

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

## DISEÑO DE METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD EN SISTEMAS DE TUBERÍAS

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecánico**, que presenta el bachiller:

**Marcelo Rentería Vidaurre**

**ASESOR: Dr. Fernando Torres**

Lima, octubre de 2014

## Resumen

El análisis de flexibilidad es una de las disciplinas del diseño de sistemas de tuberías, se realiza en la etapa final de diseño y comprende principios de concentración de esfuerzos, expansiones térmicas y deformaciones elásticas. Este análisis es crítico en aplicaciones donde el fluido a transportar trabaja a condiciones extremas, como plantas térmicas y generadoras de energía, donde el sistema está sometido a altos gradientes de temperatura que conllevan a la generación de tensiones debido a expansiones o contracciones térmicas. El análisis teórico es de carácter limitativo debido el comportamiento aleatorio del sistema frente a ciertas condiciones de trabajo. Por esta razón, los diseñadores optan por la utilización de *softwares* de análisis como CAEPIPE, CEASAR II, ANSYS, entre otros. Estas herramientas ofrecen resultados confiables; sin embargo, son vistos como “cajas negras”, donde el usuario manipula las variables de entrada. La teoría detrás de estas herramientas de cálculo, muchas veces, son ignoradas por los usuarios. Este trabajo apunta a desarrollar los principios teóricos utilizados para realizar este tipo de análisis, ofrecer herramientas de cálculo sencillas para analistas e investigadores independientes sin acceso a *softwares* de diseño y mostrar elementos de alivio de tensiones ofrecidos en el mercado actual.

La estructura de la trabajo consiste en cuatro capítulos, donde se desarrollarán los principios teóricos básicos de la generación de esfuerzos; el desarrollo de la metodología de diseño de los códigos según ASME; tipos, principios de funcionamiento y criterios de selección de soluciones constructivas para aliviar las tensiones generadas; y, finalmente, el desarrollo de un ejemplo de cálculo que ponga en práctica los conceptos vertidos en los capítulos anteriores, así como, la presentación de casos comunes que complementen las nociones básicas para brindar flexibilidad a sistemas de tuberías.



***“Cogito ergo sum”***

***R. Descartes***

## Índice de contenido

INTRODUCCIÓN .....	1
1. CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO .....	4
1.1. Visión global del diseño de sistemas de tuberías .....	4
1.2. Flexibilidad: propiedad de un sistema de tuberías .....	7
1.3. Tipos de Carga .....	10
1.3.1. Cargas internas .....	10
1.3.2. Cargas externas .....	11
1.3.3. Cargas térmicas .....	11
1.4. Deformación en sistemas de Tuberías .....	12
1.4.1. Deformación Axial .....	12
1.4.2. Deformación Transversal .....	15
1.5. Métodos de empíricos de cálculo .....	18
1.5.1. Método Quy Truong .....	18
1.5.2. Método de simplificado según ASME B31.3 .....	19
2. CAPÍTULO 2: CÓDIGO DE DISEÑO ASME B31.3 .....	21
2.1. Condiciones de trabajo según Código ASME B.31.3 .....	22
2.2. Categorías de esfuerzos según su naturaleza .....	23
2.2.1. Esfuerzos primarios ( <i>Primary Stresses</i> ) .....	23
2.2.2. Esfuerzos secundarios ( <i>Secondary Stresses</i> ) .....	24
2.2.3. Esfuerzos pico ( <i>Peak Stresses</i> ) .....	24
2.3. Cálculo de esfuerzos en el sistema de tuberías .....	24
2.3.1. Esfuerzos debido a cargas sostenidas .....	25
2.3.2. Esfuerzo debido a cargas ocasionales .....	26
2.3.3. Cargas por desplazamientos .....	27
2.4. Esfuerzos límites de diseño .....	29
2.4.1. Esfuerzos sostenidos ( <i>Sustained Stresses</i> ) .....	30
2.4.2. Esfuerzos debido a cargas ocasionales .....	30
2.4.3. Esfuerzos por desplazamientos permisibles .....	30
2.5. Método empírico de análisis de flexibilidad .....	31
2.6. Metodología de análisis de flexibilidad según el código ASME B31.3 .....	31
3. CAPÍTULO 3: SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS .....	34

3.1.	Accesorios .....	34
3.1.1.	Lazos de expansión ( <i>expansion loops</i> ) .....	35
3.1.2.	Juntas de expansión ( <i>expansion joint</i> ) .....	37
3.2.	Soportes flexibles.....	39
3.2.1.	Carga constante ( <i>constant hanger</i> ) .....	40
3.2.2.	Carga variable ( <i>spring hanger</i> ).....	42
3.3.	Criterios de instalación.....	42
3.3.1.	Pre tensionado ( <i>cold-spring</i> ) .....	43
3.3.2.	Relajamiento espontáneo ( <i>self-springing</i> ) .....	44
4.	CAPÍTULO 4: APLICACIÓN DEL ANÁLISIS TEÓRICO .....	46
4.1.	Metodología de Análisis de Flexibilidad de Sistemas de <i>Piping</i> .....	46
4.1.1.	Jerarquía en sistemas de tuberías .....	47
4.1.2.	Metodología .....	49
4.2.	Ejemplo de cálculo .....	50
4.2.1.	Pre evaluación del sistema de <i>piping</i> .....	53
4.2.2.	Cálculo de desplazamientos .....	53
4.2.3.	Cálculo de Cargas.....	58
4.2.4.	Selección de soportes.....	67
4.2.5.	Análisis de esfuerzos .....	69
4.3.	Casos prácticos.....	73
4.3.1.	Identificación de tramos críticos .....	73
4.3.2.	Caso 1: Reducciones en sistemas de tuberías.....	74
4.3.3.	Caso 2: Bifurcaciones en el sistema 1.....	76
4.3.4.	Caso 3: Bifurcaciones en el sistema 2.....	79
5.	CONCLUSIONES .....	82
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	86

## Simbología

$\alpha_o$	Coeficiente de expansión térmica
$\alpha_L$	Coeficiente de expansión térmica lineal
$\Delta x$	Deformación axial
$\Delta T$	Variación de temperatura
$CL$	Carga en operación en frío
$D$	Diámetro exterior de tubería
$E$	Módulo de elasticidad
$F$	Fuerza axial
$f$	Factor de esfuerzos cíclicos
$FP$	Factor de pretensionado
$H$	Altura de lazos de expansión
$HL$	Carga en operación en caliente
$i$	Factor de intensificación
$I$	Momento de inercia
$k$	Constante de diseño para cargas ocasionales
$K_A$	Constante de comparación para pre evaluación de un sistema de tuberías
$M$	Momento flector aplicado a un tramo de tubería
$M_A$	Momento resultante debido a cargas sostenidas
$M_B$	Momento resultante debido a cargas ocasionales
$L$	Longitud de un tramo de tubería
$P$	Presión de trabajo de tubería

$r$	Radio exterior de tubería
$R$	Rigidez del soporte flexible
$S_a$	Esfuerzo de deformación axial
$S_A$	Esfuerzo de diseño para cargas por desplazamientos
$S_b$	Esfuerzo flector resultante para calcular el esfuerzo de flexibilidad
$S_c$	Esfuerzo máximo permisible del material en condiciones mínimas de temperatura
$S_E$	Esfuerzo de flexibilidad
$S_f$	Esfuerzo flector
$S_h$	Esfuerzo máximo permisible del material en condiciones máximas de temperatura
$S_L$	Suma de esfuerzos longitudinales
$S_P$	Esfuerzo de pre tensión para soportes flexibles
$S_t$	Esfuerzo torsor
$t_n$	Espesor de tubería
$U$	Distancia entre anclajes
$V$	Variabilidad de soportes flexibles
$W$	Ancho del lazo de expansión
$Z$	Módulo de sección

## INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, los sistemas de tuberías han sido utilizados por diversos sectores industriales para el transporte de sólidos, líquidos y gases gracias a la eficiencia que han mostrado para la movilización de estos. Algunas de las aplicaciones más importantes las tenemos en: plantas generadoras de energía, las cuales utilizan los sistemas de tuberías para transportar vapor de agua, aire, gases de combustión, etc.; refinerías industriales de hidrocarburos, las cuales utilizan los sistemas de tuberías para el transporte de petróleo y sus derivados; industrias químicas, las cuales requieren transportar insumos químicos de alta peligrosidad; líneas de transporte de gas, aplicación que en los últimos años se encuentra en auge debido a la masificación del consumo del gas natural de Camisea; plantas de refrigeración; transporte de sólidos y lodos, esta aplicación tiene importancia en la industria minera con el transporte y tratamiento de relaves; entre otros.

Debido a la diversidad de sus aplicaciones, las características de estos sistemas son muy variables y la selección del material de las tuberías es crucial para asegurar el correcto trabajo de los sistemas. Si bien el acero u otras aleaciones metálicas son la elección por excelencia, en las últimas décadas otros materiales, como los termoplásticos (PE, PEX, PVC, entre otros) están siendo utilizados para la fabricación de estos productos.

El diseño estos sistemas comprende la confluencia de conjunto de especialidades para asegurar la funcionalidad de los mismos. Un completo diseño de sistemas de tuberías comprende cálculos hidráulicos, dimensionamiento de tuberías, determinación de

pérdidas, cálculo estructural de soportes, análisis térmico, deformaciones, análisis de estabilidad, entre otros.

Entre todos estos aspectos de diseño, el presente trabajo desarrollará una de ellas: Análisis de deformaciones térmicas o también conocido como Análisis de Flexibilidad. Este análisis tiene por objeto de estudio las deformaciones que se generan al someter los sistemas de tuberías a grandes gradientes de temperatura. Por ende, este análisis es esencial en sistemas de tuberías que trabajan con fluidos a altas temperaturas (como las plantas de térmicas, de vapor o generación de energía), fluidos con bajas temperaturas (plantas de refrigeración)

Actualmente, los diseñadores de sistemas de tuberías utilizan *softwares* de diseño que predicen el comportamiento de los mismos. Sin embargo, el costo de las licencias de estos programas, como CAESAR II, es muy elevados para diseñadores independientes. Asimismo, los principios de cálculo que utilizan estos softwares no son comprensibles para muchos usuarios.

Por esos motivos, nace el interés de comprender los principios de cálculo estipulados en los códigos de diseño emitidos por entidades internacionales reconocidas, como ASME, y desarrollar una metodología de cálculo que sirva de guía para analistas independientes que no tengan acceso a licencias especializadas, o cualquier persona interesada en profundizar el tema.

De esta manera, el siguiente trabajo tiene el objetivo principal de diseñar una metodología para el análisis de flexibilidad en sistemas de tuberías. Esta metodología podrá utilizarse como alternativa para analizar sistemas de tuberías sencillos. Cabe resaltar que el análisis de sistemas complejos (donde existan más de dos bifurcaciones del sistema) debe realizarse con la ayuda de un *software* de análisis. Entre los objetivos específicos, tenemos:

- Diseñar un procedimiento de cálculo para el análisis de flexibilidad en sistemas de tuberías.
- Desarrollar la metodología de cálculo empleando el código ASME B31.3
- Desarrollar un ejemplo de cálculo que aplique los conceptos desarrollados

- Describir los elementos de prevención utilizados en el mercado, sus principios de funcionamientos, ventajas, desventajas y metodologías de selección

La tesis se desarrollará en cuatro (4) capítulos estructurados de la siguiente manera:

El primer capítulo desarrolla el marco teórico principal, desarrollando conceptos básicos relacionados diseño de sistema de tuberías en general, tipos y clasificación de esfuerzos encontrados en los mismos, teoría de deformación elástica, entre otros.

El segundo capítulo desarrolla la metodología de cálculo aplicando el código ASME, se comentará la metodología empírica, explicando sus limitaciones, alcance y exclusiones.

En el tercer capítulo se enunciarán los accesorios utilizados para el alivio de tensiones producidas por las deformaciones en el sistema. Al finalizar el capítulo, el analista podrá entender los principios de funcionamiento de estos accesorios, sus limitaciones y sus consideraciones de selección.

En el cuarto capítulo se desarrollará un ejemplo de cálculo para poner en práctica las ecuaciones, expresiones y consideraciones mencionadas en los capítulos 1, 2 y 3. Asimismo, se presentarán casos prácticos y comunes en sistemas de tuberías para brindar información al lector del actuar frente a estas complicaciones.

Continuamente, se presentarán las conclusiones, las cuales, contemplarán de forma detallada los resultados del trabajo.

Finalmente, la tesis aporta una herramienta sencilla para cualquier diseñador, estudiante, investigador o analista independiente que desee especializarse en la disciplina de análisis de flexibilidad de sistemas de tuberías.

## 1. CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se definirán los conceptos teóricos para entender la naturaleza del fenómeno de flexibilidad. Inicialmente se explicarán las etapas de cálculo que comúnmente se realizan en el diseño de un sistema de tuberías. Asimismo, se encontrará la definición de la propiedad de flexibilidad de sistemas de tuberías, se explicará la naturaleza de las cargas involucradas en un sistema, los efectos directos de las dilataciones o contracciones en la integridad del sistema y, finalmente, los métodos empíricos más conocidos para determinar pre evaluar un sistema de tuberías.

Estos conceptos son la base para poder determinar teóricamente los esfuerzos generados por deformaciones térmicas en un sistema de tuberías. Sin embargo, la principal limitación del análisis teórico es definir los límites de diseño de estos esfuerzos.

### 1.1. Visión global del diseño de sistemas de tuberías

El diseño de un sistema de *piping* en general consta de dos etapas, las cuales se describen en la Ilustración 1.1<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Alvarado , A. Rodríguez-Toral, Rosas, & Ayala, 2006

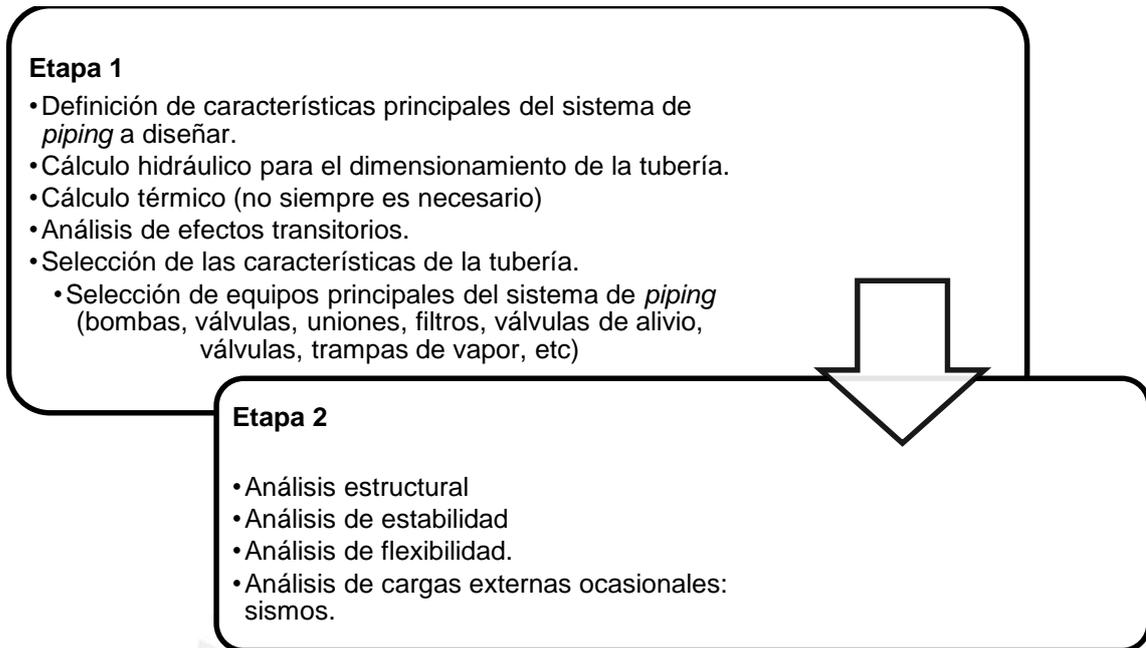


Ilustración 1.1. Etapas del diseño de sistemas de tuberías

La Etapa 1 define las características necesarias para asegurar la funcionalidad del sistema de tuberías. Esta etapa no considera las tensiones generadas por restricciones geométricas debido a la colocación de apoyos que equilibren el peso y aseguren estabilidad estructural del sistema. Al finalizar esta etapa, se definen las siguientes características:

- Material de tuberías.
- Diámetro interior de tuberías del sistema.
- Espesor de tubería, esta propiedad está directamente relacionada con la presión nominal de diseño de la tubería.
- Espesor de aislante necesario para asegurar la temperatura interior del fluido, esto es muy importante en plantas térmicas o de refrigeración.
- *Layout* preliminar. Esto no es definitivo ya que los análisis llevados a cabo en la segunda etapa pueden variar este resultado preliminar.
- Accesorios de recorrido del sistema (codos, tees, reducciones, yees, etc.). Estos accesorios definen el recorrido de la tubería que está estrechamente vinculado con el *layout* del sistema.
- Accesorios de suministro (válvulas –de todo tipo–, filtros, trampas de vapor, entre otros). Estos accesorios aseguran que el fluido a transportar sea

entregado de manera correcta y con las condiciones establecidas por el usuario en los puntos definidos por el mismo.

- Accesorios auxiliares (trampas de alivio, válvulas anticipadoras de onda, entre otros). Estos accesorios alivian las tensiones ocasionadas por los efectos transitorios como el golpe de ariete.

La Etapa 2 contempla un análisis de las cargas internas y externas del sistema considerando las condiciones estructurales necesarias para posicionar el sistema en cierto espacio definido. Particularmente, una disciplina de esta etapa: análisis de flexibilidad, es la que concierne este trabajo. De forma global, los resultados, al finalizar esta etapa del diseño, son:

- *Layout* definitivo del sistema de tuberías. Al finalizar esta etapa, no siempre, se realizan modificaciones al *layout* original.
- Número de apoyos para que el sistema de tuberías no colapse por su propio peso.
- Distanciamiento entre apoyos para que el sistema de tuberías no colapse por estabilidad.
- Número de elementos auxiliares para aliviar dar mayor flexibilidad al sistema de tuberías y evitar que este colapse por los esfuerzos generados por deformaciones durante operación.
- Número de apoyos adicionales y relocalización de apoyos existentes, de ser necesario el Análisis de cargas externas ocasionales.

A manera de resumen, se muestra la Tabla 1.1, la cual muestra el tipo de análisis, la causa de la falla y los resultados finales esperados luego de la culminación de algún tipo de análisis.

Tabla 1.1. Tipos de análisis de tuberías y sus características

Etapa	Tipo de análisis	Consideraciones evaluadas	Resultados
Etapa 1	Análisis hidráulico	Cargas Internas radiales y pérdidas de energía	Material, diámetro y espesor de tubería
	Análisis térmico	Pérdida de energía	Espesor y tipo de aislante
	Análisis de efectos transitorios	Cargas Internas axiales y Cargas externas.	Redimensionamiento de espesor de tuberías, selección de accesorios especiales.
Etapa 2	Análisis estructural	Cargas externas y cargas internas	Número, tipo y posicionamiento de apoyos
	Análisis de estabilidad	Cargas externas	Reubicación de apoyos
	Análisis de Flexibilidad	Cargas térmicas	Instalación de elementos especiales y reubicación de apoyos

## 1.2. Flexibilidad: propiedad de un sistema de tuberías

La flexibilidad es una propiedad de un sistema de tuberías que se define por la capacidad de admitir deformaciones originadas por dilataciones o contracciones térmicas sin poner en compromiso la integridad del sistema. Esta propiedad se ve influenciada por los siguientes factores:

**Cambios de dirección**, si el número de cambios de dirección es mayor, el sistema tiene mayor capacidad de absorber las deformaciones. Esto se debe a que las deformaciones predominantes en un sistema de tuberías son en la dirección axial de los tubos. Cuando un sistema comprende un tramo recto de tubería empotrado en sus extremos, como en la Ilustración 1.2, no existe dilatación permitida. De diferente forma, cuando un sistema de tuberías contiene uno o más cambios de dirección, como en la Ilustración 1.3, la dilatación permitida se define por la sumatoria de las deformaciones de cada elemento del sistema. De esta forma, mientras el número de cambios de dirección sea mayor, el sistema tendrá mayor capacidad de admitir deformaciones.

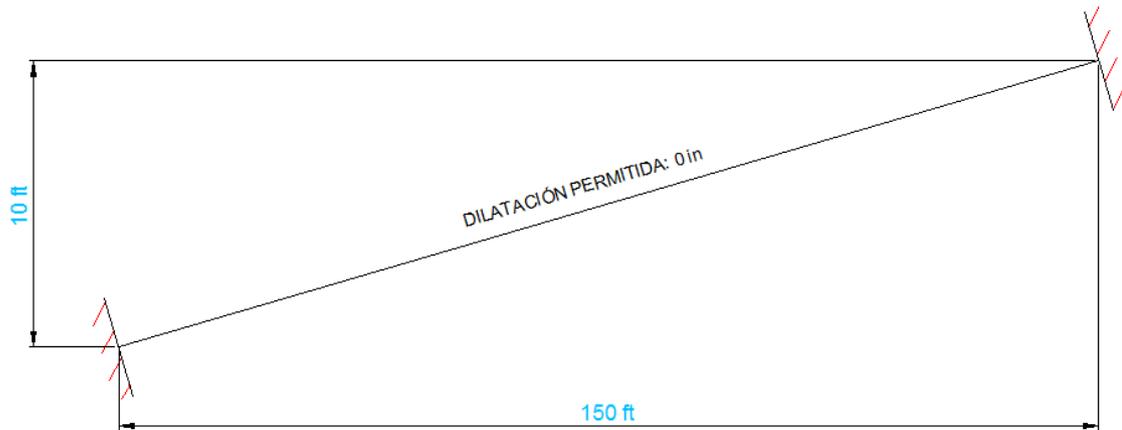


Ilustración 1.2. Sistema de tubería de tramo recto

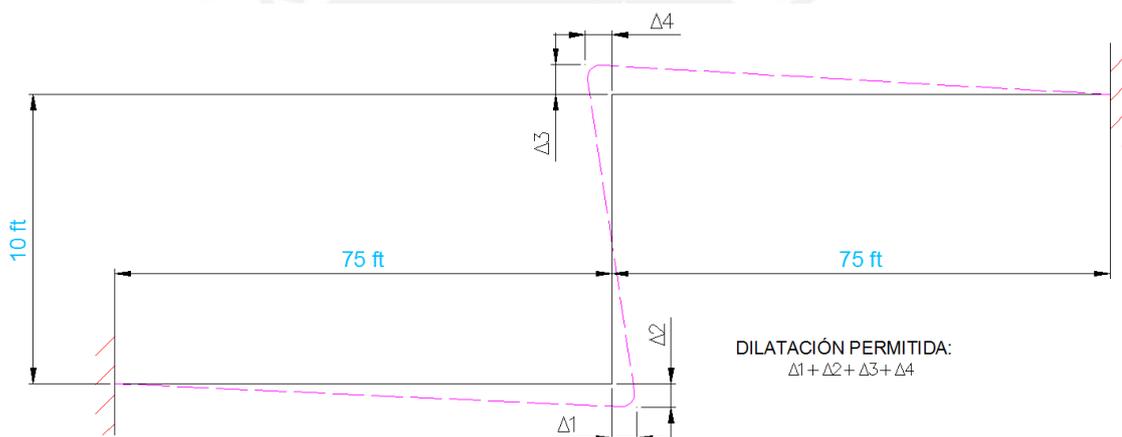


Ilustración 1.3. Sistema de tubería con cambios de dirección

**Tipos de soportes**, estos tienen la función principal de dar estabilidad al sistema. Sin embargo, también aumentan restricciones geométricas. Para explicar este fenómeno, podemos observar la Ilustración 1.4 y compararla con la Ilustración 1.3, en la primera se ha cambiado el apoyo empotrado por un apoyo que tiene dos grados de libertad. Esta decisión afecta positivamente al sistema, ya que se mantiene la capacidad de dilatación del mismo y el tramo vertical no está sometido a flexión. De esta forma, el tipo de soporte a seleccionar debe analizarse y es un factor importante para determinar la flexibilidad de un sistema.

