figura 5: Esfuerzos por Expansión



Los momentos flectores M_i y M_o , producen un esfuerzo máximo longitudinal,

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_i)^2 + (i_o \cdot M_o)^2}}{Z} \quad (28)$$

Mientras que el momento torsor M_t genera un esfuerzo máximo de corte

$$\tau_t = \frac{M_t}{2Z} \quad (29)$$

Ambos esfuerzos se calculan utilizando el espesor nominal. Para analizar la resistencia de la tubería sujeta a este estado combinado de cargas debe utilizarse una teoría de fallas. El código B31.3 utiliza la *Teoría del Esfuerzo de Corte Máximo (Teoría de Tresca)*, la cual establece que para que no se produzca una falla, el esfuerzo de corte máximo real debe ser menor que el esfuerzo de corte máximo en el ensayo de tracción para un nivel determinado de carga.

Para determinar el esfuerzo de corte máximo en la tubería se tienen que evaluar primero los esfuerzos principales:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau_t^2} \quad (30)$$

Entonces,

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau_t^2} \quad (31)$$

Para que el material no falle,

$$\sigma_E = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + 4\tau_t^2} \leq \frac{S_A}{2} \quad (32)$$

O bien:

$$\sigma_E = \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + 4\tau_t^2} \leq S_A \quad (33)$$

donde σ_E se denomina esfuerzo de expansión y S_A es el esfuerzo admisible de expansión, el cual viene dado por:

$$S_A = f(1,25S_c + 0,25S_h) \quad (34)$$

donde:

S_c = Esfuerzo admisible del material de la tubería en la condición fría del apéndice del código ASME B31.3, Psi

S_h = Esfuerzo admisible del material de la tubería en la condición caliente del apéndice del código ASME B31.3, Psi.

f = Factor de reducción del rango de esfuerzo admisible para el número total de ciclos de temperatura durante la vida esperada.

Por vida esperada se entiende el total de años durante el cual se presume que el sistema estará operando.

Los códigos establecen que si el esfuerzo longitudinal por cargas sostenidas es inferior al esfuerzo admisible, es decir, si $\sigma_L < S_h$, entonces la diferencia $S_h - S_L$ puede agregarse al esfuerzo admisible S_A . Luego

Tabla N° 6

Factor f de Reducción por Cargas Cíclicas

Número de ciclos N	f
$N \leq 7000$	1.0
$7000 < N \leq 14000$	0.9
$14000 < N \leq 22000$	0.8
$22000 < N \leq 45000$	0.7
$45000 < N \leq 100000$	0.6
$N > 100000$	0.5

$$S_A = f [1,25S_c + 0,25S_h + S_h - \sigma_L] \quad (35)$$

Esto es:

$$S_A = f [1,25(S_c + S_h) - \sigma_L] \quad (36)$$

Análisis de Flexibilidad en Sistemas de Tuberías

Consideraciones Generales

Para determinar los efectos de expansión y esfuerzos en un sistema de tuberías, es necesario conocer:

- a) Cuál código se aplica al sistema
- b) Las condiciones de presión y temperatura de diseño
- c) Las especificaciones del material
- d) El diámetro de tubería y el espesor de pared de cada componente del sistema
- e) El esquema del sistema incluyendo dimensiones y movimientos térmicos en cualquier punto
- f) Limitaciones de reacciones finales en los puntos, tales como las establecidas por los fabricantes de equipos

Teniendo determinadas las bases del problema, el código aplicable podría establecer los requerimientos mínimos de seguridad para el material a las condiciones de presión y temperatura de diseño. Algunos códigos especifican los factores de expansión térmica y el módulo de elasticidad para materiales comúnmente usados en tuberías, así como también proporcionan las fórmulas para determinar los factores de intensificación de esfuerzos y los factores de flexibilidad para los componentes del sistema.

El análisis de flexibilidad de tuberías consiste en determinar si una línea posee la suficiente capacidad para absorber las cargas que inciden sobre ella tales como el propio peso de la tubería, la expansión térmica, las fuerzas producidas por la presión del fluido, vibraciones, terremotos y otras. Uno de los factores que pueden aumentar o disminuir la flexibilidad de una tubería es su configuración geométrica.

Los sistemas de tuberías deben poseer la flexibilidad suficiente de manera que la expansión o la contracción térmica, así como los movimientos de soportes y equipos, no conduzcan a:

- a) Falla de la tubería o de los soportes por esfuerzos excesivos o fatiga
- b) Fugas en las juntas
- c) Falla de las boquillas de los equipos conectados (recipientes a presión, bombas, turbinas.), por reacciones excesivas.

Requerimientos de Flexibilidad en un Sistema de Tuberías

En las tuberías, así como en otras estructuras, el análisis de los esfuerzos puede llevarse a cabo con diferentes grados de precisión. En un extremo está la sencilla comparación con arreglos similares, que han cumplido satisfactoriamente con los requerimientos del servicio; en el otro extremo, están los métodos del cálculo, que envuelven largos y complicados procedimientos y que son relativamente costosos para un grupo de ingeniería.

Por esta razón debe asegurarse que se cumplan los siguientes requerimientos como mínimo:

- a) El rango de esfuerzos en cualquier punto debido a desplazamientos en el sistema no debe exceder el rango de esfuerzos permisibles establecido en la sección de esfuerzos admisibles.
- b) Las fuerzas de reacción no deben perjudicar a los soportes o equipos conectados
- c) Los movimientos de la tubería deben estar dentro de los límites establecidos

Existen dos modalidades de análisis de flexibilidad: El análisis de flexibilidad informal y el análisis de flexibilidad formal.

En este aspecto, el código ASME B31.3 identifica ciertas condiciones, para las cuales no se requiere el análisis formal para confirmar la

aceptabilidad de la tubería, desde el punto de vista de su flexibilidad. Estas condiciones son:

- a) El sistema es similar a otro que ha funcionado con récord exitoso de servicio productivo.
- b) El sistema puede ser juzgado rápidamente por comparación con otros sistemas similares analizados previamente
- c) El sistema es de tamaño uniforme, no tiene más de dos puntos de fijación sin apoyos ni restricciones intermedias y cumple con la ecuación empírica:

$$\frac{D \cdot y}{(L - U)^2} \leq k_1 \quad (37)$$

donde:

D = diámetro nominal (pulgadas, mm)

y = resultante del total de los desplazamientos térmicos que deben ser absorbidos por el sistema (pulgadas, mm)

L = longitud desarrollada de la tubería entre los dos anclajes (pies, m)

U = distancia en línea recta entre los anclajes (ft, m)

K_i = 0.03 (sistema inglés) o 208.3 (Sistema Internacional)

En caso de no cumplir con lo antes mencionado, se requiere realizar un análisis de flexibilidad normal.

Fundamentos relacionados con el análisis de flexibilidad

Una estructura que esté sujeta a un cambio de temperatura cambiará sus dimensiones físicas si está libre de expandirse. En caso contrario, se inducirán esfuerzos provocándose fuerzas de reacción y momentos en los equipos de los extremos.

El problema básico del análisis de flexibilidad es determinar la magnitud de estos esfuerzos en la tubería y controlar que las reacciones en los puntos de interconexión con equipos estén dentro de valores aceptables.

Tubería Curva

Cuando se utiliza una tubería doblada para cambiar la dirección en un sistema de tuberías, su sección recta se deforma elípticamente cuando está sometido a flexión y su flexibilidad aumenta. Además, el tubo doblado tiene un mayor esfuerzo que el determinado por la teoría elemental de flexión. Esta característica de las tuberías dobladas o codos, se toma en consideración en el análisis de flexibilidad introduciendo los “factores de flexibilidad” y los “factores de intensificación de esfuerzos”, los cuales son simplemente las relaciones entre la flexibilidad y esfuerzos reales y aquellos teóricos derivados de la teoría elemental de flexión.

Bajo las reglas del código ASME B31.3, el factor de flexibilidad y el factor de intensificación de esfuerzos para un tubo doblado o codo están dados por las siguientes fórmulas:

Factor de Flexibilidad, k

La tubería curva tendrá una característica de flexibilidad equivalente a la de una tubería recta de la longitud $L \cdot k$.

Factor de Intensificación de Esfuerzos, i

El código hace distinción entre la flexión en el plano de curvatura y fuera del plano de curvatura.

$$i(\text{en el plano}) = \frac{0,90}{h^{2/3}} \geq 1 \quad (39)$$

$$i(\text{fuera del plano}) = \frac{0,75}{h^{2/3}} \geq 1 \quad (40)$$

donde:

h = características de flexibilidad $\left(h = \frac{t \cdot R}{r^2} \right)$

t = espesor de la pared del tubo

R = radio de curvatura del tubo curvo

r = valor medio entre el radio exterior e interior de la sección del tubo.

Las tablas han sido tomadas del código ASME B31.3 donde se muestran los factores de flexibilidad y de intensificación de esfuerzos para codos, codos fabricados, ramales y puntos terminales.

Consideraciones en el diseño del sistema por flexibilidad

Los sistemas de tuberías deben ser lo suficientemente flexibles para evitar esfuerzos mayores que los permisibles y cargas excesivas derivadas de la expansión térmica.

Se deben evitar fallas por fatiga en tuberías y soportes debido a deformaciones muy elevadas.

Para sistemas de tuberías en el área de la planta de proceso y fuera de ella ("onsite" y "offsite"):

$$S_E \leq S_A \quad (43)$$

Para sistemas de tuberías externos a las unidades de proceso cuando el diseño es gobernado por condiciones anormales de temperatura: Esfuerzo de flexibilidad (S_E) menor o igual que el doble del rango de esfuerzos admisibles

$$S_E \leq 2S_A \quad (44)$$

Sin embargo, esto está limitado a las siguientes condiciones:

- a) Cuando la temperatura anormal del fluido está por debajo de su punto de autoignición y de 500 °F (260°C)

b) Cuando estas condiciones no ocurren más de 5 veces al año.