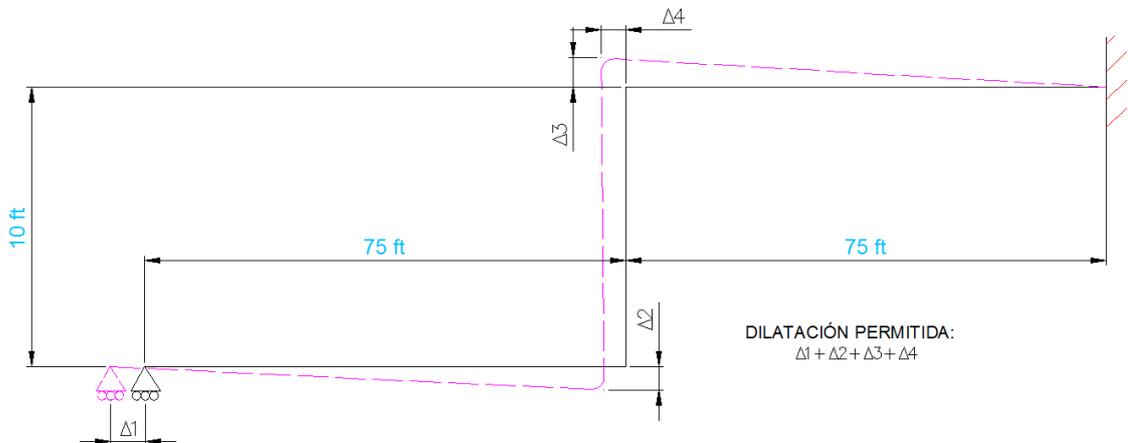


Ilustración 1.4. Efecto de cambiar el tipo de apoyo empotrado

**Número de soportes**, si bien el número de soportes se selecciona a partir de un análisis de estabilidad, este factor también influye en la flexibilidad del sistema. En la figura Ilustración 1.5 se observa el efecto que tiene colocar un soporte empotrado adicional al sistema. Esta opción afecta negativamente al sistema, reduce la dilatación permitida y permite que un tramo de tubería no admita deformación axial.

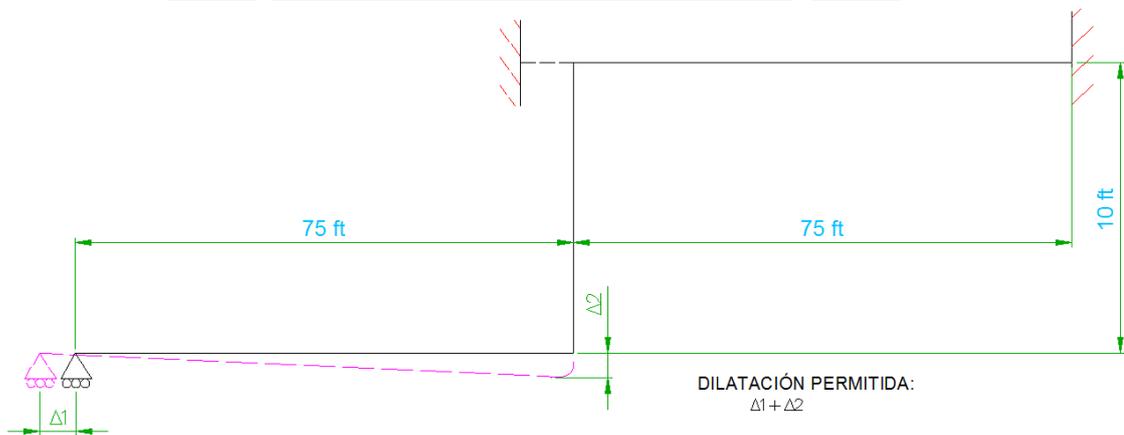


Ilustración 1.5. Efecto de colocar un apoyo empotrado adicional

Estas tres consideraciones son los principales factores para modificar el nivel de flexibilidad de un sistema de tuberías.

### 1.3. Tipos de Carga

Todas las etapas de cálculo del diseño de un sistema de tuberías analizan alguna carga en el sistema, las cargas generan tensiones y estas son la columna vertebral de los principios de criterios de falla. Definir y conocer el tipo de cargas que soportan los sistemas de tuberías se hace imperativo. Entre las principales cargas tenemos:

- Cargas internas, originadas por las condiciones del fluido que se transporta.
- Cargas externas, originadas por condiciones externas del sistema de tuberías.
- Cargas térmicas, originadas por las gradientes de temperaturas generadas por las condiciones de operación.

Si bien las cargas térmicas del sistema producen esfuerzos internos en las tuberías, no se considerarán cargas internas en el presente trabajo ya que el análisis de estas difiere completamente del análisis de las cargas internas convencionales.

#### 1.3.1. Cargas internas

Las cargas internas pueden ser de dos tipos: axiales o radiales.

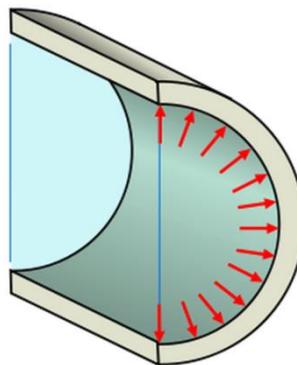


Ilustración 1.6. Carga radial en tubería

Las cargas internas radiales son las originadas por la presión de transporte de la tubería y son el criterio principal para determinar: Material de tubería y Espesor de tubería.

Las cargas internas axiales son originadas normalmente por fenómenos transitorios, como: golpe de ariete, cierre de válvulas, válvulas check, etc.

### 1.3.2. Cargas externas

Las cargas externas son ocasionadas debido diversos factores como:

- Peso de tuberías
- Peso de los elementos instalados en los sistemas de tuberías
- Viento
- Sismos
- Entre otros

Este tipo de carga se utiliza como criterio para: diseñar los apoyos, definir el número de apoyos y definir el posicionamiento de los mismos.

### 1.3.3. Cargas térmicas

Las propiedades elásticas del material de las tuberías permiten que estas se expandan o contraigan dependiendo de las condiciones de temperatura a la que se encuentran. Existe cierto rango de deformación en que la tubería volverá a su estado inicial; sin embargo, esta deformación es limitada por las restricciones geométricas del sistema. Lo que ocasiona que se generen cargas a las que se llamarán cargas térmicas.

La constante oscilación de temperatura del fluido ocasiona fenómenos como: *stress aging*<sup>2</sup>, fenómeno que ocasiona la reducción de resistencia del material; propagación de fisuras<sup>3</sup>; esfuerzos causados por deformaciones; entre otros.

Las cargas térmicas pueden ser debido a contracciones o expansiones del sistema de tuberías y el análisis de este tipo de carga es primordial para el

---

<sup>2</sup> L.A. Efimenko, O.E. Kapustin, V. Yu. Ilyukhin, & O.V. Konoval, 2008

<sup>3</sup> S. Itou, 2007

análisis de flexibilidad, su naturaleza y sus efectos en el sistema serán desarrollados en los siguientes puntos del trabajo.

#### **1.4. Deformación en sistemas de Tuberías**

El material de las tuberías tiene propiedades elásticas. Por ende, el sistema está sometido a deformaciones debido a características de operatividad. Las deformaciones del sistema pueden ocasionarse debido a: expansiones o contracciones térmicas y fuerzas puntuales aplicadas. Siendo el objeto de estudio en el presente trabajo las primeras.

A continuación, se desarrollarán las expresiones que permiten determinar las tensiones generadas debido a la presencia de cargas térmicas. Para la deducción de estas expresiones, se tendrán las siguientes consideraciones y simplificaciones:

- La deformación en tuberías se puede dar de forma axial. (Ver Ilustración 1.7)
- La deformación en tuberías se puede dar en dirección transversal al eje de la tubería (Ver Ilustración 1.9)
- Se asume que no hay rotación de la tubería por efecto de la deformación, esto se debe a la continuidad del sistema de tuberías.
- Debido a que la deformación radial es muy pequeña en comparación con la deformación axial o transversal, puede ser obviada.

##### **1.4.1. Deformación Axial**

En la Ilustración 1.7 se observa el efecto de la dilatación en una tubería empotrada por sus extremos. Este tipo de apoyo restringe el movimiento axial de la tubería, generando una fuerza interna.

Dada la naturaleza elástica de la tubería, se puede escribir<sup>4</sup>:

$$\frac{dF}{A} = E \frac{dx}{L}$$

---

<sup>4</sup> S. Timoshenko, 1951

Donde:  $dF$  es la fuerza aplicada (N)  
 $dx$  es el tramo bajo evaluación (m)  
 $L$  es la longitud total de la tubería (m)  
 $A$  es el área transversal de la tubería (m<sup>2</sup>)  
 $E$  es el módulo de elasticidad (Pa)

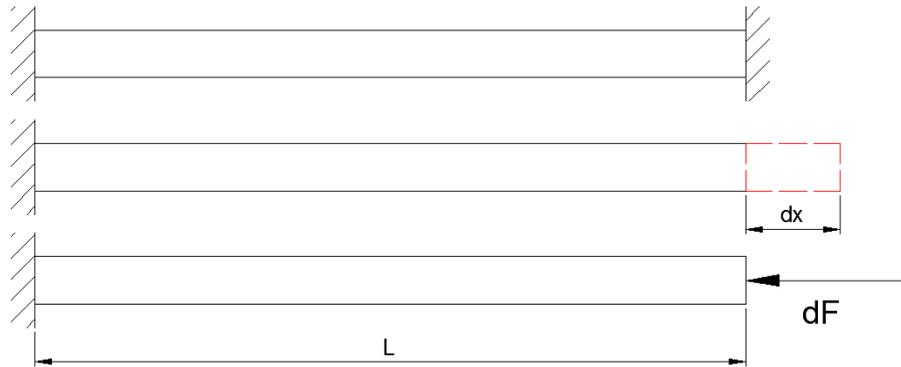


Ilustración 1.7. Efecto de la dilatación térmica en una tubería

Integrando la expresión anterior:

$$S_a = \frac{F}{A} = \frac{E\Delta x}{L} \quad \text{Eq 1.1}$$

Donde:  $S_a$  es el esfuerzo axial (Pa)  
 $\Delta x$  es la variación longitudinal debido al cambio de temperatura (m)

La deformación causada por una carga térmica se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta x = L \cdot \alpha_o \cdot (\Delta T) \quad \text{Eq 1.2}$$

Donde:  $\alpha_o$  es el coeficiente de expansión térmica (1/°C)  
 $\Delta T$  Variación de temperatura (°C)

Para el análisis de sistemas de tuberías se utiliza el coeficiente de expansión lineal ( $\alpha_L$ ), el cual, según DIN EN ISO 53752, es el cambio de longitud del material con el incremento o descenso de la temperatura.

$$\alpha_L = \frac{dx}{dT} \quad \text{Eq 1.3}$$

Donde:  $\alpha_L$  es el coeficiente de expansión térmica lineal (m/mm)  
 $\Delta T$  Variación de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

El coeficiente de expansión lineal depende la variación de temperaturas, es decir, si la variación de temperaturas varía, también lo hará el coeficiente. La expansión o contracción térmica se puede expresar:

$$\Delta x = L \cdot \alpha_L \quad \text{Eq 1.4}$$

Donde:  $\alpha_L$  es el coeficiente de expansión térmica lineal (mm/m)

**Ejemplo:** se quiere calcular la expansión térmica de un tramo recto de tubería IPS 10" de diámetro y 50 ft de largo cuando eleva su temperatura desde 20 $^{\circ}\text{C}$  hasta 200 $^{\circ}\text{C}$ , hasta 310 $^{\circ}\text{C}$  y hasta 365 $^{\circ}\text{C}$ . Se sabe que el material de la tubería es acero inoxidable austenítico.

**Solución:** En el ANEXO 1. Coeficientes de dilatación térmica lineal se adjunta una tabla para determinar el coeficiente de expansión térmica lineal en función del material y la variación de temperatura. Para el acero inoxidable austenítico:

$$\alpha_{L(20-205^{\circ}\text{C})} = 0.038 \text{ in/ft}$$

$$\alpha_{L(20-316^{\circ}\text{C})} = 0.0624 \text{ in/ft}$$

$$\alpha_{L(20-371^{\circ}\text{C})} = 0.075 \text{ in/ft}$$

La interpolación es válida para determinar los coeficientes para temperaturas intermedias. En este caso, debido a que las temperaturas a evaluar la tubería son cercanas a los rangos mostrados, se puede utilizar el coeficiente de expansión lineal más cercano superior.

$$\Delta x_{(20-200^{\circ}\text{C})} = L \cdot \alpha_{L(20-205^{\circ}\text{C})} = 50 \text{ ft} \times 0.038 \text{ in/ft} = 1.90 \text{ in}$$

$$\Delta x_{(20-310^{\circ}\text{C})} = L \cdot \alpha_{L(20-316^{\circ}\text{C})} = 50 \text{ ft} \times 0.064 \text{ in/ft} = 3.20 \text{ in}$$

$$\Delta x_{(20-365^{\circ}\text{C})} = L \cdot \alpha_{L(20-371^{\circ}\text{C})} = 50 \text{ ft} \times 0.075 \text{ in/ft} = 3.75 \text{ in}$$

El coeficiente de dilatación térmica lineal es muy útil en el análisis de flexibilidad, ya que la variación máxima de temperaturas en los sistemas se considera constante.

Uniendo las expresiones 1.1 y 1.4 podemos determinar el esfuerzo axial ( $S_a$ ) en función del coeficiente de expansión térmica lineal.<sup>5</sup>

$$S_a = E \cdot \alpha_L \quad \text{Eq 1.5}$$

El coeficiente de dilatación térmica lineal en los metales es alto, por ello los esfuerzos generados por expansiones térmicas en tramos rectos pueden fácilmente colapsar el sistema de tuberías. Asimismo, se puede observar que la magnitud del esfuerzo generado por la deformación axial es independiente de la longitud de la tubería. Este esfuerzo es únicamente dependiente de las propiedades del material de la tubería y de las condiciones de trabajo del sistema, condiciones que no pueden modificarse. Por ello, si la deformación es tal que hace fallar el sistema, se deben utilizar accesorios adicionales al sistema de tuberías para aliviar la deformación axial.

#### **1.4.2. Deformación Transversal**

La deformación transversal se genera cuando existen cambios perpendiculares en los sistemas de tuberías. En la Ilustración 1.8 se esquematiza la naturaleza de este tipo de deformación, en ella se observa el efecto que tiene la deformación del tramo L2 en el tramo L1 y viceversa.

Si llamamos a L1 el tramo en evaluación y a L2 el tramo perpendicular se puede afirmar que el tramo perpendicular genera un momento en el tramo en evaluación debido a su dilatación o contracción térmica. Si el tramo evaluado es L2 y el tramo perpendicular L1, la afirmación seguiría siendo correcta.

---

<sup>5</sup> San-Soo Jeon, Thomas D. O'Rourke, & Anil N. Neravali, 2004

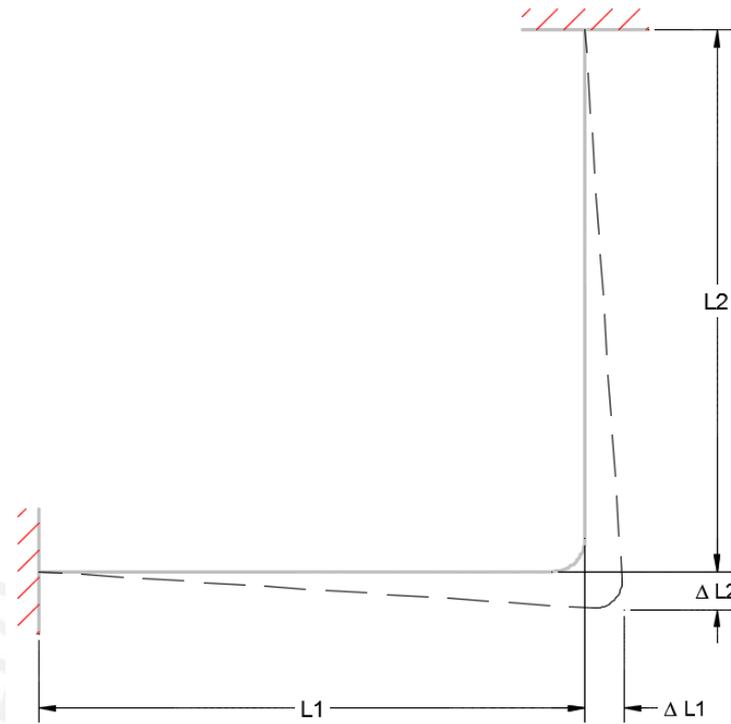


Ilustración 1.8. Efecto de deformación transversal

El efecto de las deformaciones térmicas de los tramos perpendiculares en los tramos evaluados se aproxima acertadamente al comportamiento de una viga guiada cantílever<sup>6</sup> (ver Ilustración 1.9).

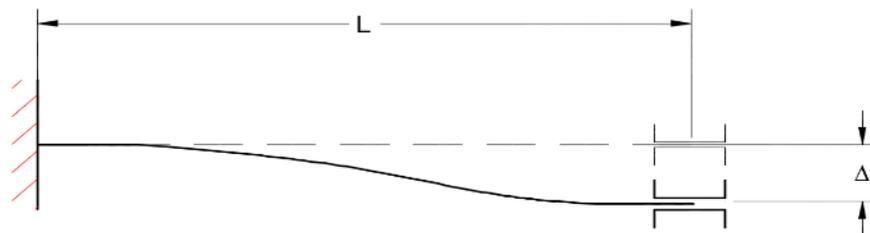


Ilustración 1.9. Viga guiada cantílever

El momento inducido en el tramo evaluado debido a la deflexión es<sup>7</sup>:

<sup>6</sup> Nayyar, Piping Handbook, pág. B.184

<sup>7</sup> Nayyar, Piping Handbook, pág. B.185

$$M = \frac{6EI\Delta}{L^2} \quad \text{Eq 1.6}$$

Donde:

- $M$  Momento inducido en el tramo (N.m)
- $L$  es la longitud del tramo evaluado (m)
- $E$  es el módulo de elasticidad (Pa)
- $I$  es el momento de inercia (m<sup>4</sup>)
- $\Delta$  Deformación térmica del tramo perpendicular (m)

La expresión del esfuerzo flector ( $S_f$ ) se escribe:

$$S_f = \frac{M}{Z} = \frac{6EI\Delta}{ZL^2} = \frac{3ED\Delta}{L^2} \quad \text{Eq 1.7}$$

Donde:

- $S_f$  Esfuerzo flector (Pa)
- $Z$  Módulo de la sección (m<sup>3</sup>),  

$$Z = \frac{I}{y}$$
- $y$  Es la distancia desde el centro de gravedad de la sección hasta el punto de la sección evaluado (m), en este caso, el punto crítico es:

$$r = \frac{D}{2}$$

$D$  Diámetro exterior de la tubería (m)

De la expresión anterior se pueden deducir algunas cosas, el esfuerzo flector depende directamente del material de la tubería, el diámetro exterior de la tubería y de la deformación del tramo perpendicular. Asimismo, es indirectamente dependiente del cuadrado de la longitud de la tubería.

Con respecto a las observaciones anteriores, las condiciones que normalmente no se modifican son: material de la tubería y diámetro exterior de la tubería. Para aminorar el esfuerzo flector se puede disminuir la deformación transversal, pero lo más efectivo es aumentar la longitud del tramo evaluado.

## 1.5. Métodos de empíricos de cálculo

Los métodos empíricos son útiles para hacer una pre evaluación del sistema. Un método empírico bien utilizado, puede determinar si el sistema tiene la flexibilidad suficiente para absorber las deformaciones causadas por expansiones térmicas sin necesidad de hacer el análisis de flexibilidad formal. Entre los métodos empíricos más conocidos tenemos:

### 1.5.1. Método Quy Truong<sup>8</sup>

Este método empírico determina la longitud mínima que debe el tramo perpendicular al tramo evaluado para asegurar la funcionalidad del sistema. Este método está basado en las siguientes consideraciones:

- Utilizado en sistemas con dos únicos anclajes en los extremos.
- Espesor de tubería uniforme
- Sin derivaciones en el sistema, de haberlos, el método se puede utilizar sólo cuando el diámetro exterior de estos es menor a la mitad del diámetro del ramal principal.

La longitud mínima del tramo perpendicular al tramo evaluado debe ser:

$$L = 7.2\sqrt{\Delta \cdot D} \quad \text{Eq 1.8}$$

Si las líneas se encuentran conectadas a bombas o compresores, la expresión a utilizar es:

$$L = 12.45\sqrt{\Delta \cdot D} \quad \text{Eq 1.9}$$

Donde:

- $\Delta$  es la expansión térmica del tramo evaluado (m)
- L longitud mínima del tramo perpendicular (m)
- D Diámetro exterior de la tubería (m)

---

<sup>8</sup> Gómez-Gordo, 2007

### 1.5.2. Método de simplificado según ASME B31.3

Según el código, si la siguiente ecuación empírica se cumple, la flexibilidad del sistema está asegurada. Asimismo, debe ser aplicada bajo las siguientes condiciones:

- Diámetro de tubería constante
- El recorrido no presenta bifurcaciones

$$\frac{D\Delta}{(L-U)^2} \leq K_A \quad \text{Eq 1.10}$$

Donde:

$D$  Diámetro exterior de la tubería, mm o in

$\Delta$  Deformación resultante, mm o in

$$\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad \text{Eq 1.11}$$

$L$  Longitud desarrollada de la tubería entre anclajes o longitud lineal de las tuberías que conforman el sistema a evaluar, m o ft.

$U$  Distancia recta entre anclajes, m o ft

$K_A$  Constante.

Para tuberías de acero es  $208 \text{ mm}^2/\text{m}^2$  o  $0.03 \text{ in}^2/\text{ft}^2$

Para tuberías que no son de acero, se calcula con la expresión

$$K_A = \frac{S_a}{E_a} \quad \text{Eq 1.12}$$

$S_a$  Es el esfuerzo máximo permisible por la tubería

$E_a$  Es la constante de elasticidad de la tubería

La longitud de desarrolla se calcula sumando la longitud de cada tramo de tubería que conforma el sistema a evaluar. Por ejemplo, si tiene un sistema de tuberías cuyo layout se esquematiza en la Ilustración 1.10, la longitud desarrollada de este tramo es:  $100 + 80 + 100 \text{ ft} = 280 \text{ ft}$ .

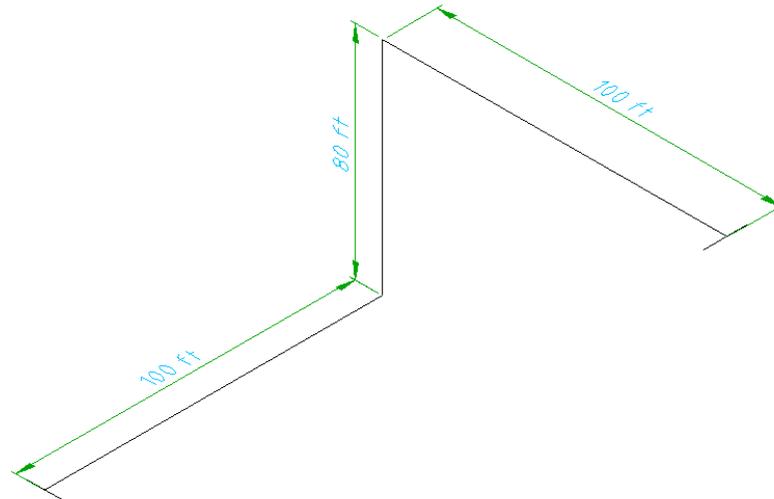


Ilustración 1.10. Cálculo de longitud desarrollada

Asimismo, observando la expresión empírica en la Eq 1.10. se puede decir que la única forma de aumentar la flexibilidad del sistema es aumentando la longitud desarrollada de la tubería entre anclajes. Esto es debido a que las propiedades del material definen el factor de la derecha y no es recomendable variar el diámetro exterior de la tubería.