S_A se calcula para la condición normal y no se hace reducción en el cálculo del rango admisible de esfuerzos (S_A) por el esfuerzo longitudinal (S_L) que soporta la tubería cuando es menor que el esfuerzo admisible en caliente (S_h).

Número de ciclos a ser considerados

El número de veces en que la línea esté sometida a la combinación de temperatura y movimientos en los extremos, también tiene influencia en el diseño de un sistema por flexibilidad, ya que la base para la determinación del esfuerzo de diseño por flexibilidad, está asociada a consideraciones acerca del deterioro por fatiga.

En el código de diseño de tubería en refinería de petróleo (ANSI / ASME B31.3), el rango de esfuerzo admisible es una función del número de fluctuaciones completas de temperatura desde la mínima a la máxima temperatura del metal. Este esfuerzo es constante para los primeros 7000 ciclos de cambio en la temperatura y se reduce para una cantidad mayor de ciclos.

Si el número de ciclos esperados de cambio de temperatura, durante la vida de la planta, excede 7000 ciclos, el número de ciclos deberá ser indicado en las especificaciones, para todas las líneas involucradas.

Para propósitos de diseño mecánico, deberán utilizarse 20 años de vida de la planta en el estimado del número de ciclos. Esto significa que, aproximadamente, 1 ciclo por día es necesario para superar los 7000 ciclos (Ver ecuación 34 y Tabla 6).

Proceso General de Evaluación del Problema de Flexibilidad en las Tuberías

El objetivo del análisis de flexibilidad de las tuberías es asegurar el sistema contra la falla del material o soportes por sobre esfuerzos, contra fugas en las juntas y contra sobre sollicitación en los equipos acoplados. En el

análisis de flexibilidad de cualquier sistema, los siguientes pasos son típicos a fin de confirmar la aceptabilidad de un diseño de tuberías:

Típicamente, el sistema debe a ser evaluado tiene especificado el tamaño de la línea, el material y el número de ciclos de temperatura previstos, definidos por el proceso, y las consideraciones de las presiones y temperaturas de diseño. Esta información junto con el arreglo de la tubería y el mayor diferencial de temperatura, considerando operación normal, puesta en marcha, disparo o paradas, limpieza con vapor, condiciones anormales, etc., representan los datos necesarios para las evaluaciones de la flexibilidad del sistema.

Con respecto al arreglo inicial, típicamente se selecciona de tal forma que sea consistente con las limitaciones en las caídas de presión, el espacio disponible, acceso a los equipos, estructuras existentes para soportes y reglas prácticas inherentes a la flexibilidad de la tubería.

Las condiciones en los extremos tienen que ser supuestas. La práctica general en este aspecto es tomar los puntos terminales como totalmente fijos, en la ausencia de un análisis detallado de las rotaciones y deflexiones en los cuerpos de los recipientes, bombas, carcasas de compresores o turbinas u otros anclajes de la tubería.

El diseñador deberá localizar, con razonable precisión, todos los puntos de restricciones intermedios incluyendo soportes, guías, topes y todos los ramales que afecten significativamente la flexibilidad de la tubería. Las mayores restricciones a los movimientos libres de la línea debido a guías o soportes, usualmente se toman en consideración en los cálculos o en otras formas de análisis.

Por supuesto, todas las ubicaciones de los soportes, incluyendo resortes o contrapesos, deberán ser considerados para la evaluación de las cargas aplicadas y esfuerzos atribuidos a cargas muertas.

Se debe seleccionar un método apropiado para el análisis del sistema de acuerdo con su importancia.

Finalmente, deberá hacerse una comparación de los resultados obtenidos con el rango de esfuerzo admisible, con los criterios de cargas límites seleccionados para el sistema o los equipos conectados al mismo.

Análisis de Flexibilidad por Computadora

Programas como el CAESAR II están disponibles para ejecutar análisis detallados de los esfuerzos en sistemas de tuberías con muchas ramificaciones. Este programa está desarrollado para ambiente Windows y su principal función es el modelaje, análisis y diseño de sistemas de tuberías, objetivo que logra este programa mediante el estudio de aspectos fundamentales del análisis de tuberías como:

- a) Esfuerzos por carga sostenida, expansión térmica y operacional en la tubería.
- b) Esfuerzos y reacciones en boquillas de equipos rotativos y recipientes a presión, según las normas API.
- c) Modelaje y selección de soportes.
- d) Cálculo de desplazamientos y deflexiones en las tuberías
- e) Análisis y resultados por medio de normas estándar de diseño.

A diferencia de los métodos simplificados, este programa de computación puede ejecutar el análisis de esfuerzos y cargas aplicadas en la tubería de una forma precisa, siendo la única limitación, el espacio para almacenamiento disponible en el computador.

El sistema de tuberías puede estar compuesto por cualquiera de los más comunes elementos, tales como tramos rectos, codos, térs, etc.

Estos componentes pueden tener cualquier orientación en el espacio. Las cargas pueden resultar de la expansión térmica, movimientos en los anclajes, peso uniforme de la tubería y su contenido, restricciones externas que incluyen fuerzas o momentos aplicados, deflexiones y rotaciones. Los

problemas que incluyan apoyos con restricciones parciales así como extremos libres, pueden ser resueltos.