## 2. CAPÍTULO 2: CÓDIGO DE DISEÑO ASME B31.3

En el capítulo anterior se han descrito las expresiones necesarias para determinar el esfuerzo axial y el esfuerzo flector generado por deformaciones térmicas en un sistema de tuberías. Estos esfuerzos deben ser comparados con límites definidos según el tipo de material de las tuberías, según la aplicación y según el tipo de fluido que se transporta.

Asimismo, el análisis teórico no refleja de manera completa la complejidad del fenómeno, ya que los esfuerzos debido a cargas térmicas no son constantes, sino varían dependiendo de la temperatura de trabajo y condiciones de operación del sistema.

Por esos motivos, los códigos de diseño determinan coeficientes y factores de seguridad dependiendo del caso en cuestión. Estos códigos son utilizados a gran escala debido a la confiabilidad de las organizaciones que los postulan. Entre las principales se pueden nombrar a: *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, *American Petroleum Institute (API)*, *Electric Manufacturers Association (NEMA)* y *Expansion Joints Manufacturer Association (EJMA)*. Algunos códigos son:

- ASME B31.1 Power Piping.
- ASME B31.3 Process Piping.
- API 610 Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries
- API 611 General Purpose Steam Turbines for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services.

- API 617 Axial and Centrifugal Compressors and Expander- Compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services.
- API 618 Reciprocating Compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services.
- API 560 Fire Heaters for General Refinery Service
- API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage
- API 661 Air Cooled Heat Exchangers for General Refinery Service
- NEMA SM-23 Steam Turbines for Mechanical Drive Services
- EJMA Standards of the Expansion Joints Manufacturers Association

La utilización de uno u otro código de diseño dependen no sólo del criterio del ingeniero analista, sino mayormente de la validación del método por ciertos tipos de industria.

En este trabajo se explorará el código de diseño según la *American Society of Mechanical Engineers* (ASME B31.3. Process Piping) para poder tener herramientas necesarias para calcular los esfuerzos límites de diseño, entender la naturaleza de los mismos e incluso obtener un método para hacer una previa evaluación al sistema. Este código ha sido seleccionado ya que está enfocado hacia plantas químicas, refinerías de petróleo, plantas de procesamiento de gas natural, etc. Asimismo, este código excluye aplicaciones cuya presión interna es menor a 15 psi y un temperatura menor a 186°C, es decir, se aplica a sistemas de tubería con altos niveles de temperatura de trabajo.<sup>9</sup>

### **2.1. Condiciones de trabajo según Código ASME B.31.3**

El código ASME B31 especifica cinco condiciones de trabajo a tomar en cuenta antes de diseñar un sistema de *piping*.

La primera condición es la **presión** del sistema, tanto interna como externa. La segunda condición es la **temperatura** de trabajo, la temperatura de diseño es la temperatura máxima de la tubería durante su ciclo de trabajo. La tercera condición son las **influencias ambientales**, tanto las caídas de temperatura significativas que influyan en la presión de trabajo del sistema (caídas de presión por debajo de la

---

<sup>9</sup> Nayyar. Handbook of Piping, 2000

presión atmosférica), como la expansión del fluido que incrementa significativamente la presión interna del sistema. La cuarta condición son los **efectos dinámicos** (impacto, vientos, terremotos y vibraciones). La quinta y última condición son las **cargas de expansión y contracción térmica**.

Los criterios antes mencionados están ampliamente desarrollados en el código de diseño. Sin embargo, no todos ellos son objeto de estudio del presente trabajo. A continuación se desarrollarán los puntos importantes para el análisis de flexibilidad en según el código de diseño.

. El código de diseño agrupa los tipos de fallas como se describen a continuación:

- Fallas por excesivos esfuerzos externos e internos.
- Fallas por fragilización
- Fallas por excesiva deformación plástica
- Falla por inestabilidad plástica
- Falla por fatiga

El origen de estas fallas son esfuerzos de diferentes tipos, esta clasificación de esfuerzos permite establecer límites de diseño y clasificar de manera más ordenada los tipos de fallas descritos anteriormente.

## **2.2. Categorías de esfuerzos según su naturaleza**

### **2.2.1. Esfuerzos primarios (*Primary Stresses*)**

Los esfuerzos primarios son originados por cargas externas e internas del sistema de tuberías. Para analizar los esfuerzos primarios, el diseñador debe tomar en cuenta las siguientes teorías de falla: teoría de máxima tensión principal y teoría de máxima tensión de corte o Criterio de Tresca.

Para evitar la falla del sistema por causa de los esfuerzos primarios, el diseñador debe equilibrar los esfuerzos producidos por el funcionamiento del sistema

mediante soportes colocados estratégicamente y la selección del material adecuado de la tubería para el sistema de *piping*.

Asimismo, la limitación de los esfuerzos primarios evita la deformación plástica en las tuberías.

### **2.2.2. Esfuerzos secundarios (*Secondary Stresses*)**

Los esfuerzos secundarios son causados por restricciones estructurales, deformaciones del sistema y movimiento de los anclajes o soportes.

Las deformaciones del sistema de *piping* se deben a cargas térmicas o esfuerzos externos adicionales a los considerados en el diseño, este tipo de esfuerzo no debe ser equilibrado, a diferencia de los esfuerzos primarios, estos deben ser absorbidos, de otra manera pueden causar una deformación plástica tal que provoque un colapso en el sistema de *piping*.

### **2.2.3. Esfuerzos pico (*Peak Stresses*)**

Los esfuerzos pico son provocados por cargas cíclicas que generan endurecimiento localizado en las tuberías. Estos esfuerzos afectan las zonas con grandes concentraciones de esfuerzos y con altos gradientes de temperatura.

Como consecuencia principal de no limitar los esfuerzos pico, tenemos la falla por fatiga de la tubería.

## **2.3. Cálculo de esfuerzos en el sistema de tuberías**

El código de diseño ASME B31.3 valida el método para calcular los esfuerzos en sistemas de tuberías. Los esfuerzos son clasificados según el tipo de carga que los origina.

### 2.3.1. Esfuerzos debido a cargas sostenidas

Las cargas sostenidas son las que están presentes durante todo el tiempo de vida del sistema de tuberías, entre estas tenemos: la presión, el peso y otras cargas mecánicas. Estas cargas generan esfuerzos longitudinales que se calculan de la siguiente forma:

$$S_L = \frac{PD_o}{4t_n} + \frac{iM_A}{Z} \leq S_h \quad \text{Eq 2.1}$$

Donde:

$i$	Factor de intensificación, $0.75i \geq 1$
$D_o$	Diámetro exterior de tubería
$t_n$	Espesor de tubería
$M_A$	Es el momento resultante debido a cargas sostenidas, medido en N-m
$S_h$	Máximo esfuerzo admisible a la máxima temperatura del material
$S_L$	Suma de esfuerzos longitudinales debido a presión, peso y otras cargas sostenidas
$Z$	Módulo de sección, medido en $\text{mm}^3$

La ecuación anterior tiene dos elementos, el primero determina el esfuerzo debido a la presión interna de la tubería y el segundo determina el esfuerzo debido al momento generado por el peso de la tubería, aislante y otros accesorios.

El primer término se determina:

$$S_1 = \frac{F}{A} = \frac{P(D_o - 2t_n)^2}{D_o^2 - (D_o - 2t_n)^2} = \frac{P(D_o^2 - 4D_o t_n + 4t_n^2)}{4D_o t_n}$$

En tuberías, la relación  $D_o/t_n$  es mayor a 10, haciendo que  $t_n$  se pueda obviar en el análisis, por lo tanto:

$$S_1 = \frac{PD_o}{4t_n}$$

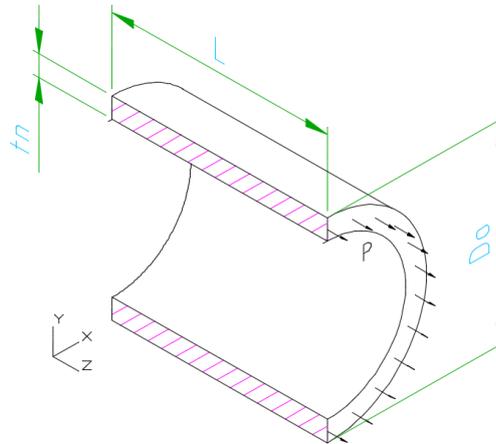


Ilustración 2.1. Esfuerzo debido a presión interna de la tubería

El segundo término es la ecuación básica para calcular el esfuerzo flector.

Estos dos términos evalúan los esfuerzos **longitudinales** que se generan en las tuberías.

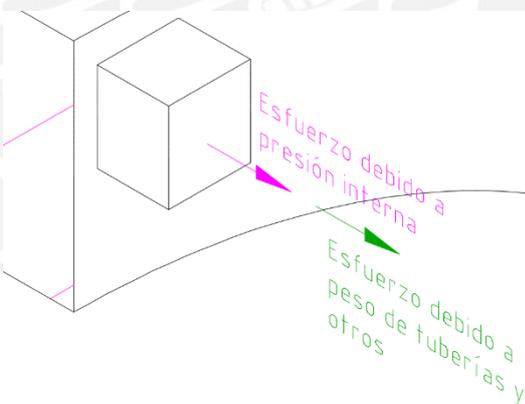


Ilustración 2.2. Esfuerzos longitudinales debido a cargas sostenidas

### 2.3.2. Esfuerzo debido a cargas ocasionales

Las cargas ocasionales son las que aparecen, mayormente, debido a factores ambientales. Los efectos de cargas ocasionales que actúan sobre el sistema de *piping* deben evaluarse según la expresión:

$$\frac{PD_o}{4t_n} + \frac{0.75iM_A}{Z} + \frac{0.75iM_B}{Z} \leq kS_h \quad \text{Eq 2.2}$$

- Donde:
- $k$  Es 1.15 cuando las cargas actúan por no más de 8 horas/vez y no más de 800 horas/año.  
Es 1.12 cuando las cargas actúan por no más de 1 hora/vez y no más de 80 horas/año
  - $M_B$  Es el momento resultante debido a cargas ocasionales, como el efecto de válvulas de seguridad, golpes de ariete, terremotos, etc., medido en N-m

### 2.3.3. Cargas por desplazamientos

Este tipo de cargas se originan a partir de expansiones térmicas restringidas geométricamente, se calculan utilizando las siguientes expresiones:

$$S_E = \sqrt{S_b^2 + 4S_t^2} \leq S_A \quad \text{Eq 2.3}$$

- Donde:
- $S_E$  Esfuerzo de flexibilidad
  - $S_b$  Esfuerzo flector resultante
  - $S_t$  Esfuerzo de torsión

$$S_t = \frac{M_t}{2Z} \quad \text{Eq 2.4}$$

- Donde:
- $M_t$  Momento torsor

Los esfuerzos flectores resultante y de torsión tienen formas de cálculo dependientes de la trayectoria de las tuberías. Las tuberías del sistema pueden cambiar su sentido o bifurcar su camino. El cambio de sentido se realiza, generalmente, utilizando codos; y para la bifurcación, tees.

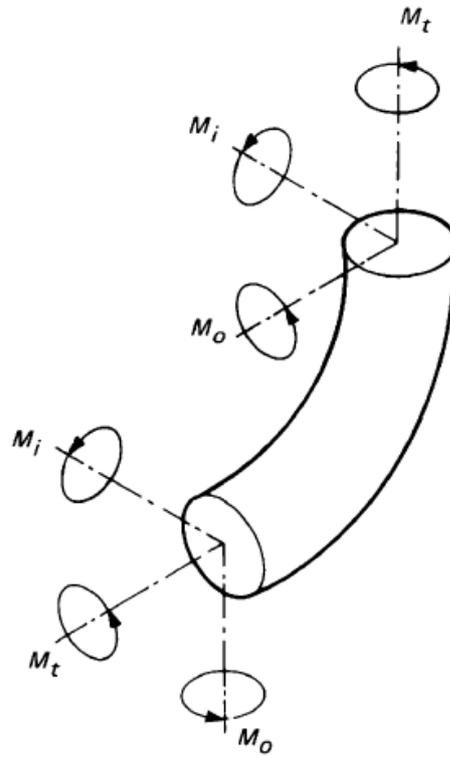


Ilustración 2.3. Momentos en codos o *bend*<sup>10</sup>

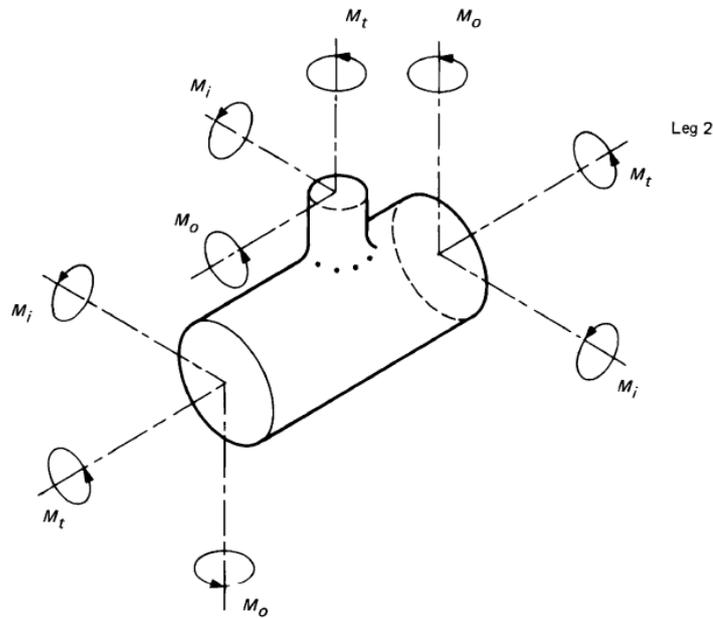


Ilustración 2.4. Momentos es bifurcación de reducción.<sup>11</sup>

<sup>10</sup> ASME B31.3 Process Piping, 2007

<sup>11</sup> ASME B31.3 Process Piping, 2007

En la Ilustración 2.3 se observan los tipos de momentos que se generan en un cambio de dirección. Siendo:

$$S_b = \frac{\sqrt{(iM_i)^2 + (iM_o)^2}}{Z} \quad \text{Eq 2.5}$$

Donde:

- $i_i$  Factor de intensificación *in-plane*
- $i_o$  Factor de intensificación *out-plane*
- $M_i$  Momento flector *in-plane*

En la Ilustración 2.4 se observan los tipos de momentos que se generan en una bifurcación. Las bifurcaciones pueden reducir el diámetro o mantenerlo, si el diámetro se mantiene, el esfuerzo  $S_b$  se calcula utilizando la Eq 2.5; si la bifurcación tiene una reducción, se procede de la siguiente manera:

$$S_b = \frac{\sqrt{(iM_i)^2 + (iM_o)^2}}{Z_e} \quad \text{Eq 2.6}$$

Donde:  $Z_e$  Módulo efectivo de la reducción

$$Z_e = \pi r_2 T_s \quad \text{Eq 2.7}$$

Donde:

- $r_2$  Radio efectivo de la reducción
- $T_s$  Espesor efectivo de la reducción

$$T_s = iT_b \quad \text{Eq 2.8}$$

Donde:  $T_b$  Espesor de la tubería de la reducción

#### 2.4. Esfuerzos límites de diseño

El código limita los esfuerzos de diseño según el tipo de carga a evaluar. Los siguientes tipos de esfuerzos ocasionan esfuerzos de deformación en el sistema de tuberías; pero, la importancia de uno u otro no es la misma. Es responsabilidad del analista determinar las criticidad de alguna de los esfuerzos a evaluar, para ello se debe tener conocimiento del origen de este tipo de cargas.

### 2.4.1. Esfuerzos sostenidos (*Sustained Stresses*)

La suma de esfuerzos sostenidos debido a la presión de trabajo y peso de tuberías, aislantes y accesorios no debe exceder el máximo esfuerzo permisible del material a la máxima temperatura de trabajo.

### 2.4.2. Esfuerzos debido a cargas ocasionales

La suma de estos esfuerzos ocasionales no debe exceder 1.33 veces el máximo esfuerzo permisible del material a la máxima temperatura de trabajo.

### 2.4.3. Esfuerzos por desplazamientos permisibles

Este tipo de esfuerzo es ocasionado por la expansión y contracciones térmicas del sistema de tuberías. El esfuerzo admisible para este tipo de esfuerzo se calcula de la siguiente manera:

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad \text{Eq 2.9}$$

Cuando el esfuerzo admisible a la máxima temperatura ( $S_h$ ) es mayor a la suma de esfuerzos longitudinales ( $S_L$ ), el esfuerzo admisible para los esfuerzos por desplazamientos se calcula como:

$$S_A = f(1.25S_c + 1.25S_h - S_L) \quad \text{Eq 2.10}$$

Donde:	$S_A$	Es el esfuerzo para esfuerzos causador por deformaciones
	$f$	Factor de esfuerzos cíclicos por el total de esfuerzos equivalentes. El valor mínimo de $f$ es 0.15
	$S_c$	Esfuerzo permisible a la mínima temperatura de la durante el ciclo trabajo tubería
	$S_h$	Esfuerzo permisible a la máxima temperatura de la durante el ciclo de trabajo tubería

Asimismo,  $f$  se calcula:

$$f = 6/N^{0.2} \leq 1 \quad \text{Eq 2.11}$$

Donde:  $N$  Es el número de esfuerzos por desplazamientos referenciales esperados durante el tiempo de servicio del sistema de tuberías

## **2.5. Método empírico de análisis de flexibilidad**

El método empírico ha sido desarrollado en el acápite 1.5.2

## **2.6. Metodología de análisis de flexibilidad según el código ASME B31.3**

Los conceptos previos han sido expuestos para poder entender a cabalidad la metodología para el análisis de flexibilidad que propone el código ASME B31.3. Este se esquematiza en la Ilustración 2.5.

Como se puede observar, la metodología comienza con una pre evaluación del sistema (acápite 2.5), si la pre evaluación arroja resultados positivos, el sistema tiene flexibilidad suficiente como para funcionar correctamente. De forma contraria, se procede a calcular el esfuerzo límite (acápite 2.4.3) y el esfuerzo de flexibilidad (acápite 2.3.3). Finalmente, se verifica el esfuerzo calculado, si este supera el límite de diseño, se debe proceder a hacer cambios en la configuración del sistema y calcular nuevamente el esfuerzo de flexibilidad. Contrariamente, si el esfuerzo de flexibilidad es menor al esfuerzo de diseño, el sistema tiene suficiente flexibilidad.

La metodología de análisis de flexibilidad del código de diseño asume ciertas consideraciones y exclusiones:

- La ubicación, número y tipo de soportes del sistema estas definidos
- El cálculo de esfuerzos de flexibilidad se realiza en los codos y tees del sistema
- El código no brinda información criterios de selección de soluciones ante la falta de flexibilidad del sistema
- El código no brinda un método de cálculo de los momentos flectores y torsores necesarios para determinar el esfuerzo de flexibilidad

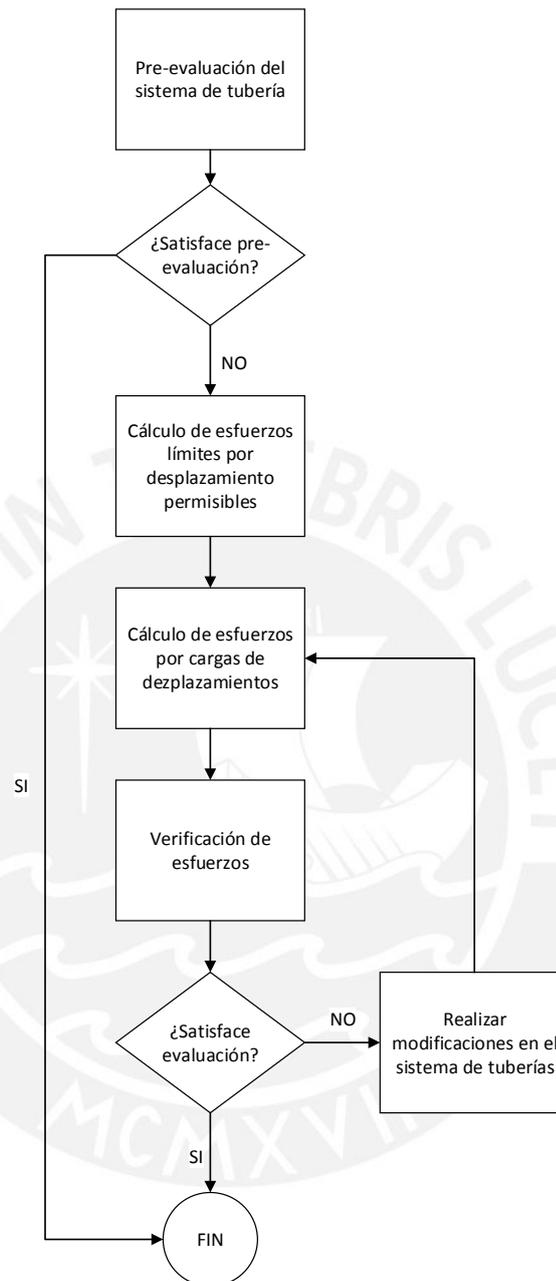


Ilustración 2.5. Metodología de Análisis de Flexibilidad según ASME B31.3

De esta forma, el código ASME B31.3 brinda una metodología de análisis que se limita al cálculo y verificación del esfuerzo de flexibilidad, sin dar mayor información ni herramientas de cómo solucionar la falta de flexibilidad del sistema. Al no brindar las herramientas de cálculo de los momentos en los codos o las tees, hace que el analista recurra a otras herramientas de cálculo teóricas o computarizadas, estas últimas son las más utilizadas.

Siendo el objetivo principal de este trabajo el presentar una metodología que tenga información relevante sobre soluciones prácticas al fenómeno y métodos de cálculo de esfuerzos de flexibilidad para su posterior verificación, la metodología según el código ASME B31.3 sólo proporciona información útil con respecto a la pre evaluación del sistema y el cálculo de los límites permisibles, información necesaria y que será tomada en cuenta para el diseño de la metodología propuesta.



### 3. CAPÍTULO 3: SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS

Cuando las dilataciones o contracciones de los elementos de un sistema de tuberías son restringidas, se generan esfuerzos. En otras palabras, la restricción de las deformaciones térmicas y la magnitud de los esfuerzo están íntimamente relacionados, por ello, los detalles constructivos del sistema a diseñar o analizar deben ser tomados en consideración.

El analista o diseñador debe buscar que las cargas térmicas sean uniformemente distribuidas a lo largo del sistema evaluado y esto se logra aliviando las cargas generadas por las deformaciones térmicas y/o modificando las restricciones del sistema (ubicación de soportes, tipo de soportes, etc).

El siguiente capítulo dará las herramientas necesarias para que el analista pueda discriminar las diferentes soluciones ofrecidas por el mercado y seleccionar la que se acomode a sus necesidades. Este trabajo dividirá a estas soluciones en tres grupos:

- Accesorios
- Soportes flexibles
- Criterios de instalación

#### 3.1. Accesorios

Los accesorios son elementos del sistema por los que pasa el fluido a transportar, es decir, el fluido transitará por el interior de estos elementos. Entre los accesorios

más importantes encontrados en el mercado tenemos: Lazos de expansión (*expansion loops*) y las juntas de expansión (*expansion joint*).