En muchos casos se prepara un croquis isométrico a mano alzada, para discriminar todos los datos pertinentes que se usarán en el análisis de flexibilidad.

Los datos de entrada consisten en una descripción geométrica del arreglo: dimensiones, propiedades físicas, temperatura de operación, restricciones impuestas. Esta información puede ser introducida en el sistema métrico SI o en sistema inglés.

Los elementos de entrada deberán ser descritos y numerados en una secuencia definida, de manera de permitir la interpretación correcta de los resultados. Los resultados que produce el programa de análisis de flexibilidad incluyen los esfuerzos, deflexiones, rotaciones, momentos y fuerzas en cada punto de interés del sistema de tuberías, así como las fuerzas y momentos en los anclajes y restricciones.

El análisis estático se usa para estudiar la respuesta a cargas cuyas magnitudes permanecen constantes en un período de tiempo relativamente largo. Las opciones de cargas estáticas en CAESAR II son gravedad (peso muerto), térmica, presión, viento y terremoto. No obstante, el terremoto no es una carga estática, pero puede considerarse como una carga estática equivalente por simplicidad.

Para efectos de este proyecto no se considerarán las cargas de viento ni de terremoto.

El programa CAESAR II ejecuta el análisis para cargas totales y los pasos son:

- a) Analizar por sostenido.
- b) Analizar por térmico
- c) Análisis operacional

Consideraciones sobre arreglos de tuberías

Después de que el diámetro y el material de la tubería han sido seleccionados y de que el espesor requerido de pared de los tubos y la clase ("rating") de las bridas han sido establecidas, el diseñador de la tubería tendrá que elaborar una disposición económica de tuberías para el nuevo sistema. Además, el diseñador de tuberías debe familiarizarse con los problemas de soportaría, los tipos disponibles de soportes y su aplicación. Por ejemplo, las líneas de tubería deben ser proyectadas para usar las estructuras existentes en los alrededores para proveer puntos lógicos de soporte, si hay espacio disponible en tales estructuras y se puede usar el soporte apropiado.

Consideraciones sobre disposición general

En la disposición y arreglo de sistemas de tubería para refinerías, deberán tomarse en consideración los siguientes requerimientos:

Facilidad de Operación

Los puntos de operación y control tales como aquellos donde están instalados válvulas, bridas, instrumentos, toma-muestras y drenajes, deberán ser ubicados de modo que esas partes del sistema puedan ser operadas con mínima dificultad.

Accesibilidad para Mantenimiento

El sistema de tubería deberá ser proyectado de manera tal que cada porción del sistema pueda ser reparado o reemplazado con mínima dificultad. Deben proveerse espacios libres, como por ejemplo, en los cabezales o extremos de los intercambiadores de calor, carcasa y tubos, para permitir la remoción del haz tubular.

Economía

Deben llevarse a cabo estudios de ruta de las tuberías, para determinar el trazado económico del sistema. Existe una tendencia frecuente de parte de algunos diseñadores a prever excesiva flexibilidad en los sistemas de tuberías. Esto puede incrementar los costos de material de fabricación más de lo necesario y algunas veces puede conducir a vibraciones excesivas en el sistema.

Requerimientos Especiales de Proceso

Para algunos sistemas de tubería, la presión disponible es crítica, de modo que las pérdidas de presión por flujo debido a codos y otros accesorios en la línea deben ser minimizadas.

Ampliaciones Futuras

En el diseño de un sistema de tubería deben hacerse consideraciones sobre la posibilidad de futuras ampliaciones.

Apariencia

El sistema de tubería nuevo deberá proyectarse de forma que armonice físicamente con los sistemas de tuberías existentes, con los equipos y los elementos de infraestructura de la refinería, tales como calles, edificios, etc.

Minimizar los Extremos

Los extremos muertos y bolsillos en las partes bajas de los sistemas de tubería deben ser evitados en lo posible. Esas partes ocasionan dificultades en el drenaje de los sistemas de tubería. Todos los extremos muertos y bolsillos en las partes bajas del sistema, así como los puntos altos, deben ser provistos de drenajes adecuados.

Maximizar el Uso de Soportes Existentes

Donde sea posible, la tubería debe tenderse sobre soportes existentes o extendidos de soportes existentes, con el fin de reducir costos de soportería.

La capacidad de carga de los soportes existentes debe ser evaluada, para asegurarse de que puede soportar la carga adicional de las tuberías nuevas.

Separaciones para Expansión Térmica

Debe preverse la separación suficiente, entre tuberías adyacentes y entre una tubería y obstrucciones estructurales adyacentes, para tomar en cuenta la libre expansión térmica de la tubería. Las separaciones requeridas deben basarse en las máximas expansiones térmicas diferenciales aun bajo condiciones anormales.

Espacios

La tabla 7 indica las separaciones mínimas verticales recomendadas, entre la rasante acabada o parte superior de la placa de piso y el fondo de la tubería, aislamiento o viga de apoyo.

Consideraciones de arreglo para facilitar el apoyo y la sujeción

Además de establecerse la disposición y el arreglo general de las tuberías y las condiciones globales de diseño, deben definirse los tipos de arreglos de soportes. A este respecto, las siguientes son consideraciones generales que afectan el trazado de la tubería para una sustentación favorable.

El sistema de tubería deberá ser en lo posible, autosoportante y consistente con los requerimientos de flexibilidad.

Tabla N° 7

Separaciones Mínimas Verticales

Ubicación	Separación Mínima	
	Pies/Pulg.	mm
Sobre vías principales abiertas al tránsito libre (tales como la periferia de los límites del área de unidades de proceso)	20 pies	6100
Dentro de las áreas de unidades de proceso: encima de vías internas provistas para el acceso de equipo de mantenimiento y contra incendio.	16 pies	4880
Debajo de puentes de tubería donde el acceso es: <ul style="list-style-type: none"> • Requerido para equipos vehiculares • Requerido solamente para equipo de servicio portátil (temporal) 	12 pies 10 pies	3650 3050
Encima de pasarelas y plataformas elevadas	6 pies 9 pulg.	2050
Debajo de cualquier tubería a bajo nivel y sobre áreas pavimentadas o sin pavimentar	1 pie	300

El exceso de flexibilidad puede requerir soportes o sujeciones adicionales para evitar movimiento y vibraciones en una amplitud tal que despierte desconfianza en el personal. Esta situación es propensa a ocurrir en líneas verticales donde solamente hay un punto de apoyo para sostener el peso.

Las tuberías propensas a vibrar, tales como líneas de succión o descarga de bombas reciprocantes o compresores, deberán ser diseñadas con sus soportes propios e independientes de otras tuberías. El diseño debe permitir el uso de apoyos fijos o soportes rígidos que ofrezcan resistencia al movimiento y provean cierta capacidad de amortiguación, en vez de los soportes colgantes.

La tubería debe estar lo suficientemente cerca al punto de apoyo de sujeción, de manera que el conjunto estructural pueda tener la rigidez adecuada y los componentes de fijación sean simples y económicos.

Los tubos de las conexiones superiores de recipientes verticales se apoyan y fijan ventajosamente en el recipiente para minimizar movimientos independientes de recipiente, soportes y tuberías, por tanto, tales tuberías deben ser trazadas lo más cerca posible del recipiente y soportadas muy cerca de la conexión.

Las tuberías sobre estructuras deben ser trazadas debajo de las plataformas, cerca de los miembros estructurales principales, en puntos donde sea favorable añadir cargas, a fin de evitar la necesidad de reforzar esos miembros.

Debe asignarse suficiente espaciamiento para acceso fácil a las partes sujetadoras de aquellos soportes que requieran mantenimiento o servicio.

Diseño de soportes para tuberías

Generalidades

La selección y el diseño de soportes para tuberías es una parte importante en el estudio ingenieril de cualquier instalación de procesos industriales. Los problemas para diseñar tuberías para altas presiones y temperaturas, tienden a ser críticos en un punto donde es imperativo qué aspectos de diseño, tales como el efecto de cargas en soportes concentradas en estructuras, cargas sobre equipos conectados debido al peso de la tubería y tolerancias de los soportes respecto a tuberías y estructuras; sean tomados en consideración en las primeras etapas de un proyecto.

Existen métodos eficientes establecidos para ejecutar los trabajos requeridos para arribar a un diseño apropiado de soportes. A continuación se discutirán varios pasos involucrados en el diseño de soportes.

Recopilación de Información Básica

El primer paso involucrado en el diseño de soportes es determinar y obtener la cantidad necesaria de información básica antes de proceder a los cálculos y detalles de los soportes. El diseño no será completo si el ingeniero no tiene la oportunidad de revisar el equivalente a la siguiente información:

- a) Especificación del soporte, cuando sea disponible
- b) Un señalamiento completo de dibujos de tuberías
- c) Un señalamiento completo de estructuras
- d) Una especificación apropiada de tuberías y datos que incluyan: tamaño de la tubería, composición, espesor de pared, temperaturas y presiones de operación.
- e) Una copia de la especificación del aislante con su densidad

- f) Válvulas y accesorios especiales, indicando sus características (peso, dimensiones, etc.)
- g) Deflexiones de todas las conexiones de succión de equipos críticos como fondos de caldera, tambores de vapor, conexiones de tuberías, etc.

Guías generales sobre ubicación de soportes

La ubicación apropiada de soportes colgantes o soportes fijos involucra consideraciones de la propia tubería, de la estructura a la cual se transmite la carga y de las limitaciones de espacio. Los puntos preferidos de fijación de la tubería son:

- a) Sobre tubería propiamente y no sobre componentes tales como: válvulas, accesorios o juntas de expansión. Bajo cargas concentradas (puntuales), las bridas y juntas roscadas pueden gotear y los cuerpos de válvulas pueden deformarse produciendo goteo, trabazón del vástago o goteo a través del asiento.
- b) Sobre tramos rectos de tuberías en lugar de sobre codos de radios agudos, juntas angulares o conexiones de ramales prefabricados, puesto que en estos sitios se encuentra la tubería ya sometida a esfuerzos altamente localizados, a los cuales se agregarían los efectos locales de la fijación.
- c) Sobre tramos de tuberías que no requieran remoción frecuente para limpieza o mantenimiento.
- d) Tan cerca como sea posible de concentraciones grandes de carga, tales como: tramos verticales, ramales de tubería, válvulas motorizadas o bien válvulas pesadas y recipientes menores, tales como separadores, colabores.