### 3.1.1. Lazos de expansión (*expansion loops*)

Los lazos de expansión se utilizan mayormente cuando las deformaciones axiales son grandes, esto sucede normalmente en plantas térmicas, plantas generadoras de energía o sistemas con utilización de vapor (ya que en estas aplicaciones la temperatura del fluido supera los 600°C normalmente). Como se vio en el acápite 1.4.1, el esfuerzo generado por una deformación axial no depende de la longitud de la tubería, sino de la temperatura de trabajo del sistema y el material de la tubería.

Los lazos de expansión utilizan el principio de deformación transversal de la tubería (principio descrito en el acápite 1.4.2). En el acápite referenciado se presentó la expresión del esfuerzo flector en función de la deformación transversal. Replanteando la Eq 1.7:

$$\Delta x = \frac{S_f}{3ED} H^2 \quad \text{Eq 3.1}$$

Donde:

- $\Delta x$  es la expansión axial máxima que puede absorber el lazo de expansión
- $S_f$  es el esfuerzo axial (Pa)
- $E$  es el módulo de Young del material (Pa)
- $D$  es diámetro exterior de la tubería (m)
- $H$  es la altura del lazo de expansión (m)

En la Eq 3.1 se puede observar que existen parámetros que dependen del material de la tubería, los cuales se pueden tratar como una constante. Es decir, la deformación axial que puede absorber depende del cuadrado de la altura del lazo.

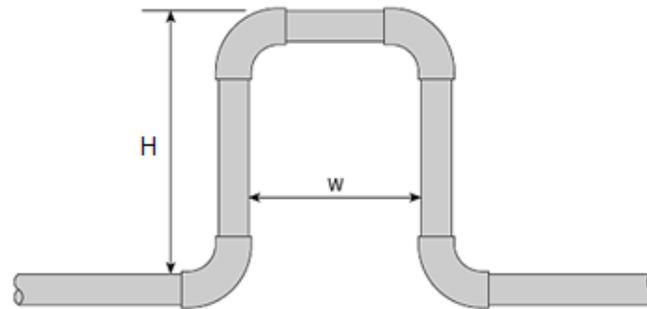


Ilustración 3.1. Juntas de expansión fabricadas

Cuando el lazo de expansión fabricado es demasiado alto, se puede construir lazos de expansión tridimensionales, utilizando la Eq 3.4 con la consideración mostrada en la Ilustración 3.2 (idealizando la altura del lazo igual a la suma de los tramos perpendiculares).

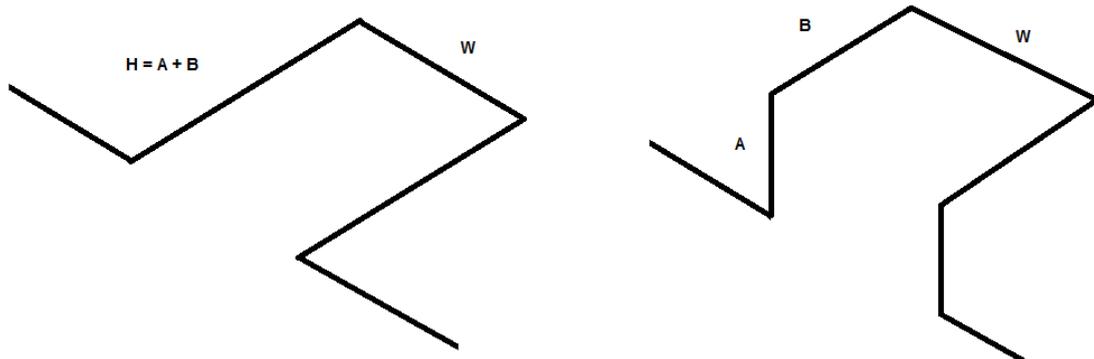


Ilustración 3.2. Idealización de lazo tridimensional

Luego de realizar un análisis teórico de los esfuerzos flectores generados en los lazos de expansión (conceptos desarrollados en el acápite 1.4.2), se propone el proceso de selección de los lazos de expansión:

1. Determinar la expansión axial total del tramo recto
2. Determinar el esfuerzo límite del material
3. Comienza un proceso iterativo para determinar el número lazos de expansión a instalar
  - a. Determinar la altura máxima del lazo utilizando la ecuación Eq 3.11, con una deformación igual a:

$$\Delta/(2n) \quad \text{Eq 3.2}$$

Donde:  $\Delta$  La deformación axial total del tramo recto  
 $n$  Número de lazos a instalar

- b. Si el lazo se fabricará, calcular el ancho con la Eq 3.3. Si la condición no se cumple, aumentar el número de lazos.

$$W = 5D > 2. (\Delta/2n) \quad \text{Eq 3.3}$$

Donde:  $W$  Ancho del lazo de expansión  
 $D$  Diámetro exterior de la tubería

- c. Comprobar si las dimensiones del lazo pueden ser instaladas, de no cumplir la condición, aumentar el número de lazos.

La metodología descrita se aplica en el ANEXO 7. Selección de número y características de lazo de expansión.

### 3.1.2. Juntas de expansión (*expansion joint*)

Las juntas de expansión son accesorios, que de la misma forma que los lazos de expansión, absorben la dilatación axial de la tubería. El principio de funcionamiento que utilizan estos accesorios es absorber la energía de deformación mediante elementos altamente elásticos, es decir, transforma la energía de deformación en energía elástica.

Este accesorio es de alto costo; sin embargo, tiene mayor capacidad para absorber esfuerzos producidos por dilatación elástica.

La selección de este tipo de accesorio es parecida a la selección de los lazos de expansión. Entre los tipos de juntas, tenemos:

- Juntas de expansión de tejido, son utilizadas para instalaciones con presiones de trabajo bajas. (ver Ilustración 3.3)



Ilustración 3.3. Junta de expansión de tejido metálico.

- Juntas de expansión de goma, tiene gran resistencia química y absorbe de manera eficiente las vibraciones generadas por las condiciones de trabajo del sistema. Ver Ilustración 3.4.

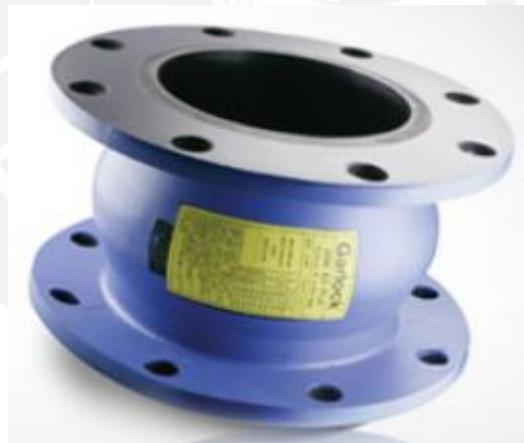


Ilustración 3.4. Junta de expansión de goma.

- Juntas de expansión metálica, las más utilizadas, este tipo de juntas tiene una mayor capacidad que las anteriores. Asimismo, soportan mayores temperaturas. Ver Ilustración 3.5.

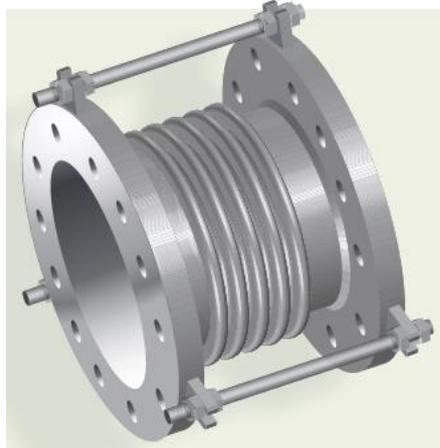


Ilustración 3.5. Junta de expansión metálica

Se adjunta un ejemplo de selección de juntas de expansión en el ANEXO 8. Selección de Juntas de Expansión.

### **3.2. Soportes flexibles**

Los soportes flexibles tienen la característica de no modificar el *layout* del sistema de tuberías. Se colocan en las zonas de apoyo para aliviar las cargas debido al peso de tuberías, aislantes, fluido y accesorios, este alivio se produce generando esfuerzos en sentido contrario a la deformación. Este tipo de solución tiene dos principales funciones:

1. Aliviar las deformaciones causadas por efectos térmicos, cargas externas o cargas ocasionales (sismos, desastres naturales, etc.)
2. Brindar soporte a los sistemas de tuberías, es decir, puntos de apoyo.

Este tipo de soportes funciona gracias al principio de deformación elástica (de forma parecida que las juntas de expansión) y está construido con resortes internos. Estos pueden ser de **carga constante** o **carga variable**.

La elección de uno u otro depende de la variabilidad de la carga y el soporte, esta propiedad se define como:

$$V = \frac{\Delta \cdot R}{HL} \cdot 100\% \quad \text{Eq 3.4}$$

Donde:

$V$  Variabilidad (medida en %)

$R$  Rigidez del resorte (N/m o lb/in)

$HL$  Carga en operación en caliente (N o lb)

### 3.2.1. Carga constante (*constant hanger*)

Se utiliza cuando la variabilidad es menor al 6 %<sup>12</sup>.

El objetivo de utilizar soportes de carga constante es mantener las cargas de la tubería durante la expansión o contracción térmica equilibradas. Este tipo de soporte se utiliza cerca de equipos críticos, ya que no permite que la carga se transmita hacia otros tramos del sistema. Entre equipos críticos, tenemos: válvulas de alivio y seguridad para sistemas de gases y vapor<sup>13</sup> Para la selección de este equipo, se debe tomar en consideración tres aspectos:

- Carga durante operación en caliente
- Deformación máxima en operación en caliente
- Ajuste de deformación

La carga y deformación durante operación en caliente se calculan durante el análisis, las formas de realizar estos cálculos se describirán más adelante (acápites 4.2.2 y 4.2.3). El ajuste de deformación es un criterio dado por el fabricante del soporte, en términos generales, se utiliza el siguiente criterio:

- Desplazamientos máximos en operaciones en caliente menores a 5 pulgadas, el ajuste de deformación es +1 pulgada.
- Desplazamientos máximos en operaciones en caliente mayores a 5 pulgadas, el ajuste de deformación es +20% de la deformación de selección.

<sup>12</sup> The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2007

<sup>13</sup> *Ibidem*

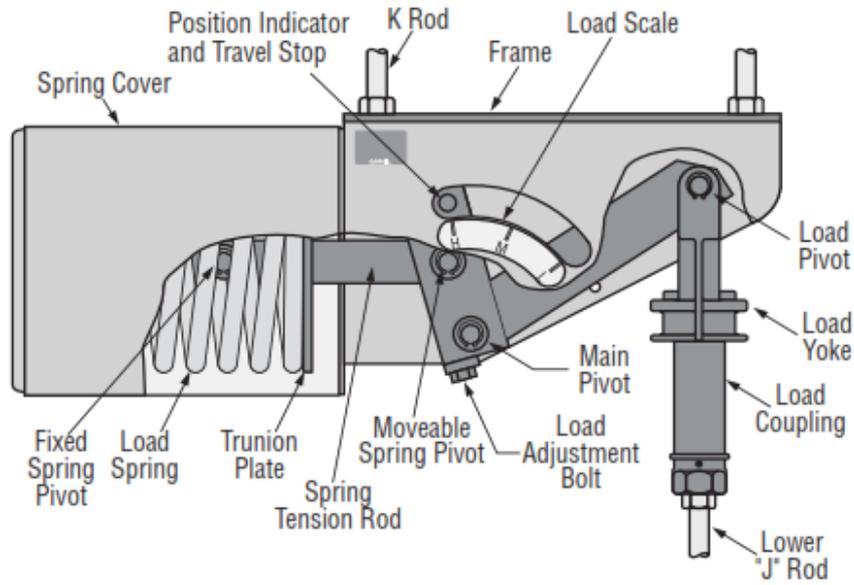


Ilustración 3.6. Soporte flexible de carga constante.

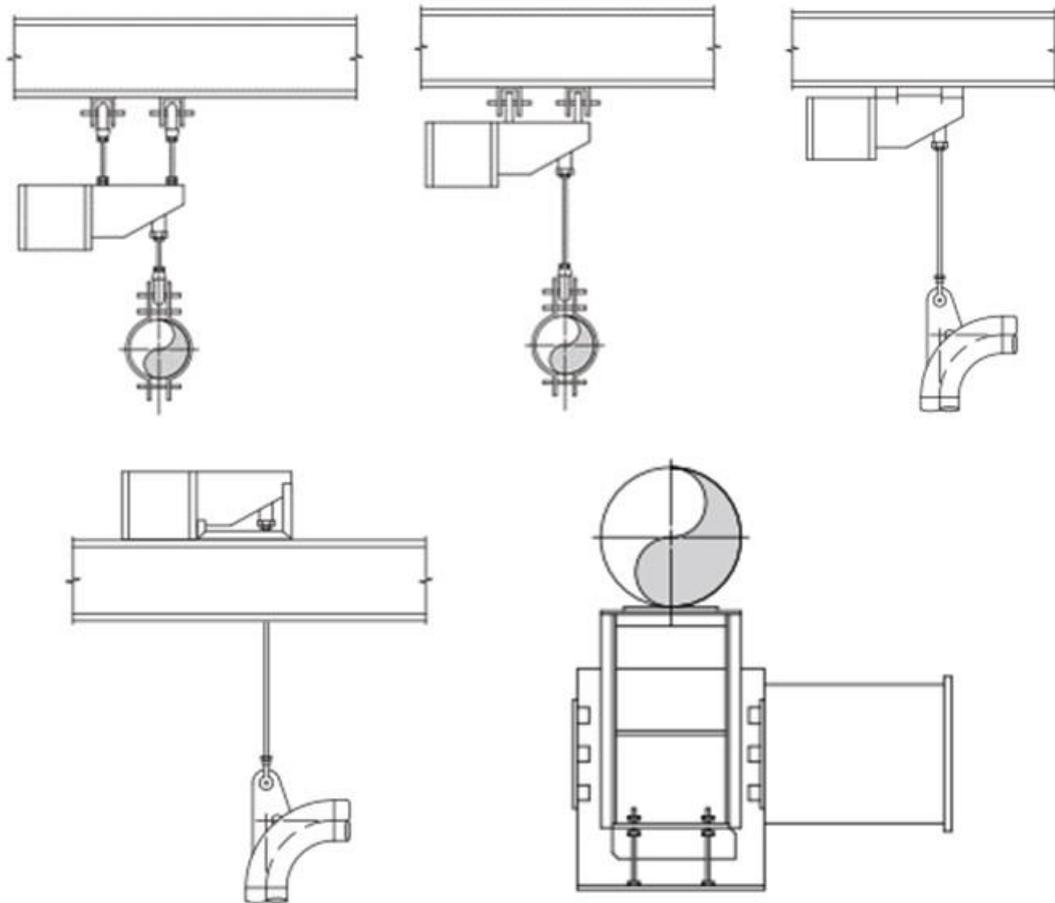


Ilustración 3.7. Formas constructivas de instalación de soporte flexible de carga constante

Entre las principales formas constructivas de instalación de este tipo de soportes, tenemos los casos especificados en la Ilustración 3.7.

Para la selección de este tipo de soporte se adjunta el ANEXO 3. Tablas de selección de soportes flexibles de carga constante

### 3.2.2. Carga variable (*spring hanger*)

Este tipo de soporte se utiliza cuando la variabilidad es máximo 25 % y cuando no se encuentran equipos críticos cerca al tramo a instalar. En la Ilustración 3.8 se muestran formas constructivas comunes para instalar este tipo de soporte.

La selección de este tipo de soporte se realiza con dos elementos: **carga en condiciones frías** y **desplazamiento máximo**. La carga en condiciones frías se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$CL = HL + \Delta \cdot R \quad \text{Eq 3.5}$$

Donde:

*CL* Carga en condiciones frías (lb)

*HL* Carga en operación en caliente (N o lb)

$\Delta$  Deformación debido a condiciones caliente (in)

*R* Rigidez del resorte (N/m o lb/in)

Para seleccionar el tamaño de soporte a utilizar, se adjunta una tabla con las principales características de estos soportes en el ANEXO 4. Tablas de selección de soportes flexibles de carga variable. La aplicación de estos conceptos se realizará en el acápite 4.2.4.

### 3.3. Criterios de instalación

Existen otras formas de aliviar los esfuerzos generados por deformaciones térmicas. A continuación se describirán las maneras de prevenir este tipo de esfuerzos durante el montaje de las líneas de tuberías.

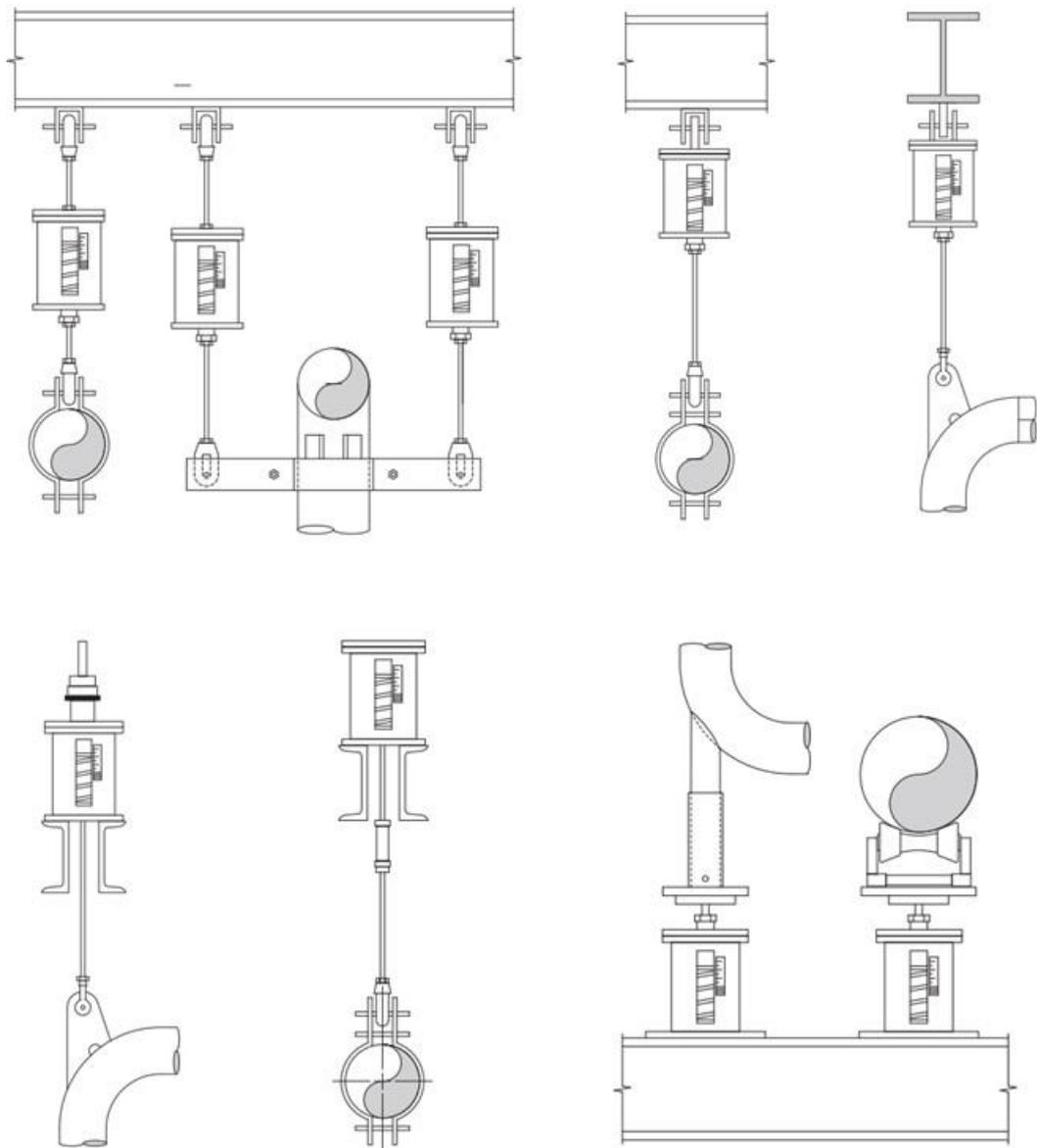


Ilustración 3.8. Formas constructivas de instalación de soporte flexible de carga variable

### 3.3.1. Pre tensionado (*cold-spring*)

El pre tensionado (*cold-spring*) consiste en introducir a la tubería tensiones iniciales y contrarias a las tensiones generadas durante operaciones en caliente o frío (expansión o contracción), de forma tal que cuando la tubería entre en funcionamiento, la tensión generada equilibre la inducida en el montaje. La tensión generada debe ser de igual naturaleza, es decir:

- Si la tubería soportará tensiones debido a expansiones térmicas, una tubería de menor longitud se montará en condiciones calientes de funcionamiento, esto con el objeto de aumentar la longitud del tramo a instalar. Cuando el tramo instalado regrese a su estado inicial se contraerá, generando una tensión interna de tracción la cual se equilibrará cuando el tramo entre en funcionamiento.
- Si la tubería soportará tensiones debido a compresiones térmicas, una tubería de mayor longitud se montará a condiciones frías de operación, esto con el objeto de disminuir la longitud del tramo a instalar. Cuando el tramo instalado regrese a su estado inicial se expandirá, generando una tensión interna de contracción la cual se equilibrará cuando el tramo entre en funcionamiento.

El pre tensionado supone un análisis detallado de las deformaciones que se generarán en el sistema cuando este entre en funcionamiento. Es debido a esto que este tipo de solución al análisis de flexibilidad debe realizarse con apoyo de un *software* de análisis. El cálculo teórico no satisface este tipo de solución.

El *cold-spring* se lleva a cabo, normalmente, para aliviar un 50% o menos de las tensiones generadas por las dilataciones o contracciones. Este porcentaje se llama factor de pre tensionado y se define de la siguiente forma:

$$FP = \frac{S_P}{S_E} \cdot 100\% \quad \text{Eq 3.6}$$

Donde:

- $FP$  Factor de pre tensionado (medida en %)
- $S_P$  Esfuerzo de pre tensionado
- $S_E$  Esfuerzo de flexibilidad

### 3.3.2. Relajamiento espontáneo (*self-springing*)

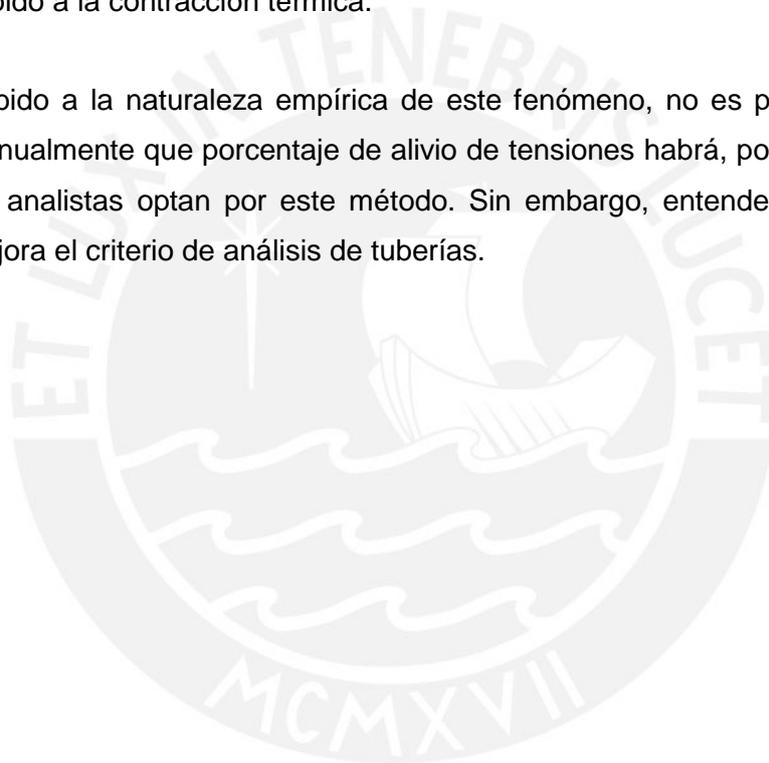
El relajamiento espontáneo (*self-springing*)<sup>14</sup> es un fenómeno que se produce, normalmente, en líneas de acero durante trabajos en caliente, este fenómeno reduce tensiones. Esto ocurre debido a un reacomodo de tensiones internas, es

<sup>14</sup> ASME B31.3 Process Piping, 2002

decir, cuando la temperatura de la línea se eleva, el límite de fluencia disminuye y ocurre una reacomodo de dislocaciones en la red cristalina del material de la tubería, este fenómeno es análogo al revenido de los metales. Luego de este fenómeno, los esfuerzos se re acomodan, llegando a un nuevo punto de equilibrio.