Espaciamientos de soportes

La localización de los soportes depende del tamaño de la tubería, configuración de la misma, localización de las válvulas y accesorios y de la estructura disponible para el soporte de tuberías.

En un tendido de tubería horizontal, sencillo, en campo abierto, el espaciamiento de soportes depende únicamente de la resistencia del tubo. Dentro de los límites de una unidad de proceso, por otra parte, el espaciamiento de soportes está determinado mayormente por el espaciamiento de columnas convenientemente ubicadas.

Comúnmente el espaciamiento o tramo entre pórticos de un puente de tubería se determinará con base en la tubería más débil. Las líneas de diámetro pequeños pueden apuntalarse a lo largo de extensas luces proveyéndolas de soportes intermedios, sujetos a las tuberías adyacentes más grandes; un grupo de tales líneas pueden también atarse juntas, de manera tal que aumente la inercia combinada. Algunas veces, sin embargo, la solución más práctica es, simplemente, incrementar el diámetro del tubo hasta el punto que sea autosoportante a lo largo de la luz requerida.

Las luces permisibles para líneas horizontales están principalmente limitadas por los esfuerzos longitudinales que deben mantenerse dentro de los límites o, en algunos casos, por la máxima deflexión. De igual manera, en otros casos especiales, puede limitarse la luz para controlar la frecuencia sónica natural de las líneas, de manera de evitar vibraciones indeseables.

El máximo espacio sugerido entre soportes, se encuentra listado en la tabla 10. Este espaciado se basa sobre un esfuerzo de torsión y cortante combinado de 1500 Psi (10.34 MPa), cuando la tubería está llena de agua y se permite una deflexión entre soportes de 1/10" (2.54 mm). Estos no se aplican cuando existen pesos concentrados tales como presencia de válvulas y otros accesorios pesados o cuando ocurran cambios de dirección en el sistema de tuberías.

En caso que se presenten cargas concentradas, los soportes deberían estar puestos tan cerca como sea posible a la carga, con la intención de mantener el esfuerzo flexionante al mínimo.

En la práctica, un soporte debería ser colocado inmediatamente después de cualquier cambio de dirección en la tubería.

Por economía de los soportes de sistemas de baja presión y temperatura y largas líneas externas de transmisión, la distancia entre soportes se puede basar sobre el esfuerzo total permisible de la tubería y la cantidad de deflexión permisible entre soportes.

Tabla N° 8

Espaciado Sugerido entre Soportes

∅ Exterior	Pulg	1	1 ½	2	2 ½	3	3 ½	4
	Mm	25,4	38,1	50,8	63,5	76,5	88,9	101,6
Espacio	Pies	7	9	10	11	12	13	14
	Mts.	2,134	2,743	3,048	3,353	3,658	3,962	4,267
∅ Exterior	Pulg.	5	6	8	10	12	14	16
	Mm	127	152,4	203,2	254	304,8	355,6	406,4
Espacio	Pies	16	17	19	22	23	25	27
	Mts.	4,877	5,182	5,791	6,706	7,01	7,62	8,23

Cálculos movimientos térmicos de la tubería

El primer paso en el diseño de soportes de tuberías involucra el cálculo de la expansión térmica de la tubería en cada soporte localizado. La manera más económica de seleccionar el tipo de soporte apropiado es, tomar como criterios de diseño la cantidad de movimiento y la fuerza soportante requerida.

El cálculo de deflexiones y expansiones (desplazamientos) en tuberías se puede realizar manualmente o con el uso de herramientas computarizadas destinadas para tal fin; realizar estos cálculos manualmente implica un estudio altamente complicado del sistema, conllevando a su vez a un gasto de tiempo innecesario si se cuentan con sistemas computarizados que puedan calcularlas eficientemente.

Los cálculos de movimientos en tuberías se sugiere sean hechos con apoyo del sistema CAESAR II; el cual con un alto grado de exactitud, determina los desplazamientos y rotaciones que se generan en el sistema, producto de expansiones térmicas o esfuerzos de presión.

Después de establecer los puntos de anclajes y soportes de la tubería, se simulan los puntos de soportes en una "corrida" del programa CAESAR II.

Los desplazamientos calculados por el sistema CAESAR II serán utilizados para determinar el tipo de soporte a utilizar, en cada punto de sustentación.

Cálculos de cargas en los soportes

Las expansiones térmicas de tubería en instalaciones modernas con altas presiones y temperaturas de operación, hacen necesario para el diseñador, especificar soportes flexibles, para lo cual se requiere un cálculo preciso para determinar la carga a considerar para el soporte.

Un sistema de suspensión bien balanceado dará como resultado valores aproximadamente iguales de las cargas en los colgadores y soportes, siempre y cuando toda la tubería sea del mismo tamaño y, no haya cargas altamente concentradas ubicadas cerca de un soporte o colgador. Donde haya cargas concentradas dentro del sistema, las cargas en los soportes y colgadores adyacentes serán correspondientemente mayores.

Las siguientes cargas deben ser consideradas en los cálculos de diseño para soportes:

- a) Peso de la tubería y el aislamiento, sólo donde sea especificado.
- b) Peso de los fluidos contenidos en la línea, basado en agua o el fluido contenido; el que sea mayor. Cuando las líneas no son probadas hidrostáticamente, el peso del contenido de la línea puede ser basado sólo en los fluidos contenidos.
- c) Las cargas laterales ocasionadas por el movimiento de la línea o soportes.

El cálculo de las cargas de diseño para soportes puede determinarse por los métodos usuales de la estática. Obviamente, esto requiere que primero se seleccionen todas las ubicaciones de los soportes para la línea en consideración.

Hay métodos de cálculo con calculadoras manuales, sin embargo, son tediosos cuando involucran configuraciones complejas de tubería. Cuando se presenta esta situación o para el caso de una tubería pegada a un equipo capaz de absorber cargas, se sugiere usar los programas de computación de flexibilidad en tuberías que existen, para determinar todas las reacciones de carga en los soportes.

El sistema CAESAR II proporciona la herramienta necesaria para calcular las cargas estáticas que actúan en todas las direcciones en un punto especificado en el sistema de tuberías; por lo tanto, se pueden determinar con un alto grado de exactitud las cargas que se presenten en los puntos de soporte.

Las cargas sobre los soportes calculados y mostrados por el sistema CAESAR II serán utilizadas para determinar la capacidad y la dimensión de los soportes a seleccionar.

Selección de soportes

La selección del tipo de soporte apropiado para cualquier aplicada dada, es gobernada por la configuración en particular de la tubería y las condiciones de operación.

Los tipos de soportes utilizados son clasificados generalmente de la siguiente manera:

Soportes flexibles

Cuando una tubería lineal se defleca verticalmente como resultado de la expansión térmica, es necesario proveer soportes flexibles. Estos aplican la fuerza soportante aunque la expansión y contracción ciclen al sistema.

Los soportes flexibles se subdividen en dos tipos: de carga constante y de carga variable.

Soportes flexibles de carga constante

Los soportes flexibles de carga constante, proveen una fuerza constante de apoyo, aunque el mismo esté al máximo rango de la expansión y contracción vertical. Esto es logrado con el uso de un resorte helicoidal trabajando en conjunto con un codo de palanca, de tal manera que la fuerza del resorte, multiplicada por la distancia del brazo pivote se iguale siempre a la carga de la tubería multiplicada por la distancia a la palanca pivote.

Debido a que su efecto de soporte es constante, éstos son usados donde se desea prevenir transferencia de cargas de peso a equipos conectados o a soportes adyacentes. En consecuencia, generalmente se usan para soportar sistemas de tuberías críticas.

Soportes flexibles de carga variable

Los soportes flexibles de carga variable son usados para tuberías sujetas a movimientos verticales donde los soportes flexibles de carga constante no son requeridos. La característica inherente de un soporte de carga variable es que la fuerza soportadora varía con la deflexión del resorte y con la escala del mismo, por lo tanto, la expansión vertical de la tubería causa una correspondiente tracción o compresión en el resorte y causará un cambio en el efecto de sustentación actual del soporte.

La variación de la carga es igual al producto de la deflexión vertical y la constante del resorte. Puesto que el peso de la tubería es el mismo durante cualquier condición, en frío o en operación, la variación en la carga conlleva a la transferencia del peso de la tubería a equipos y soportes adyacentes y por consecuencia se generan esfuerzos adicionales en el sistema de tuberías. Cuando un soporte flexible de carga variable es usado, el efecto de esta variación debe ser considerado.

Los soportes flexibles de carga variable son para uso general, sobre sistemas de tuberías no críticas y donde el movimiento vertical es de pequeña magnitud con respecto a la criticidad del sistema. Se considera práctico limitar la variación de la fuerza sustentadora a un 25% para sistemas críticos sobre tuberías horizontales.

Soportes rígidos

Los soportes rígidos son normalmente usados en puntos donde no ocurren movimientos verticales de la tubería.

Las consideraciones de diseño para un soporte rígido son: la temperatura de la tubería, para seleccionar el material de la abrazadera y la carga para seleccionar los componentes adecuados para el peso de la tubería implicada.

El material de la abrazadera de la tubería es usualmente acero al carbono para temperaturas de hasta 750°F (398.89°C), acero aleado para temperaturas superiores a 750°F (398.89°C) o hierro forjado para temperaturas de hasta 450°F (232.22°C)

Para sistemas de tuberías de baja temperatura de operación, donde la expansión vertical no es considerada, los componentes de ensamblaje del soporte son seleccionados y diseñados sobre el cálculo básico de resistencia de materiales o cargas aproximadas.