Este efecto alivia las tensiones solo durante trabajos en caliente. Sin embargo, cuando la línea regrese a su estado inicial, las tuberías serán sometidas a cargas debido a la contracción térmica.

Debido a la naturaleza empírica de este fenómeno, no es posible determinar manualmente que porcentaje de alivio de tensiones habrá, por ello, difícilmente los analistas optan por este método. Sin embargo, entender este fenómeno, mejora el criterio de análisis de tuberías.



#### **4. CAPÍTULO 4: APLICACIÓN DEL ANÁLISIS TEÓRICO**

Los conceptos, ecuaciones y principios vertidos en este trabajo hasta este punto serán aplicados utilizando un ejemplo aleatorio, este ejemplo será resuelto siguiendo una metodología de cálculo, la cual se describirá y sustentará debidamente.

##### **4.1. Metodología de Análisis de Flexibilidad de Sistemas de Piping**

El análisis de flexibilidad es una de las etapas finales de diseño de un sistema de tuberías. Durante la etapa de análisis se evalúan dos elementos principalmente:

- Deformaciones causadas por las condiciones térmicas de trabajo
- Cargas en los puntos de apoyos

En base a estas características se evalúan las soluciones a aplicar al sistema. Cuando se hace un análisis de flexibilidad, ciertas características del sistema ya están definidas preliminarmente, entre ellas tenemos<sup>15</sup>:

- Características generales del sistema (tipo de fluido, temperatura máxima de trabajo, presiones de trabajo, entre otros)
- Diámetros de tubería (interno, externo, nominal)
- Espesor de tubería (relacionado directamente con la presión de trabajo)
- Material de tubería (relacionado con el tipo de fluido y las cargas internas)
- *Layout* preliminar

---

<sup>15</sup> Alvarado , A. Rodruíguez-Toral, Rosas, & Ayala, 2006

- Accesorios del sistema
- Número de soportes
- Ubicación de soportes (para dar estabilidad al sistema)
- Entre otros

Todas las características, antes mencionadas, son relevantes para el análisis de flexibilidad. Sin embargo, entre las más críticas tenemos: restricciones geométricas debido a la ubicación de soportes y las condiciones térmicas de operatividad.

La complejidad del análisis de flexibilidad depende directamente de la dificultad del sistema, esto quiere decir, mientras más grande y más ramificaciones tenga el sistema, mayor dificultad tendrá el análisis. Debido a esto, el analista debe tener cierto orden para proceder con el análisis.

#### **4.1.1. Jerarquía en sistemas de tuberías**

Los sistemas de tuberías están compuestos de diversos elementos constructivos, estos no están colocados al azar, por el contrario, existe un orden jerárquico en los sistemas de tuberías, este orden se puede observar en la Ilustración 4.1. A continuación se describirá cada uno de ellos.

- a. Las **tuberías y accesorios en general** la componen elementos individuales del sistema de tuberías, tales como: tubos, codos, tees, yees, reducciones, reducciones excéntricas, bridas, válvulas (check, globo, cuchilla, anticipadoras de onda, etc.), soportes, entre otros. Estos conforman la base jerárquica de un sistema de tuberías.
- b. Los **spools** son elementos conformados por tuberías y accesorios en general. Comúnmente los *spools*, se limitan entre uniones bridadas, aunque, este no es necesariamente un requerimiento para definir un *spool*. El objetivo de colocar *spools* en los sistemas de tuberías es el facilitar montaje de las líneas en obra. De esta forma, estos se definen como el conjunto de accesorios o tuberías unidos de forma permanente o que no se desensamble en mucho tiempo. Ver Ilustración 4.2.

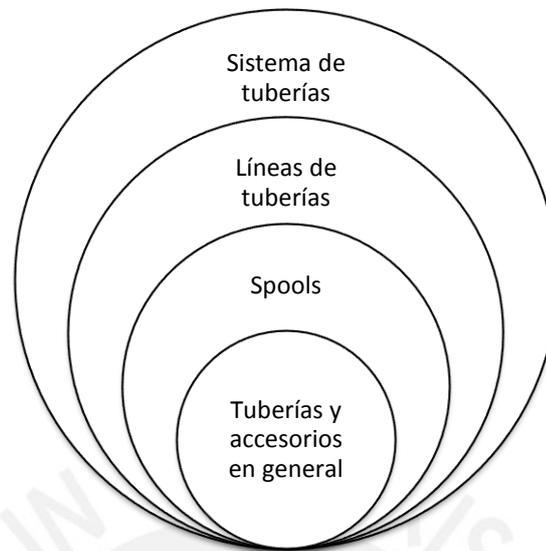


Ilustración 4.1. Orden jerárquico en sistemas de tuberías



Ilustración 4.2. *Spool*<sup>16</sup>

- c. Las **líneas de tuberías** son el conjunto de *spools* que forman el trayecto del fluido de máquina a máquina.
- d. El **sistema de tuberías** es todo el complejo de líneas.

El orden de análisis de flexibilidad es de carácter regresivo, es decir, se evalúa desde la base jerárquica del sistema de tuberías hasta el complejo en su totalidad.

<sup>16</sup> Cortesía de T&T Ingeniería y Construcción S.A.

#### 4.1.2. Metodología

- Primeramente, se deben tener a la mano las características principales del sistema: *layout*, diámetros de tubería, presión nominal, temperatura de trabajo, material de tubería, propiedades físicas del material, etc.
- El sistema debe organizarse en etapas de evaluación (seguir la jerarquía descrita en el sub acápite 4.1.1) y cada elemento del sistema debe ser evaluado en cinco etapas: pre evaluación, determinación de deformaciones, determinación de cargas, selección de soluciones constructivas y análisis de esfuerzos.
  - La pre selección tiene por objeto el determinar la criticidad del sistema de tuberías, es decir, determinar si el análisis de flexibilidad es un obligatorio para algún tramo a evaluar. Si el resultado del pre evaluación es SÍ, debemos proceder con el siguiente análisis.
  - Continuamente, se procede con el cálculo de las deformaciones axiales y transversales en cada elemento del sistema. Este análisis nos permite evaluar la flexibilidad del sistema, determinando si el *layout* preliminar del sistema es correcto o se debe hacer alguna modificación al recorrido de la tubería. Ver los comentarios finales de los acápites 1.4.1 y 1.4.2.
  - Una vez analizado el *layout* del sistema de tuberías y haberse asegurado que el sistema no colapsa debido a los esfuerzos internos generados por las deformaciones, se calculan las cargas que soportan los apoyos en el sistema de tuberías.
  - Con la información de las deformaciones y las cargas soportadas por el sistema, se seleccionan los soportes del tramo evaluado. El tipo de soporte a instalar debe ser a criterio del analista (para mayor información, ver el sub acápite 3.2)
  - Finalmente, las soluciones constructivas seleccionadas deben ser puestas a prueba y verificar si alivian suficientemente los esfuerzos generados por la deformación del sistema.
- Estos cuatro pasos se realizan nuevamente hasta analizar todo el sistema.

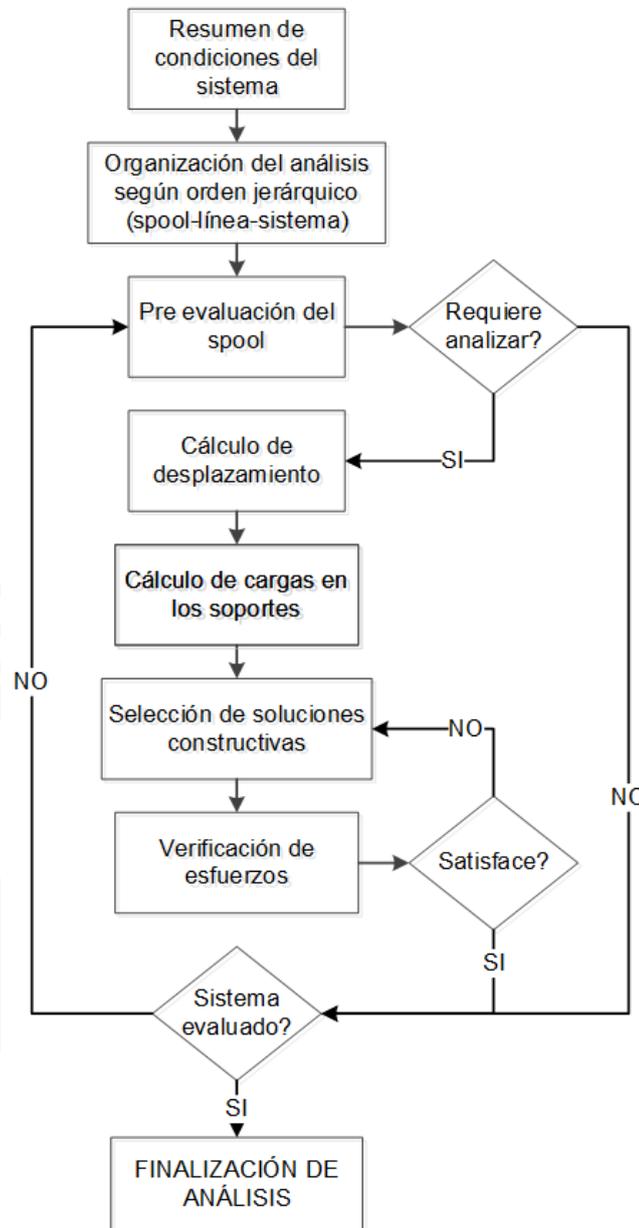


Ilustración 4.3. Metodología de análisis de flexibilidad

#### 4.2. Ejemplo de cálculo

El ejemplo de cálculo a desarrollar en este sub acápite responde a la metodología de análisis postulada en el punto 4.1.

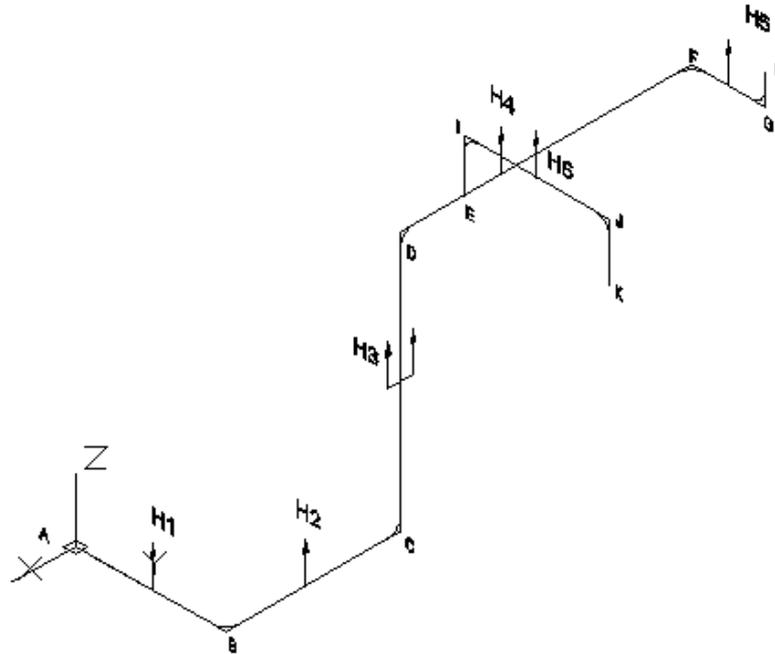


Ilustración 4.4. Isométrico de ejemplo de cálculo

**Enunciado:** Se debe analizar una línea de tubería de 8" de diámetro nominal (medidas IPS) de acero al carbono ASTM A106 Gr.B, la temperatura de operación es 1050°F y la temperatura ambiente de 70°F, la geometría de la instalación se muestra en la Ilustración 4.4, en esta se muestran de los soportes (H1, H2, H3, H4, H5 y H6) instalados en el *spool*. Los soportes H1, H2, H4, H5 y H6 son soportes flexibles de carga variable, mientras que el soporte H3 es un soporte flexible de carga constante.

Adicionalmente, las características de la tubería son:

- Tubería 8" Sch. 80
- Presión de trabajo: 120 psi
- Diámetro exterior 8.625"
- Diámetro interno 7.625"
- Temperatura máxima de trabajo: 566 °C
- Material de tubería: ASTM A106 Gr.B

- Coeficiente de expansión del material a la temperatura de trabajo:  
0,0946 pulg./pie
- Desplazamientos conocidos, estos desplazamientos corresponden a los calculados en los spools adyacentes:
  - o Desplazamiento A es 2 in hacia abajo
  - o Desplazamiento de H es 2 in hacia abajo
  - o Desplazamiento de K es 2.5 in hacia arriba

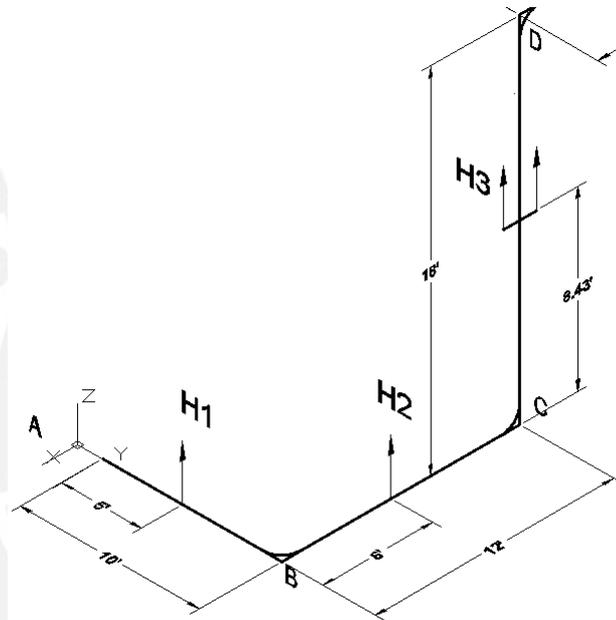


Ilustración 4.5. Isométrico de ejemplo de cálculo con medidas

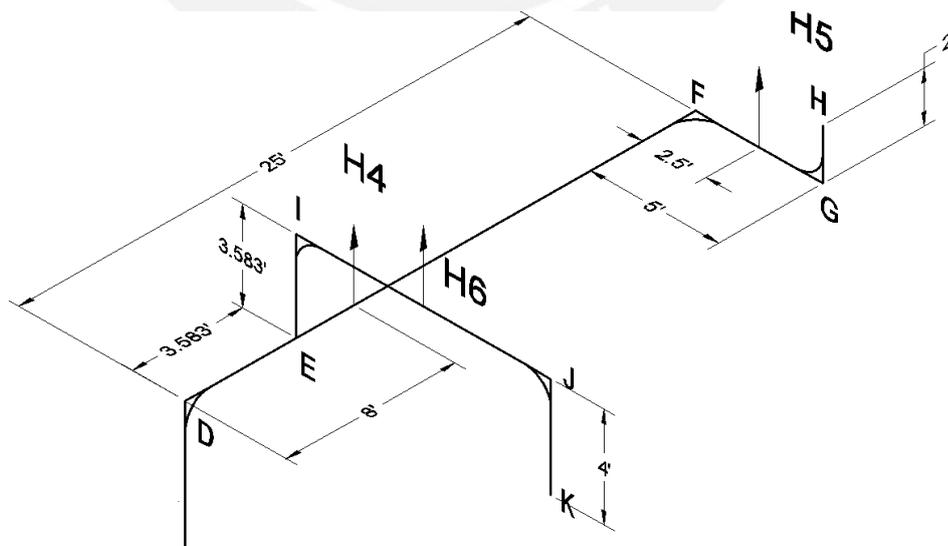


Ilustración 4.6. Isométrico de ejemplo de cálculo con medidas (continuación)

La Ilustración 4.4 muestra el esquema general de la instalación a analizar, las longitudes y posiciones se detallan en la Ilustración 4.5 y la Ilustración 4.6.

También se definen las propiedades físicas de los elementos del sistema:

Tabla 4.1. Características principales del sistema de tuberías

	Peso lineal	Aislante	Peso Total
Tubería 8" SCH 80 (XS), ASTM A53	43.43 lb/ft	20.00 lb/ft	63.43 lb/ft
Codo 8" LR SCH80 (XS), ANSI 16.9	47.64 lb	16.50 lb	64.14 lb
Tee reducción 8"x6" SCH80 (XS), ANSI 16.9	66.14 lb	20 lb	86.14 lb

#### 4.2.1. Pre evaluación del sistema de piping

La pre evaluación se realiza con alguno de los métodos empíricos descritos en los acápites 1.5.1 o 2.5. Sin embargo, el ejemplo de cálculo descrito líneas arriba tiene tres ramificaciones. Los métodos empíricos admiten sistemas sólo con dos ramificaciones. Por ello, la pre-evaluación del sistema no es posible para este tipo de ejemplo. Se procederá con el análisis de flexibilidad sin pre evaluar este sistema.

En el ANEXO 6. Ejemplo de pre evaluación de un tramo de tubería, se ha desarrollado un ejemplo para un sistema simple que sí puede ser evaluado empíricamente.

#### 4.2.2. Cálculo de desplazamientos

El cálculo de los desplazamientos es esencial para evaluar los esfuerzos generados cargas térmicas y para seleccionar las características del soporte a instalar.

Para poder seleccionar el tipo de soportes que se tendrá que colocar, se debe conocer la deformación en los puntos a colocarlos, es por ello que esta etapa tiene por objeto determinar esas deformaciones. En otras palabras, este cálculo

de deformaciones se realiza antes de que los soportes estén físicamente colocados en el sistema, ya que, si es de esa forma, la condición hiperestática de los soportes haría otras las consideraciones sean tomada en cuenta.

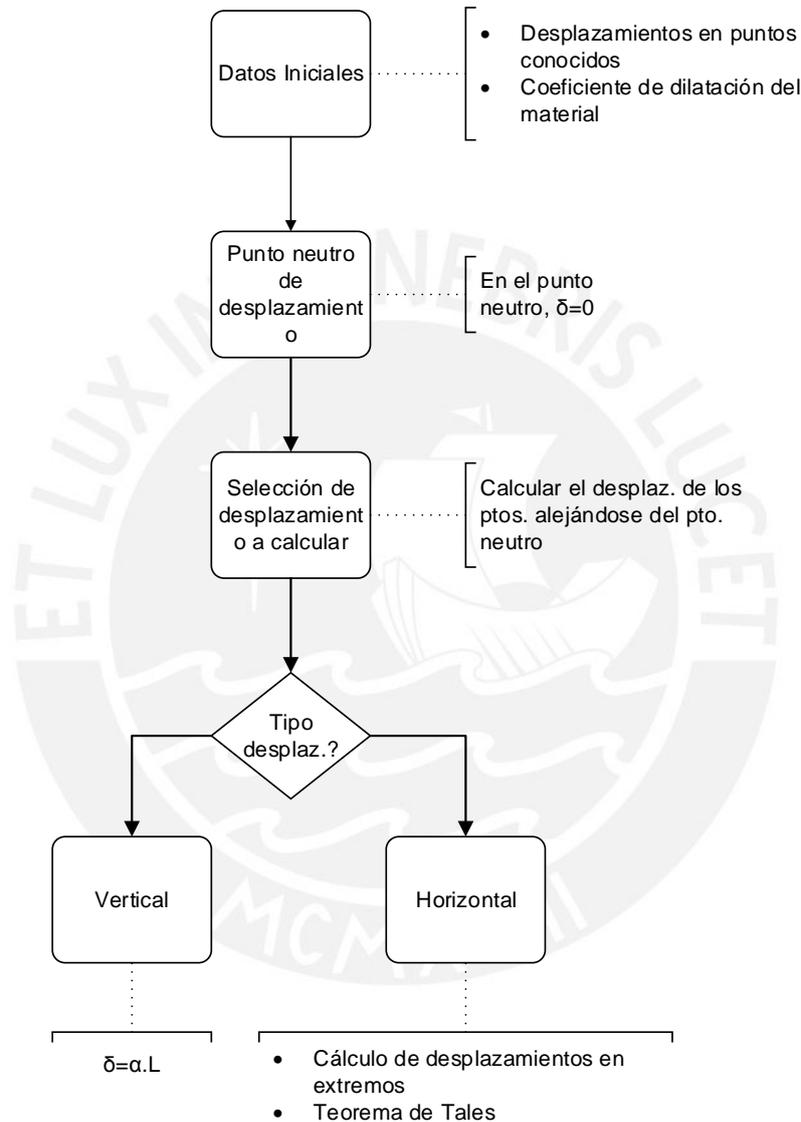
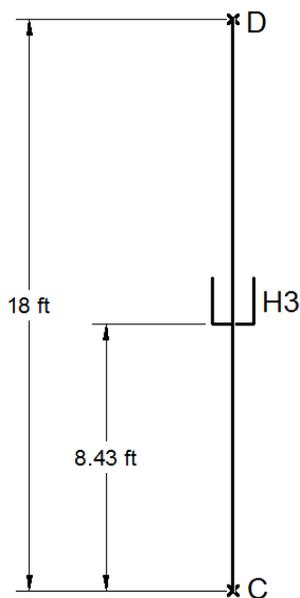


Ilustración 4.7. Diagrama de flujo para la determinación de desplazamientos

Los soportes flexibles de carga constante restringen los desplazamientos, por ello, es correcto asumir que el desplazamiento del soporte H3 es nulo.



$$\Delta H3 = 0$$

Consiguientemente se determina la deformación en los puntos C y D.

$$\Delta D = 0.0946 \frac{in}{ft} \times (18 - 8.43)ft = 0.905in \text{ hacia arriba}$$

$$\Delta C = 0.0946 \frac{in}{ft} \times 8.43ft = 0.797in \text{ hacia abajo}$$

A continuación, se determina la deformación en los apoyos H1 y H2 desarrollando las tuberías de los tramos AB y BC de forma recta, sin cambio de sentido.

$$\Delta H2 = 0.797 + 5 \frac{(2-0.797)}{22} = 1.071 in \text{ hacia abajo}$$

$$\Delta H1 = 0.797 + 16 \frac{(2-0.797)}{22} = 1.672 in \text{ hacia abajo}$$

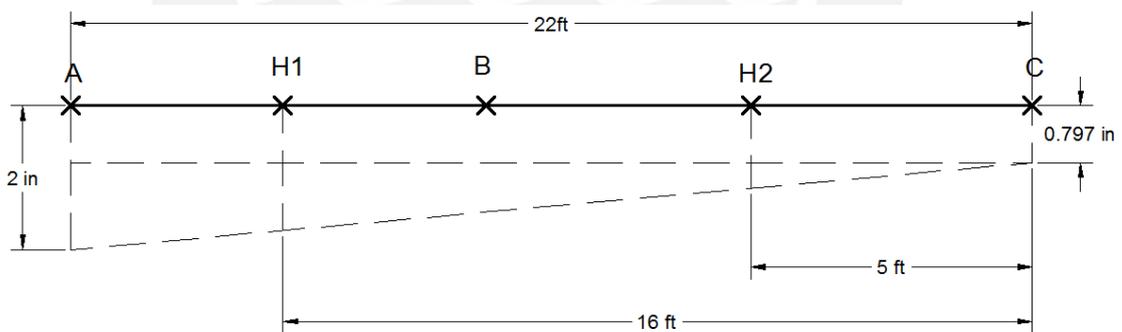


Ilustración 4.8. Esquema de deformaciones, tramo A-B-C

De la misma forma, se procede a calcular el desplazamiento de los apoyos H4 y H5. Sin embargo, antes de ello se debe calcular el desplazamiento de G.