En algunas instancias, el soporte rígido además de ser usado como soporte del peso de la tubería, es también adecuado como una restricción del

movimiento vertical de la tubería. En estos casos el ingeniero debe ejecutar con sumo cuidado la localización de los soportes rígidos y la carga de diseño que se use para seleccionar los componentes adecuados.

La instalación indiscriminada de un artefacto restrintor sobre un sistema de tubería, podría alterar los esfuerzos y reacciones en la tubería de manera severa, cambiando el diseño del sistema a uno en el cual se exceden los límites de un buen diseño. Es por ello que se deben revisar los valores generados por la instalación de estos soportes durante el cálculo de los esfuerzos y reacciones, para que no sobrepasen los permisibles recomendados por los códigos ANSI/ASME para el diseño de tuberías.

Otra clasificación de soportes para tuberías es la siguiente:

Colgadores o Soportes

Se usan para soportar el peso de sistemas de tuberías. Si se encuentran colocados por encima se denominan colgadores y, si están por debajo se denominan soportes. Los colgadores o soportes a su vez se clasifican en:

- a. *Colgadores o soportes rígidos*: Para puntos libres de desplazamiento vertical.
- b. *Amortiguadores de resorte*: Puntos con desplazamientos menores a 2" (50.8 mm) en servicios no críticos.
- c. *Colgadores o soportes de carga variable*: Puntos con desplazamientos mayores a 2" (50.8 mm)
- d. *Colgadores o soportes de carga constante*: Puntos con desplazamiento vertical en servicios críticos.

Restricciones

Para restringir o limitar el movimiento de sistemas de tuberías debido a expansión térmica.

Las restricciones se clasifican en:

- a. *Anclajes*: Para fijar completamente la tubería en ciertos puntos.
- b. *Topes*: Para prevenir el movimiento longitudinal de la tubería permitiéndole rotar.
- c. *Guías*: Para permitir desplazamientos en una dirección específica.
- d. *Amortiguadores*: Para limitar el movimiento de la tubería debido a fuerzas diferentes al peso y a la expansión térmica.
- e. *Clasificación de los Amortiguadores o Snubbers*:
- f. *Controladores de vibraciones*: Para prevenir o disminuir vibraciones.
- g. *Amortiguadores hidráulicos o mecánicos*: Para suprimir el movimiento debido a terremotos, golpes de ariete, sin restringir la expansión térmica.

Definición de Términos Básicos

Anclaje Direccional: Es una estructura que restringe el movimiento axial de una tubería dentro de un rango determinado.

Cargas Dinámicas: Son aquellas cargas que varían con el tiempo, ejemplo: cargas de viento, terremoto, etc.

Cargas Sostenidas: Son aquellas cargas que después de la deformación del material al que están aplicadas, permanecen constantes. Ejemplo: cargas por peso.

Guías: Son estructuras que dirigen el movimiento de una tubería en la dirección que se desea. Las formas y tamaños de las guías varían mucho. Estas estructuras pueden estar ligadas a otros tipos de soportes de tuberías como las zapatas.

Lazo de Expansión: Es una configuración geométrica determinada de un segmento de tubería que permite que ésta se expanda con una disminución considerable de los esfuerzos.

Rating: Clasificación.

Soporte: Cualquier material, instrumento, etc., que sirve para que algo se apoye sobre él, o para sostenerlo o mantenerlo en una determinada posición.

Zapata: Consiste en una estructura metálica vertical soldada a una tubería y otra horizontal que se asienta sobre la viga o arreglo en el que la tubería se apoya. Su función es permitir que la tubería se desplace a causa de la expansión térmica sin sufrir efectos de fricción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chapman Román, Stephen (1997). **Uso del Análisis de Flexibilidad de Sistemas de Tubería para la Selección y Especificación de Soportes Dinámicos.**

Grinnell Corporation (1995). **Piping Design and Engineering.** U.S.A. 7ma Edición.

Maraven Caron Engineering Practices (MCEP) (1997). **Thermal Insulation for Hot Services.** 30.46.00.31 – Gen Mineral Wool Insulation Thickness For Steam and Condensate Lines.

Petróleos de Venezuela (1995). **Diseño Mecánico – Módulo II – Diseño de Tuberías.** Centro de Educación y Desarrollo (CIED).

Philips G., Rodolfo J. (1997). **Guía del Usuario en AutoPIPE 5.0 para Análisis Vibratorio en Sistemas de Tuberías.**

Shell International Oil Products B.V (SIOP) (1999). **Design and Engineering Practices.** DEP 31.38.01.29 – Gen Pipe Supports.

Shigley, Joseph Edward (1984). **Diseño en Ingeniería Mecánica.** 5ª Edición, México: Mc Graw-Hill.

Silva Díaz, Betty Mariella (1999). **Diseño de un Sistema de Cálculo Automatizado para la Optimización de los Procesos de Tendido y Reparación de Tuberías Sub-Lacustres, bajo el Criterio de Flexibilidad y Flotabilidad.** PDVSA Punto Fijo, Estado Falcón.

The American Society of Mechanical Engineers (1996). **Process Piping. ASME Code for Pressure Piping B31.3.** U.S.A