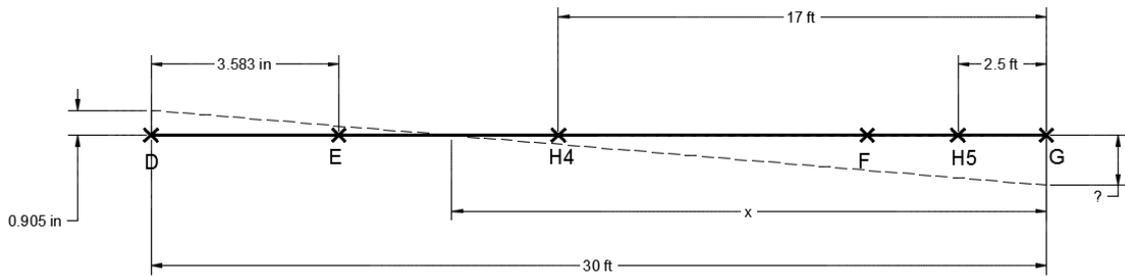


Ilustración 4.9. Esquema de deformaciones, tramo D-H4-G

Para calcular el desplazamiento en G, se utiliza el dato del desplazamiento en H.

$$\Delta G = 3 \text{ in} + 0.0946 \frac{\text{in}}{\text{ft}} x \ 2 \text{ ft} = 3.189 \text{ in}$$

Por lo tanto:

$$x = 3.189 \text{ in} \frac{25 \text{ ft}}{0.905 \text{ in} + 3.189 \text{ in}} = 19.472 \text{ ft}$$

$$\Delta H5 = (x - 2.5 \text{ ft}) \cdot \frac{3.189 \text{ in}}{x} = 2.78 \text{ in}$$

$$\Delta H4 = (x - 17 \text{ ft}) \cdot \frac{3.189 \text{ in}}{x} = 0.405 \text{ in}$$

Asimismo,

$$\Delta E = (25 - 3.583 - x) \text{ ft} \frac{0.905 \text{ in}}{25 \text{ ft} - x} = 0.318 \text{ in}$$

De la misma forma, se procede a determinar las deformaciones en el tramo EJKL.

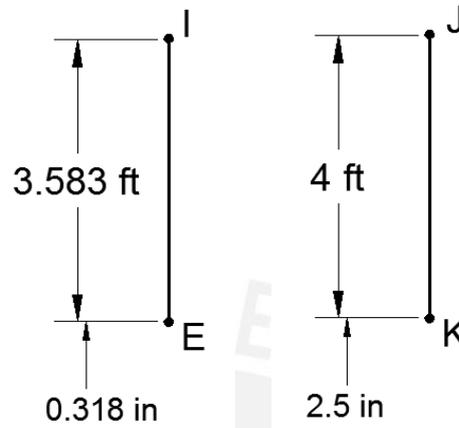


Ilustración 4.10. Esquema de deformaciones, (izq.) tramo I-E, (der.) J-K

$$\Delta I = 0.318 \text{ in} + 0.0946 \frac{\text{in}}{\text{ft}} \times 3.583 \text{ ft} = 0.657 \text{ in}$$

$$\Delta L = 2.5 \text{ in} + 0.0946 \frac{\text{in}}{\text{ft}} \times 4 \text{ ft} = 2.878 \text{ in}$$

$$\Delta H6 = 0.657 \text{ in} + 5 \text{ ft} \frac{(2.878 - 0.657) \text{ in}}{10 \text{ ft}} = 1.768 \text{ in}$$

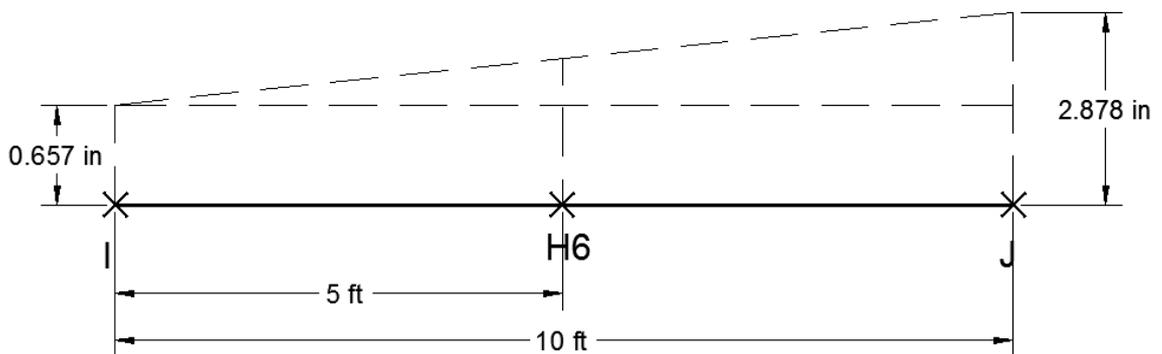


Ilustración 4.11. Esquema de deformaciones I-H6-J

En forma de resumen, se colocarán los valores de desplazamientos para cada soporte.

Tabla 4.2. Tabla de resultados

Soporte	Desplazamientos, in
H1	1,672 in hacia abajo
H2	1,071 in hacia abajo
H3	0
H4	0,405 in hacia arriba
H5	2,78 in hacia arriba
H6	1,768 in hacia arriba

4.2.3. Cálculo de Cargas

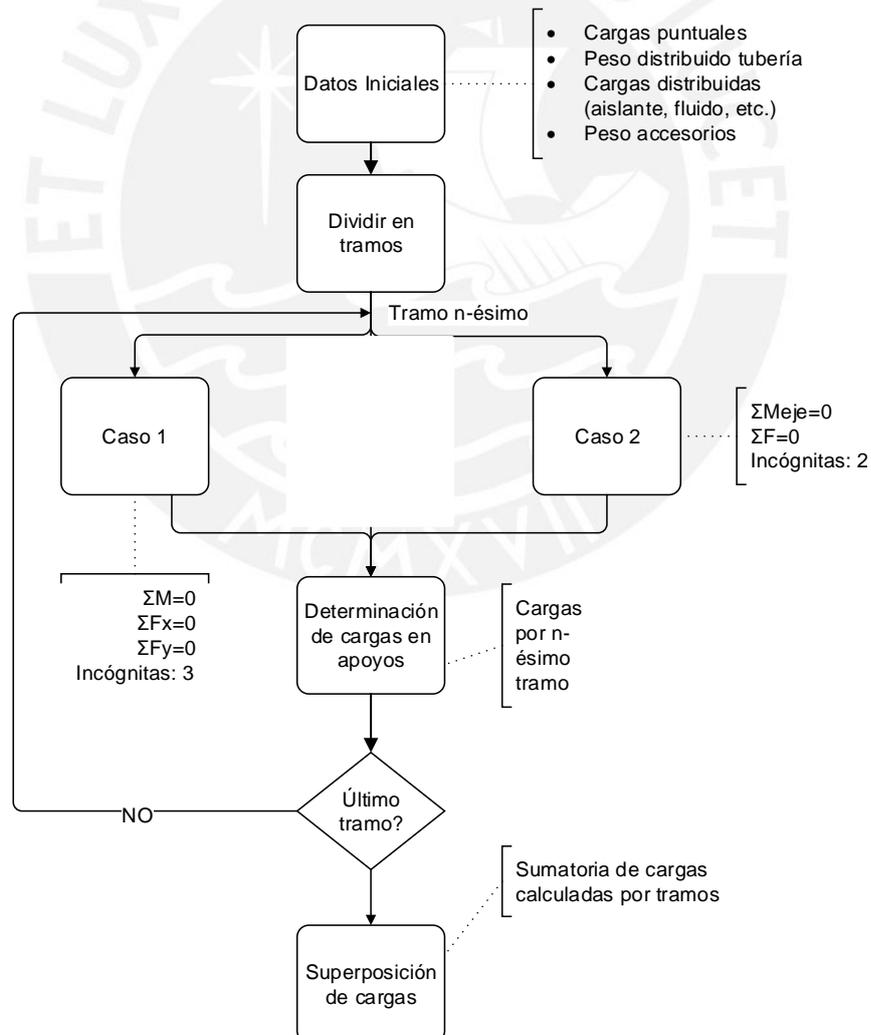


Ilustración 4.12. Diagrama de flujo para determinar las cargas

El cálculo de cargas se realizará dividiendo el sistema de tuberías en tramos que contengan 2 o 3 apoyos, dependiendo si es que cumplen los requisitos para los siguientes casos planteados por este trabajo:

- CASO 1: Se tomarán tramos de 2 cargas desconocidas cuando el vector fuerza de una de ellas sea co-lineal a algún eje de coordenadas.
- CASO 2: Se tomarán tramos de 3 cargas desconocidas cuando ningún vector fuerza sea co-lineal a algún eje de coordenadas.

El tramo 1 (A-B-H2) corresponde al CASO 1, como se observa en la Ilustración 4.13

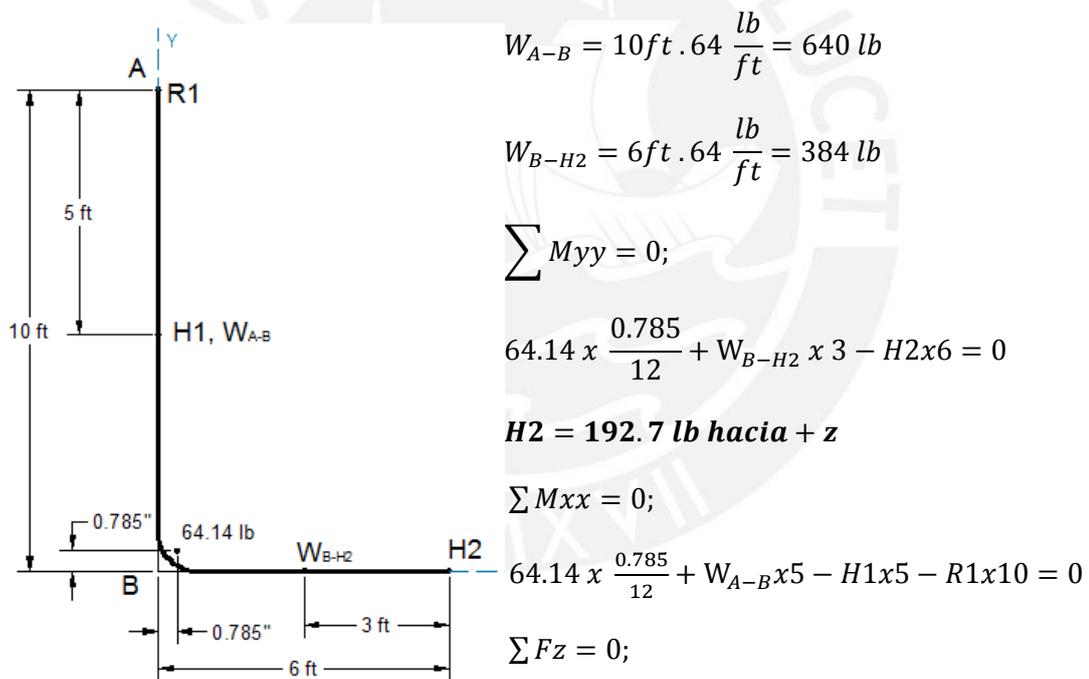


Ilustración 4.13. Desarrollo del tramo A-B-H2

Resolviendo ambas ecuaciones, obtenemos:

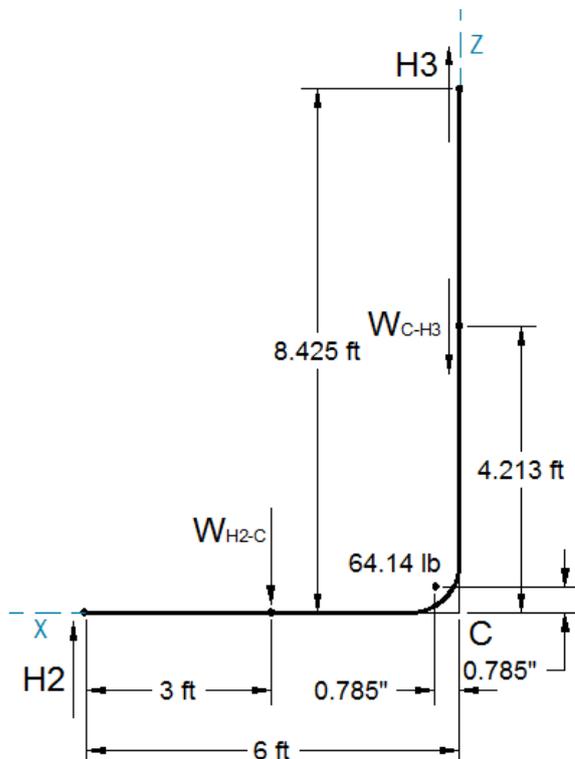
$$H1 = 1150 lb \text{ hacia } + z$$

$$R1 = 240.6 lb \text{ hacia } + z$$

El tramo 2 (H2-C-H3) corresponde a una combinación del CASO 1 y 2, como se observa en la Ilustración 4.15.

$$W_{H2-C} = 6ft \cdot 64 \frac{lb}{ft} = 384 lb$$

$$W_{C-H3} = 8.425ft \cdot 64 \frac{lb}{ft} = 384 lb$$



$$\sum M_{yy} = 0;$$

$$64.14 \times \frac{0.785}{12} + W_{H2-C} \times 3 - H2 \times 6 = 0$$

$$H2 = 192.7 lb \text{ hacia } +z$$

$$\sum F_z = 0;$$

$$64.14 + W_{H2-C} + W_{C-H3} - H1 - H3 = 0$$

$$H3 = 794.64 lb \text{ hacia } +z$$

Ilustración 4.14. Desarrollo del tramo H2-C-H3

El desarrollo de este tramo 3 (H4-F-G) es particular, ya que se tienen los efectos de las deformaciones de dos segmentos del sistema, para ello se podrán plantear 6 ecuaciones y depende de la forma de interpretación de estas para obtener los resultados esperados.

Se plantearán las expresiones del tramo R4-G-H, el cual está contenido en el plano XZ.

$$W_{G-H} = 2ft \cdot 64 \frac{lb}{ft} = 128 lb$$

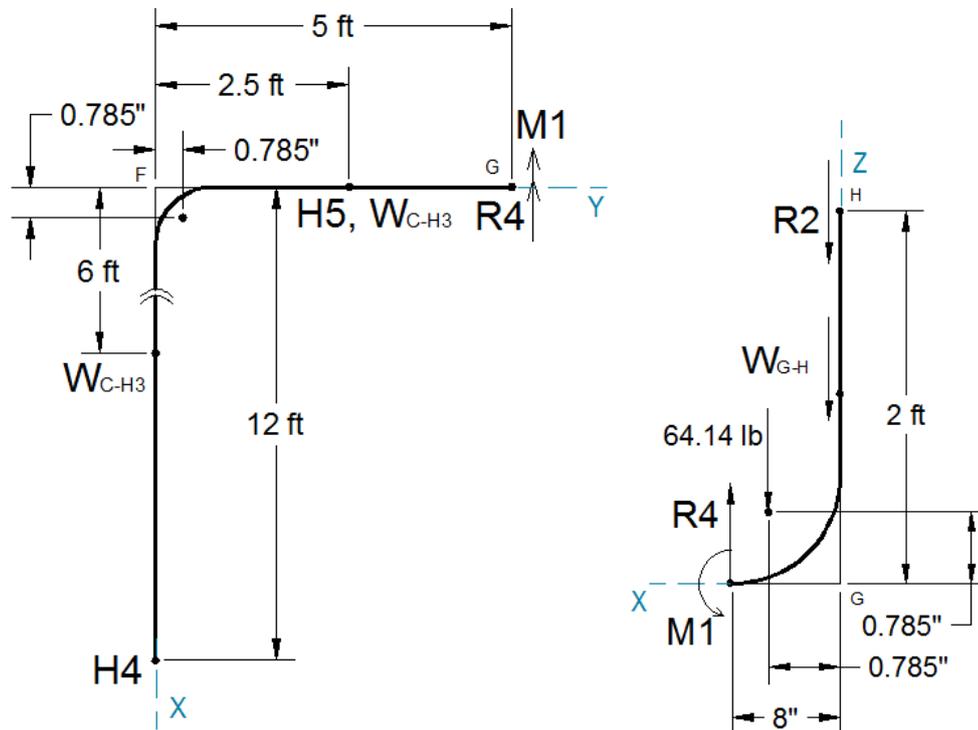


Ilustración 4.15. Desarrollo del tramo H4-F-G-H

$$\sum F_z = 0;$$

$$64.14 + W_{G-H} + R_2 - R_4 = 0$$

$$R_4 = 192.14 + R_2$$

$$\sum M_{R_4} = 0;$$

$$64.14 \times \frac{7.215}{12} + (W_{H2-C} + R_2) \times \frac{8}{12} - M_1 = 0$$

$$M_1 = 8 \cdot R_4 - 4.198$$

Se plantearán las expresiones del Tramo H4-F-G, el cual está contenido en el plano XY.

$$W_{H4-F} = 12ft \cdot 64 \frac{lb}{ft} = 768 lb$$

$$W_{F-G} = 5ft \cdot 64 \frac{lb}{ft} = 320 lb$$

$$\sum M_{yy} = 0;$$

$$64.14 \times \frac{0.785}{12} - 768 \times 6 - H4 \times 12 = 0$$

$$H4 = 384.35 \text{ lb}$$

$$\sum F_z = 0;$$

$$H4 + H5 + R4 - W_{H4-F} - W_{F-G} - 64.14 = 0$$

$$R4 = 767.79 - H5$$

$$\sum M_{xx} = 0;$$

$$64.14 \times \frac{0.785}{12} - H5 \times 2.5 + W_{F-G} \times 2.5 + R4 \times 5 + M1 = 0$$

Usando la expresión deducida de M1 en función de R4 reducimos las variables de la ecuación anterior a H5 y R4. De la misma forma, utilizamos la expresión de R4 en función de H5 y tenemos una ecuación con variable única: H5. Despejamos y obtenemos.

$$H5 = 695.56 \text{ lb hacia } + z$$

$$R4 = 72.22 \text{ lb hacia } + z$$

$$R2 = 120 \text{ lb hacia } + z$$

El tramo 4 (H6-J-K) corresponde a una combinación del CASO 1, como se observa en la Ilustración 4.16 y se explica a continuación.

$$W_{H6-J} = 5ft \cdot 64 \frac{lb}{ft} = 320 \text{ lb}$$

$$W_{J-K} = 4ft \cdot 64 \frac{lb}{ft} = 256 \text{ lb}$$

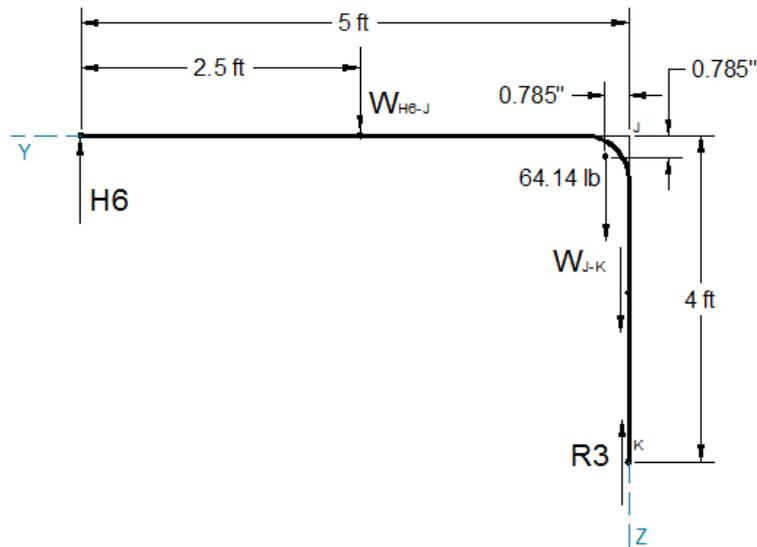


Ilustración 4.16. Desarrollo del tramo H6-J-K

$$\sum M_{ZZ} = 0;$$

$$64.14 \times \frac{0.785}{12} + W_{H6-J} \times 2.5 - H6 \times 5 = 0$$

$$H6 = 160.84 \text{ lb hacia } +z$$

$$\sum F_z = 0;$$

$$64.14 + W_{H6-J} + W_{J-K} - H6 - R2 = 0$$

$$R = 479.3 \text{ lb hacia } +z$$

Luego, el tramo 5 (E-I-H6) corresponde a una combinación del CASO 1, como se observa en la Ilustración 4.15 y se explica a continuación.

$$W_{E-I} = 3.583 \text{ ft} \cdot 64 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} = 229.31 \text{ lb}$$

$$W_{I-H6} = 5.64 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} = 320 \text{ lb}$$

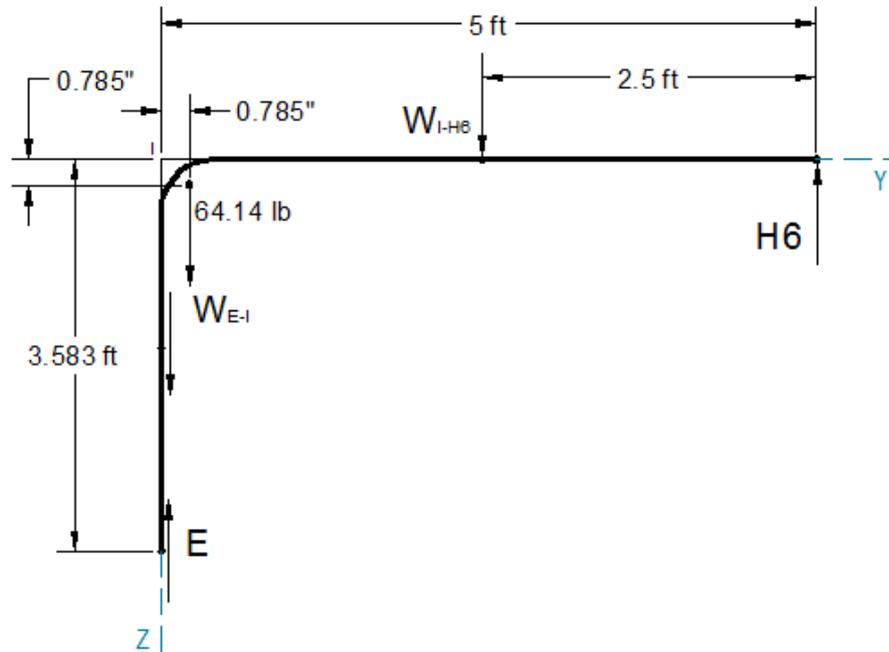


Ilustración 4.17. Desarrollo del tramo 5

$$\sum M_{zz} = 0;$$

$$64.14 \times \frac{0.785}{12} + W_{H6-j} \times 2.5 - H6 \times 5 = 0$$

$$H6 = 160.84 \text{ lb hacia } +z$$

$$\sum F_z = 0;$$

$$64.14 + W_{H6-j} + W_{j-k} - H6 - R2 = 0$$

$$E = 452.6 \text{ lb hacia } +z$$

El tramo 7 corresponde a una combinación del CASO 1, como se observa en la Ilustración 4.15 y se explica a continuación.

$$W_{H3-D} = 9.575 \text{ ft} \cdot 64 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} = 612.8 \text{ lb}$$

$$W_{D-H4} = 5.64 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} = 320 \text{ lb}$$

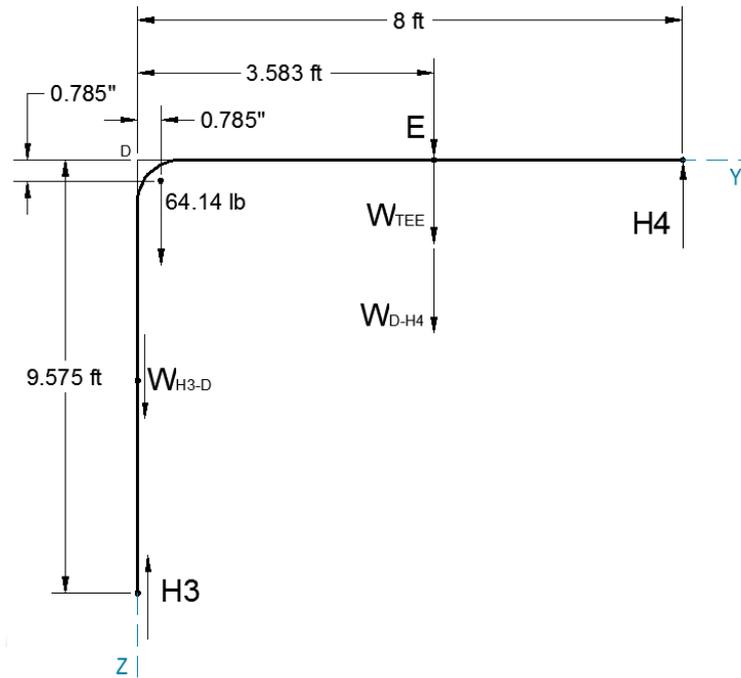


Ilustración 4.18. Desarrollo del tramo H3-D-H4

$$W_{TEE} = 86.14 \text{ lb}$$

$$\sum M_{ZZ} = 0;$$

$$64.14 \times \frac{0.785}{12} + (W_{H3-D} + W_{D-H4} + W_{TEE} + E) \times 4 - H4 \times 8 = 0$$

$$H4 = 736.3 \text{ lb hacia } + z$$

$$\sum F_z = 0;$$

$$64.14 + W_{H3-D} + W_{D-H4} + W_{TEE} + E - H4 - H3 = 0$$

$$H3 = 799.39 \text{ lb hacia } + z$$

Hasta el momento, se han determinado las cargas en tramos independientes del *spool*, el siguiente paso es superponer las fuerzas calculadas independientemente para determinar la carga resultante en cada punto evaluado. Para ello, la

Tabla 4.3 resume la finalización del análisis de cargas.

Tabla 4.3. Resumen del análisis de cargas

	Tramo1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	TOTAL
H1	1150	-	-	-	-	-	1150 lb
H2	192.7	192.7	-	-	-	-	385.4 lb
H3	-	794.64	-	-	-	799.39	1594.03 lb
H4	-	-	384.35	-	-	736.3	1020.65 lb
H5	-	-	695.6	502.31	-	-	1197.91 lb
H6	-	-	-	160.84	160.84	-	321.68 lb

4.2.4. Selección de soportes

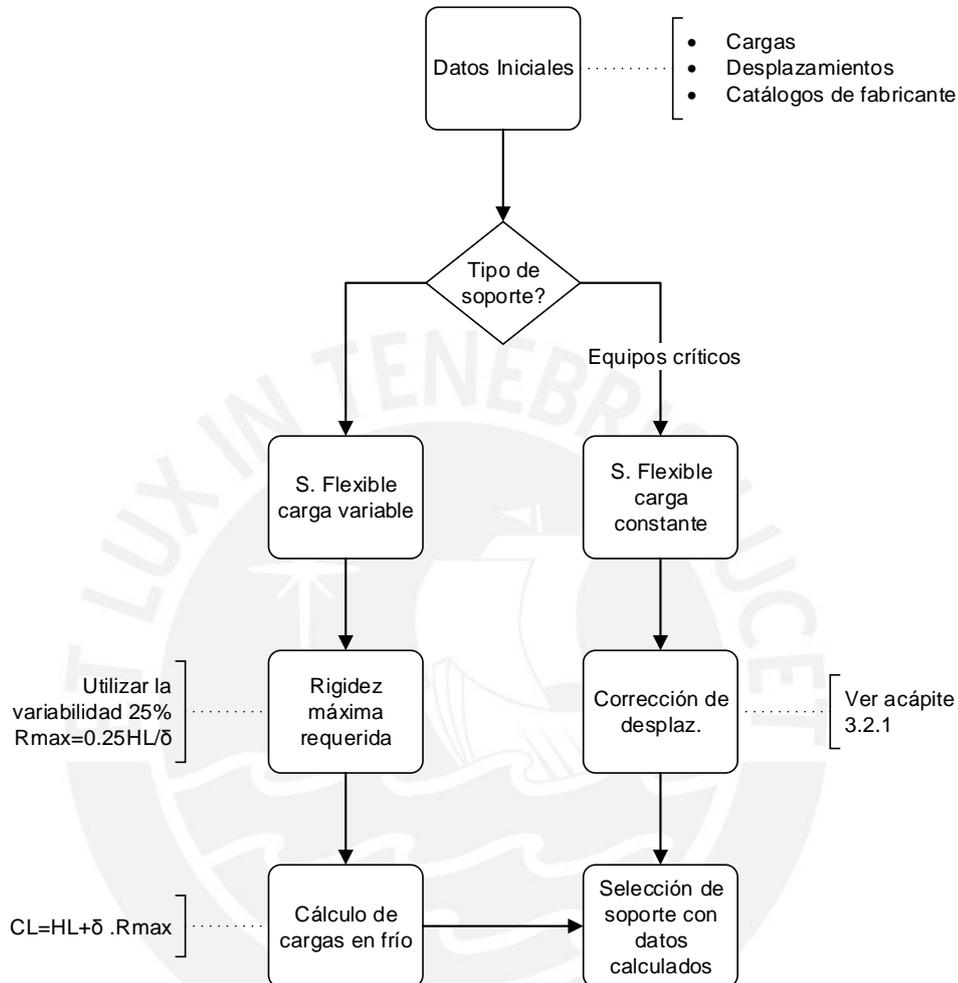


Ilustración 4.19. Diagrama de flujo para selección de soportes

Los soportes colocados en el sistema serán: soportes flexibles de carga variable. Esto debido a que no existen equipos críticos instalados en el tramo evaluado. Para la selección del tipo de soportes, se requieren dos datos: **Carga** y **desplazamiento** que admitirán los soportes.

En la Tabla 4.4 presentan los datos a utilizar para la selección de soportes. Asimismo, en el ANEXO 4. Tablas de selección de soportes flexibles de carga variable se obtendrán las características del soporte a utilizar para aliviar las tensiones de flexibilidad.

A modo de ejemplo, se utilizará el soporte H1 para seleccionar el soporte a utilizar. Planteando la Eq 3.4 y las condiciones de variabilidad para este tipo de soporte:

$$V_{max} = \frac{\Delta \cdot R_{max}}{HL} \cdot 100\% = 25\%$$

$$R_{max} = \frac{0.25 \cdot HL}{\Delta}$$

Asimismo, planteando la Eq 3.5:

$$CL_{max} = HL + \Delta \cdot R_{max}$$

Tabla 4.4. Resumen de características calculadas de los soportes

	H1	H2	H3	H4	H5	H6
Carga (lb)	1150	385.4	1594.03	1020.65	1197.91	321.68
Desplazamiento (in)	1,672	1,071	0	0,405	2,78	1,768

Una vez se ha determinado las condiciones máximas del soporte (carga en condiciones frías), se puede definir el tipo y tamaño de soporte consultando tablas de fabricantes como las presentadas en el ANEXO 4. Tablas de selección de soportes flexibles de carga variable. Las condiciones máximas se han determinado para todos los soportes, los resultados se observan en la Tabla 4.5

Tabla 4.5. Resultados obtenidos de la selección de soportes flexibles

	H1	H2	H3	H4	H5	H6
Carga (lb)	1150	385.4	1594.03	1020.65	1197.91	321.68
Desplazamiento (in)	1.672	1.071	0.000	0.405	2.780	1.768
Rmax (lb/in)	171.95	89.96	-	630.03	107.73	45.49
CLmax	1437.5	481.75	-	1275.8	1497.4	402.1
<b>Tipo de soporte</b>	<b>98</b>	<b>98</b>	-	<b>98</b>	<b>triple</b>	<b>98</b>
<b>Tamaño</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	-	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>6</b>

4.2.5. Análisis de esfuerzos

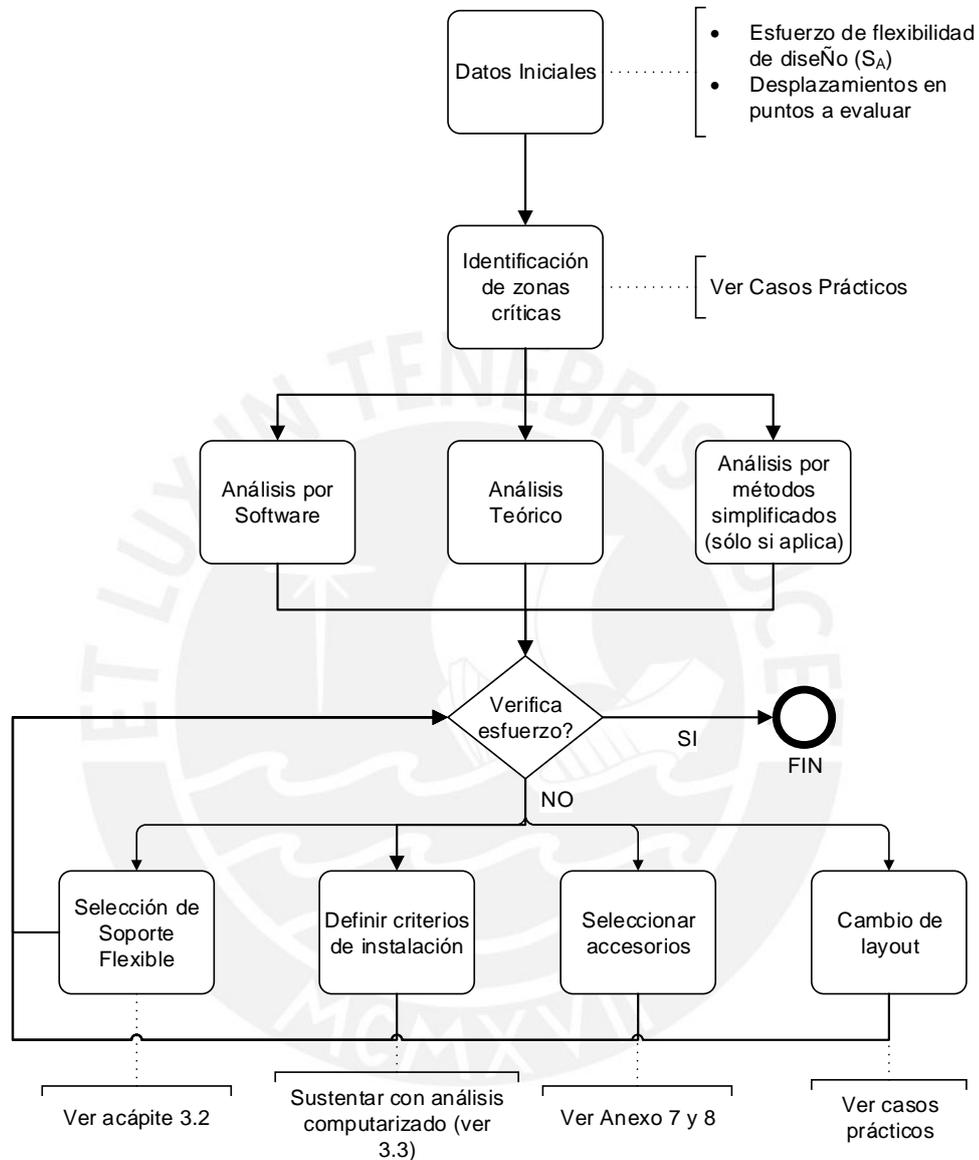


Ilustración 4.20. Diagrama de flujo de cálculo de esfuerzos

Se analizará el punto D de la Ilustración 4.5 e Ilustración 4.6. Se aplicará la Eq 1.7 para determinar el esfuerzo ocasionado por la deformación causada en los puntos a evaluar.

Como primer paso, se debe determinar el máximo esfuerzo admisible de tensiones causadas por las deformaciones. Para determinar este esfuerzo de

diseño, se aplicará la Eq 2.9, ecuación descrita en el capítulo 2 y sacada del código ASME B31.1.

Recordando las características de trabajo del ejemplo de aplicación, la temperatura de trabajo del sistema es de 566°C (1050°F) y los esfuerzos admisibles a utilizar son los mostrados en la Tabla 4.6:

Tabla 4.6. Esfuerzos del material a diferentes temperaturas<sup>17</sup>

Temperatura	Esfuerzo (ksi)
25°C (68°F)	16
566°C (1050°F)	2.5

De esta manera:

$$S_A = 0.5(1.25 \cdot S_C + 0.25 \cdot S_H) = 0.5 (1.25 \cdot 16 + 0.25 \cdot 2.5) = 10.31 \text{ ksi}$$

Se despeja la longitud de la Eq 1.7 para determinar la longitud mínima necesaria para el sistema no colapse.

$$L_{min} = \sqrt{\frac{3ED(y)}{S_A}} \quad \text{Eq 4.1}$$

Sabiendo que las propiedades del material<sup>&</sup> son:

$$E = 2.11(10^{11}) \text{ Pa}$$

$$D = 8.625 \text{ in}$$

$$y = 0.0946 \frac{\text{in}}{\text{ft}} \times 30 \text{ ft} = 2.838 \text{ in}$$

<sup>17</sup> Propiedades extraídas del Código de diseño ASME B31.1

Por lo tanto, para que el esfuerzo provocado por la deformación del tramo de 30ft no provoque la falla el sistema, el mínimo brazo debe ser

$$L_{min} = 38.91 \text{ ft}$$

Siendo el tramo que soporta la tensión generada por el brazo de 30ft de una longitud de 9.57ft, esta hará que el sistema falle debido al momento flector generado. Así también se demuestra si se calcula es esfuerzo de flexión ( $S_f$ ), el cual es aproximadamente 170 veces el esfuerzo límite.

$$S_f = \frac{3ED\Delta}{L^2} = 170.4 \text{ ksi}$$

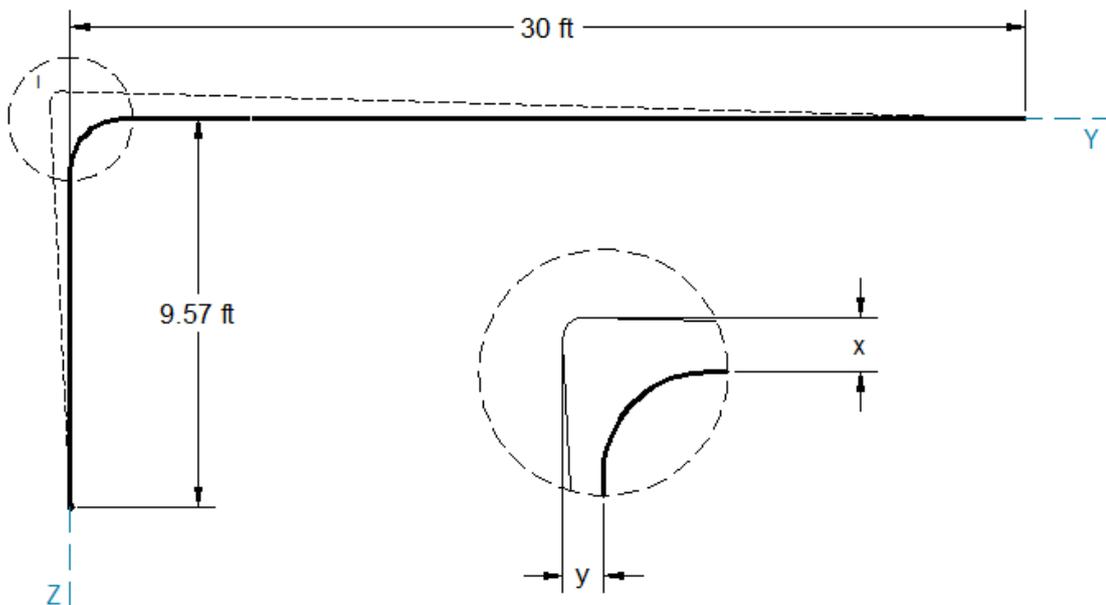


Ilustración 4.21. Esquematación de la deformación en el punto D

Los resultados anteriores hacen imperativo buscar una solución al esfuerzo generado por la deformación del brazo de 30ft, para ello se pueden utilizar cualquiera de las soluciones constructivas descritas en el capítulo 3. Para objeto de este ejemplo, se evaluará la colocación de una junta de expansión.

La junta de expansión debe poder absorber porción de la deformación del tramo de 30ft para aminorar el esfuerzo flector hasta valores comparables con el

esfuerzo límite. Asimismo, la junta de expansión ejerce presión sobre la tubería, generando esfuerzos axiales.

Reordenando Eq 1.7 se puede determinar la deformación máxima que puede admitir el brazo de 9.57ft antes de colapsar por falta de flexibilidad.

$$y_{max} = \frac{S_A \cdot L^2}{3ED} \quad \text{Eq 4.2}$$

$$y_{max} = 0.522 \text{ in}$$

Por tanto, la deformación absorbida por máxima admisible por el brazo de 30ft es:

$$Y = y - y_{max} = 2.316 \text{ in}$$

En la Tabla adjunta en del ANEXO 8. Selección de Juntas de Expansión se tienen características de algunas juntas de expansión comerciales. Seleccionando una junta de expansión corta de tamaño 8 pulgadas y una constante de deformación de 1235 lb/in, se puede determinar las fuerzas que actúan sobre la tubería a causa de la deformación de la junta.

$$F_p = 120 \text{ psi} \cdot 66 \text{ in}^2 = 7920 \text{ lbf}$$

$$F_e = \frac{1}{2} \cdot 1235 \frac{\text{lb}}{\text{in}} \cdot Y = 1423.33 \text{ lbf}$$

El esfuerzo axial de la tubería se calcula sumando las fuerzas generadas en la junta entre el área de la tubería (12.76 in<sup>2</sup>):

$$S = \frac{F_p + F_e}{A} = 0.732 \text{ ksi}$$

Como se observa, la junta de expansión alivia la deformación disminuyendo notablemente el esfuerzo generado. Por lo tanto, colocar una junta de expansión en el tramo de 30ft puede ser una solución viable.

Otro tipo de solución puede ser colocar un soporte flexible de carga constante en el punto D que alivie la deformación axial o colocar lazos de expansión en el tramo en mención. La solución seleccionada deberá ser sustentada con un análisis económico y técnico de la instalación.

Este análisis, se debe aplicar a cada punto del sistema para colocar más accesorios que alivien los esfuerzos de flexibilidad en el sistema.

### **4.3. Casos prácticos**

El análisis de la flexibilidad en sistemas de tuberías puede reducir su complejidad si se identifican de forma aproximada los tramos críticos del sistema. A continuación se describirán las consideraciones básicas para identificar esas secciones.

Como se ha mencionado anteriormente, este tipo de análisis se vuelve más complejo conforme el sistema de tuberías se ramifica. A continuación se mostrarán casos típicos y obtenidos gratuitamente en la web ([www.sstusa.com](http://www.sstusa.com)). Estos casos han sido resueltos con el software *CheckStress* y resuelven problemas comunes encontrados durante el análisis de flexibilidad.

#### **4.3.1. Identificación de tramos críticos**

Este trabajo propone un método sencillo para identificar los tramos críticos del sistema, para ello se debe observar detenidamente el layout del sistema y tomar en cuenta los siguientes pasos previos:

- 1 Identificar los cambios perpendiculares de sentido, si bien estos cambios significan mayor flexibilidad del sistema, suponen también puntos donde esfuerzos flectores se generan.
- 2 Identificar las bifurcaciones del sistema, estos puntos normalmente son motivo de preocupación. En estos puntos se concentran los esfuerzos producidos por deformaciones.

- 3 Identificar si existen reducciones de sección, ya que las expansiones o contracciones térmicas variarán en orden de magnitud dependiendo del área de sección del elemento.
- 4 Identificar los accesorios instalados en el sistema (válvulas de globo, bombas, válvulas check, seguridad, alivio, etc.) ya que muchos de ellos no pueden admitir deformaciones en sus conexiones con el sistema.

Cuando los elementos anteriores son identificados, se debe observar la longitud de los brazos perpendiculares conectados a estos elementos, ya que estos son los responsables de generar deformaciones traducidas en esfuerzos de flexibilidad.

#### **4.3.2. Caso 1: Reducciones en sistemas de tuberías**

En la Ilustración 4.22 se muestra el caso a evaluar. Como se ha descrito, se deben identificar alguno de los elementos enumerados en el acápite anterior.

Enunciado: Se desea evaluar un tramo de tubería empotrado en ambos extremos, el cual cuenta con dos reducciones, una de 8x6" Sch 40 y otra de 6x4" Sch 40, ambas de medidas IPS. La tubería de 8, 6 y 4" también tiene cédula 40 y las condiciones de trabajo del tramo son de 100psi y una temperatura máxima de 300°C. Los resultados de la evaluación se presentan en la Ilustración 4.22 e Ilustración 4.23.

Se puede observar que el tramo desde el nodo 10-50 contiene un lazo de expansión que tiene mayor flexibilidad que el lazo ubicado entre el nodo 100-130, por ello es que el sistema se deformará con mayor facilidad hacia el soporte del nodo 10, como se observa en la Ilustración 4.22. Este perfil de deformaciones no es simétrico, para ello se requiere colocar algún accesorio que dirija la deformación hacia el lazo de expansión ubicado entre los nodos 100-130. De esa forma una solución constructiva es ubicar un soporte fijo cerca a la reducción 8x6". Se observa en la Ilustración 4.23 e Ilustración 4.24 el perfil de deformaciones antes y después de aplicar la solución, notándose una considerable mejora de distribución de esfuerzos.

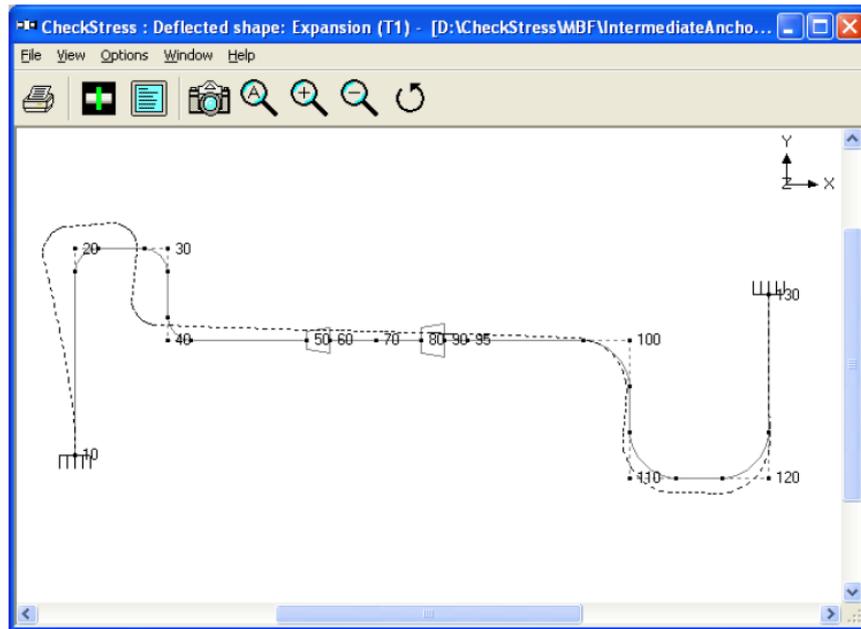


Ilustración 4.22. Caso 1: Sistema con reducciones, perfil de deformaciones

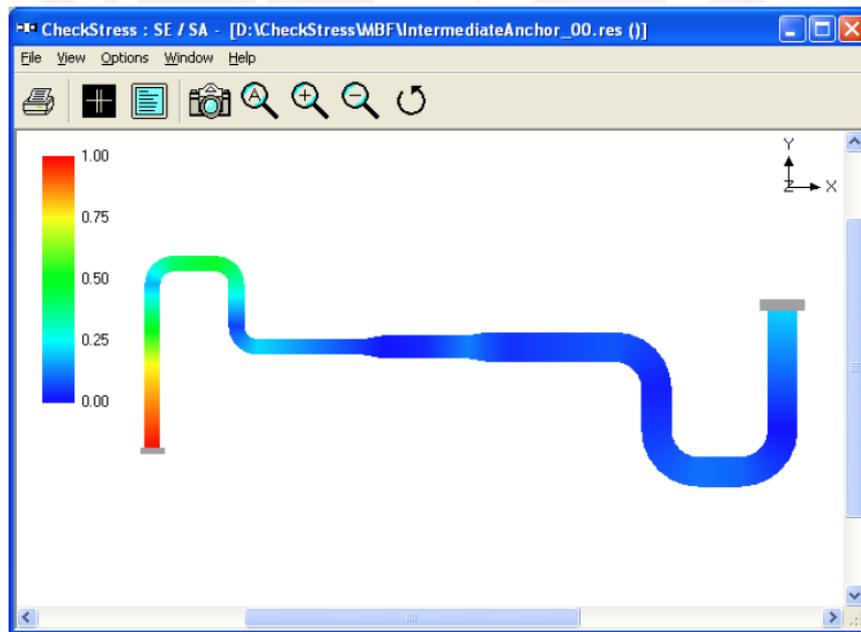


Ilustración 4.23. Caso 1: Perfil de esfuerzos

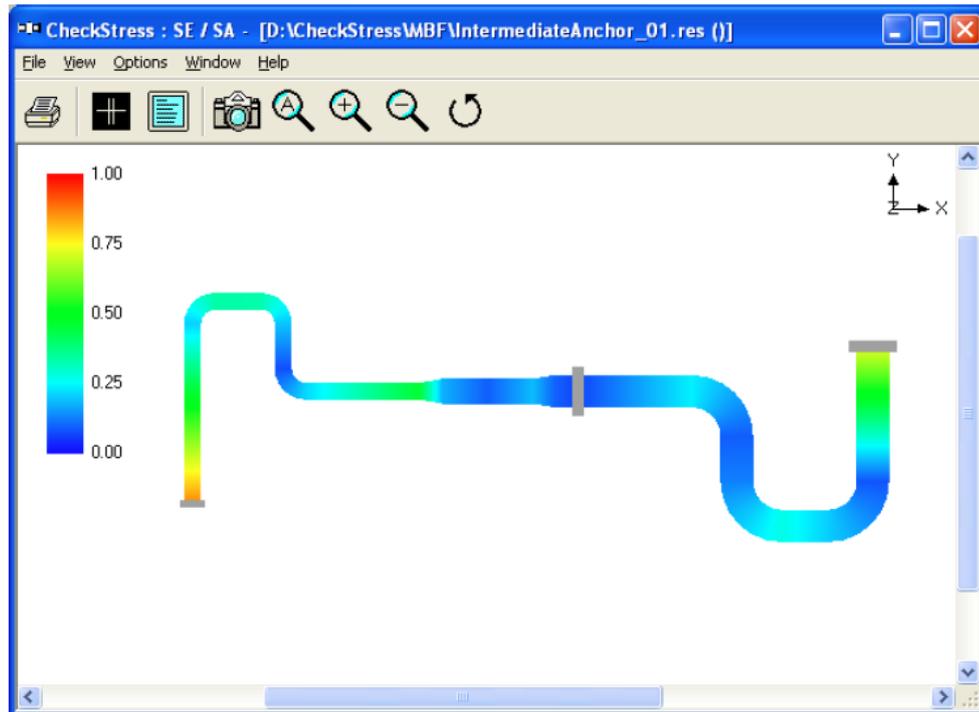


Ilustración 4.24. Caso 1: Perfil de esfuerzos con soporte fijo intermedio

#### 4.3.3. Caso 2: Bifurcaciones en el sistema 1

En la Ilustración 4.25 se muestra el caso a evaluar.

**Enunciado:** El sistema a evaluar es muy similar al ejemplo anterior, con la salvedad que este cuenta con una Tee, el sistema está empotrado en todas sus terminaciones y cuenta con un soporte fijo intermedio (el cual fue ubicado como solución constructiva en la evaluación anterior). Las tuberías instaladas son de 8, 6 y 4" Sch 40 en medidas IPS, la tubería que se bifurca desde la Tee tiene un diámetro nominal de 6". Las condiciones de trabajo son 120psi y una temperatura máxima de 250°C.

Se observa que la deformación que genera el brazo ubicado entre los nodos 220-70 no está aliviada y la concentración de esfuerzos se encuentra en la Tee instalada, tal y como se muestra en la Ilustración 4.26. Por ello, se puede aumentar la flexibilidad del sistema esto se logra retirando el apoyo fijo (ya que este restringe la deformación en dirección Y+) y reemplazándolo por un apoyo de restricción axial, en dirección X.

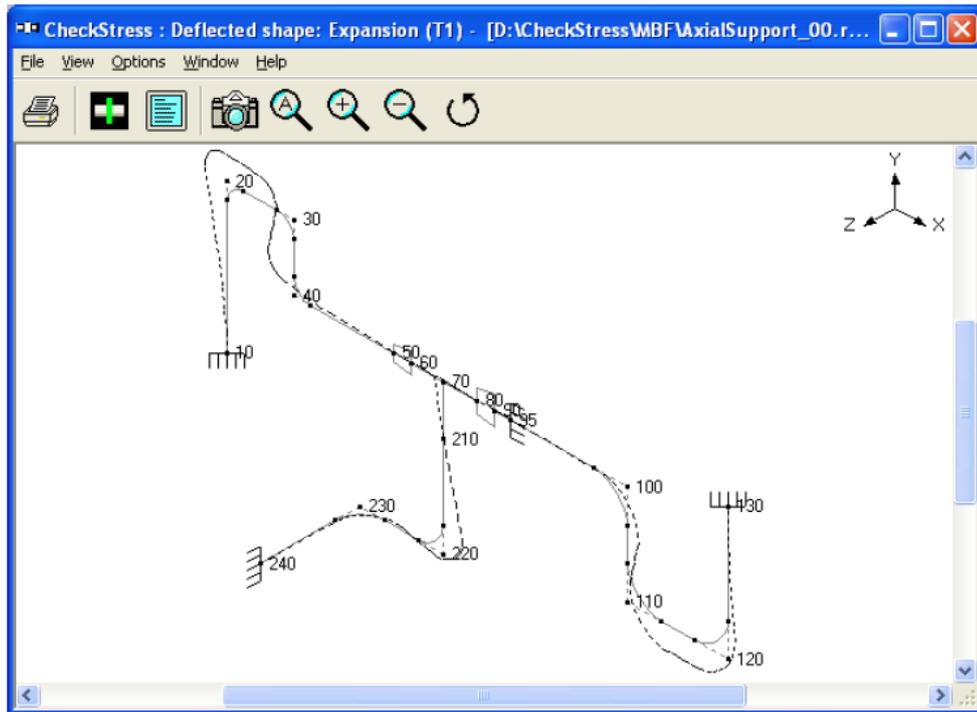


Ilustración 4.25. Caso 2: Sistema con bifurcación, perfil de deformaciones

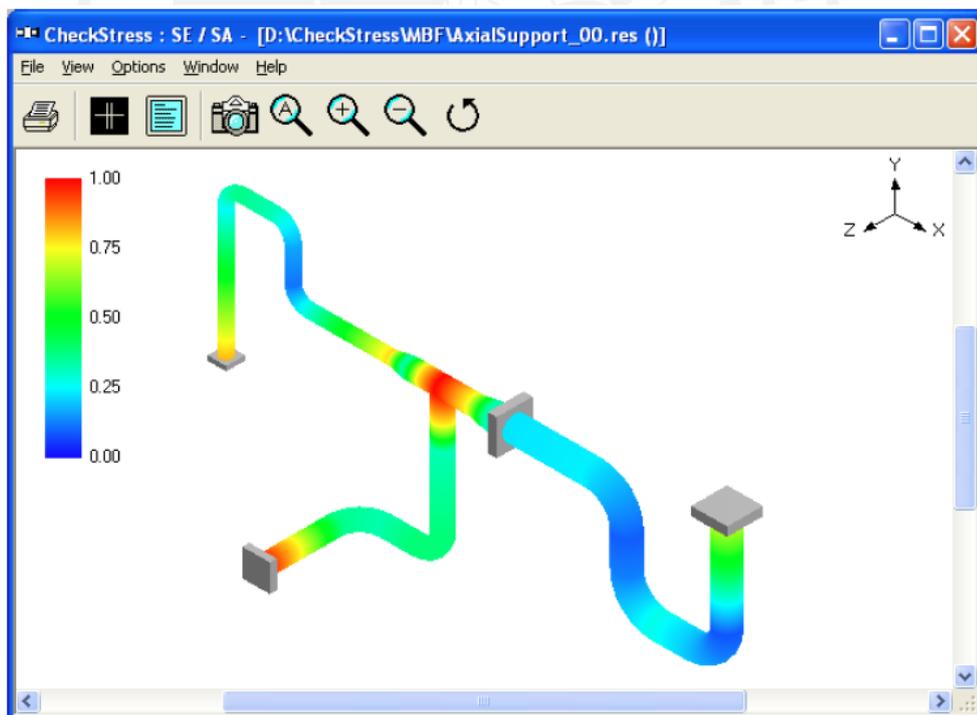


Ilustración 4.26. Caso 2: Perfil de esfuerzos con bifurcación y soporte fijo intermedio

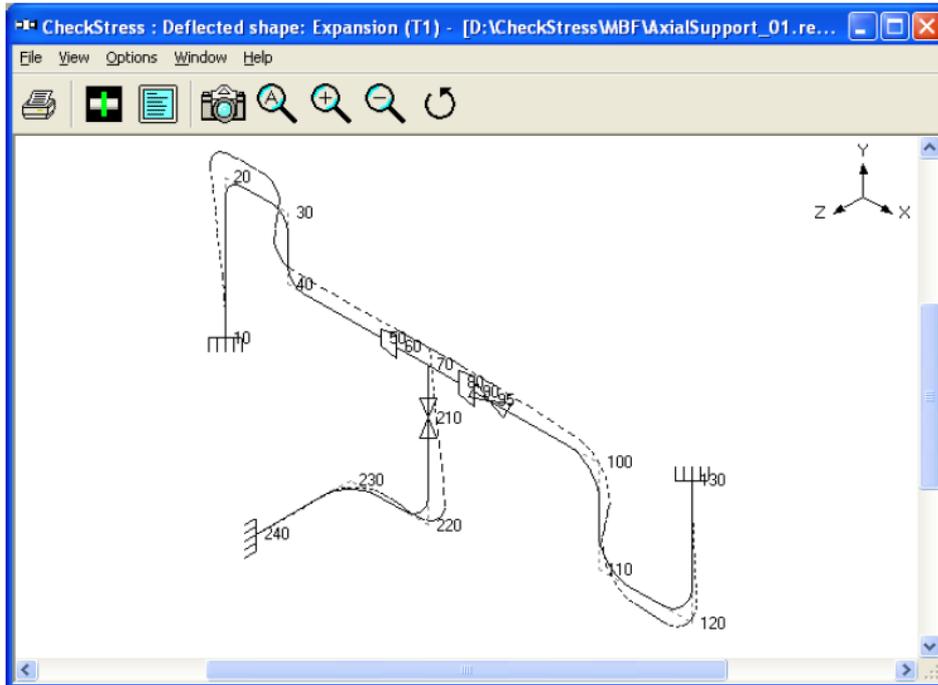


Ilustración 4.27. Caso 2: Sistema con bifurcación, sin soporte fijo intermedio y soporte de restricción axial (perfil de deformaciones)

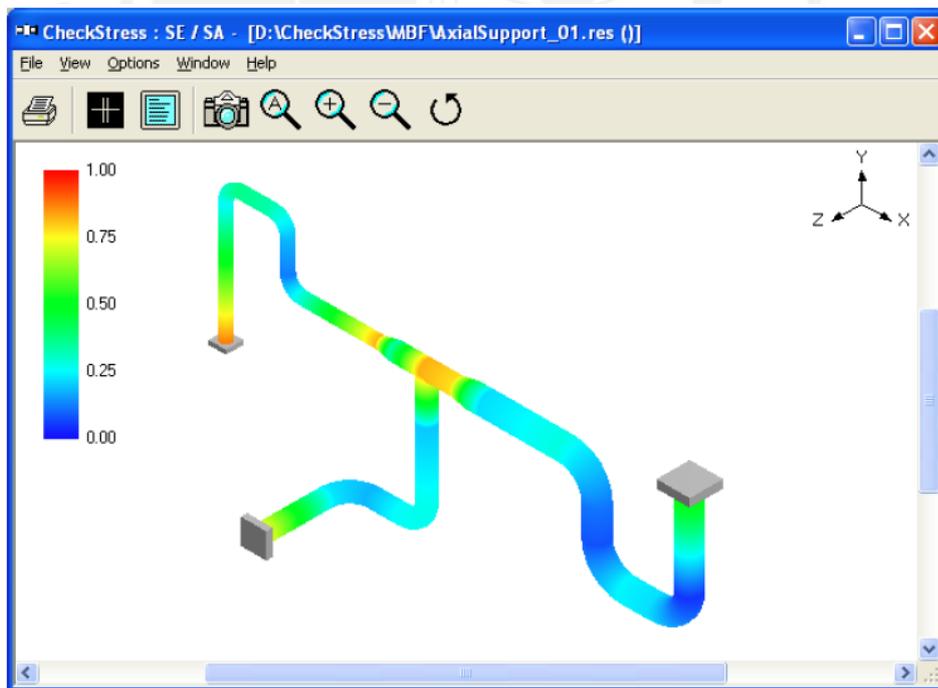


Ilustración 4.28. Caso 2: Perfil de esfuerzos con bifurcación y soporte de restricción axial en dirección X e Y.

Asimismo, limitando la deformación del brazo entre los nodos 200-70 con un apoyo de restricción axial en dirección Y, de esta forma se limita la magnitud de la deformación del brazo y se direcciona esta deformación hacia el tramo flexible entre los nodos 220-240. En la Ilustración 4.27 se observa el nuevo perfil de deformaciones y en la Ilustración 4.28 se observa el perfil de esfuerzos, notando que estos se alivian considerablemente.

#### 4.3.4. Caso 3: Bifurcaciones en el sistema 2

Enunciado: Se tienen tres tramos de tuberías de 8" Sch40 IPS conectados por una Tee. Los extremo del sistema están empotrados y en dos de ellos se ubican bombas con terminaciones bridadas. Las condiciones de trabajo son de 110psi y 350°C.

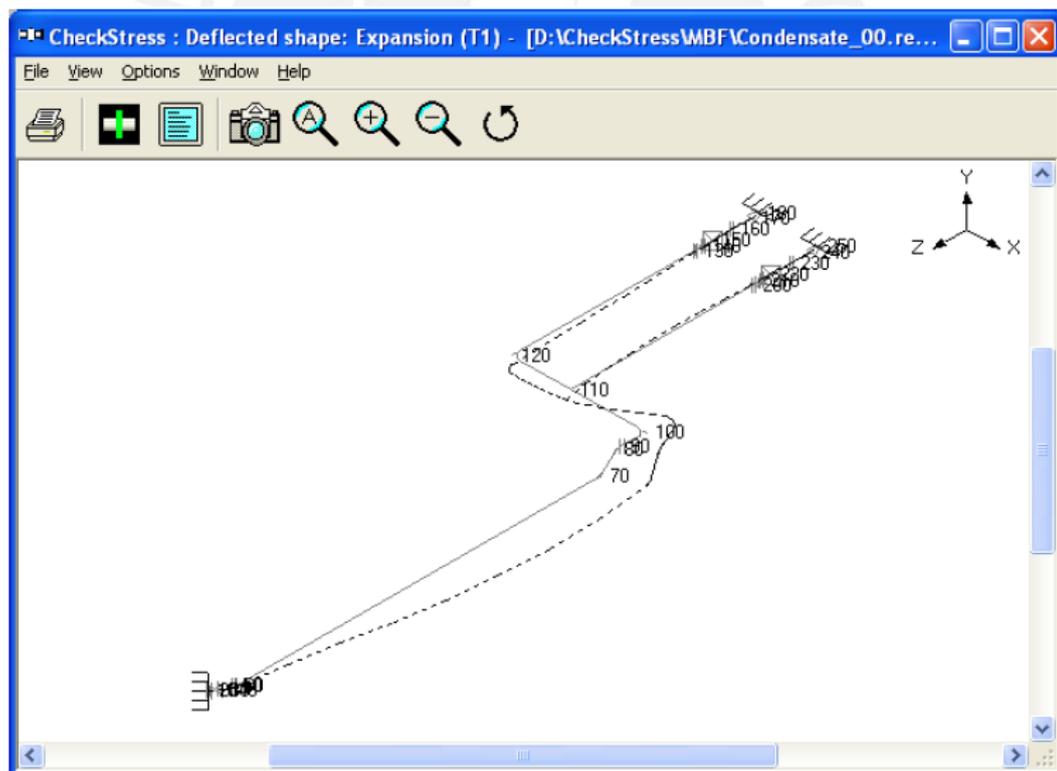


Ilustración 4.29. Caso 3: Sistema con bifurcación, perfil de deformaciones

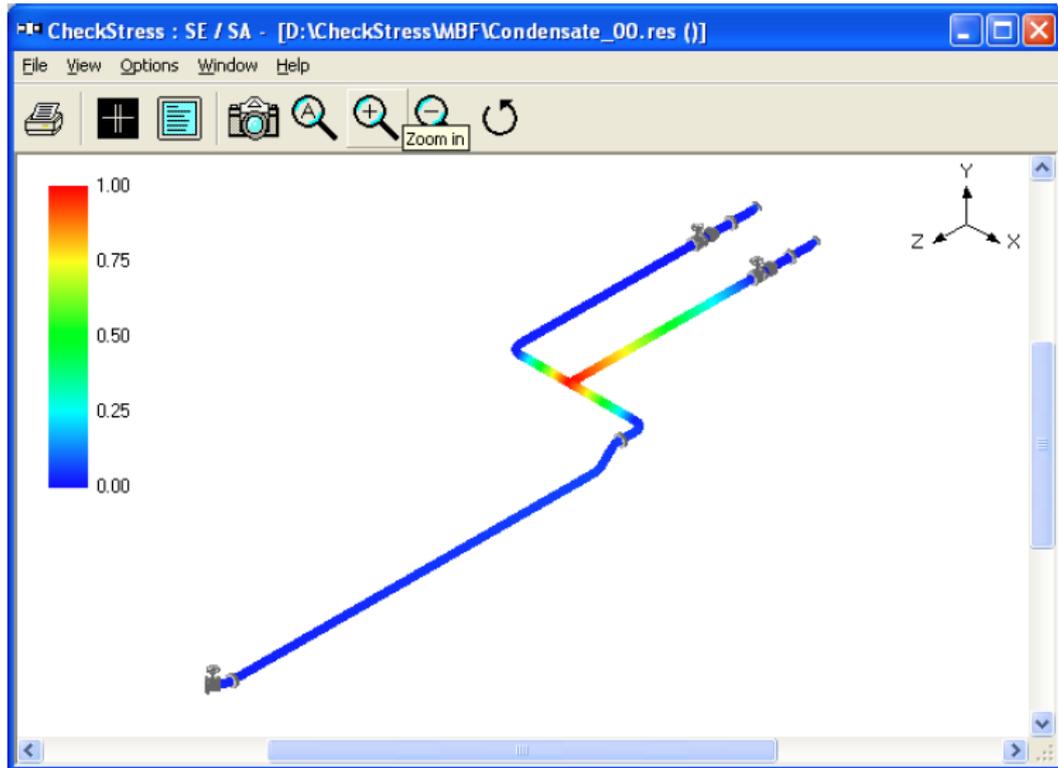


Ilustración 4.30. Caso 3: Perfil de esfuerzos con bifurcación.

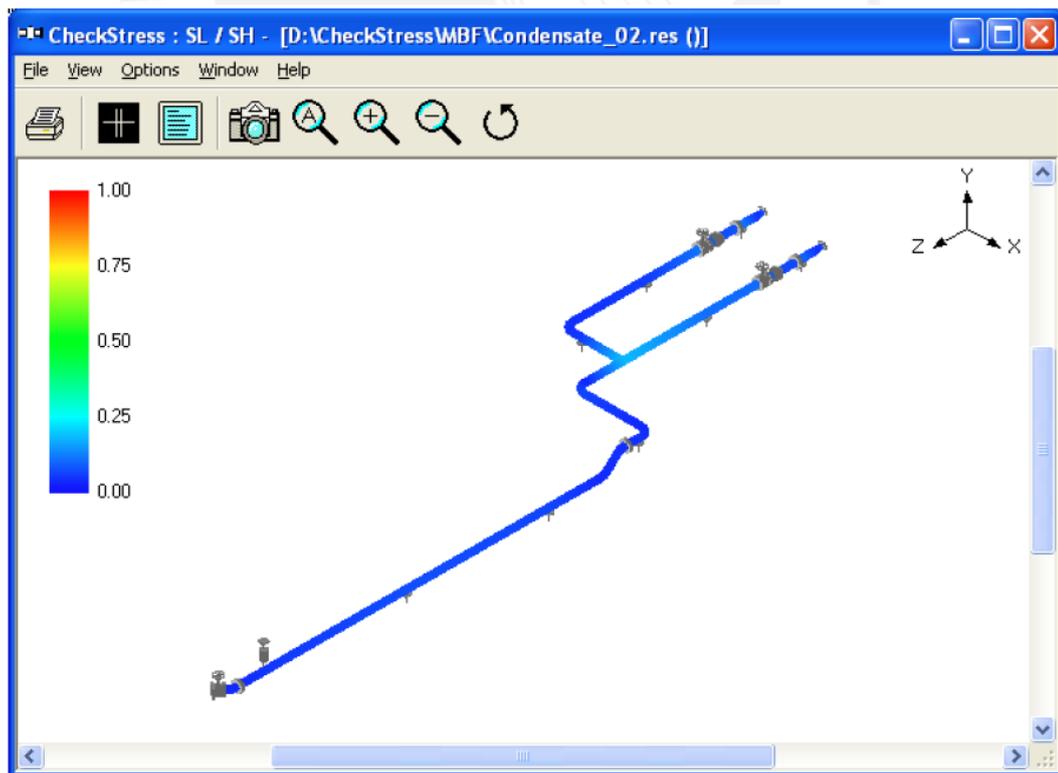


Ilustración 4.31. Caso 3: Perfil de esfuerzos con bifurcación modificada.

Este es otro caso en el que una bifurcación (Tee) puede generar una gran concentración de esfuerzos en el sistema, el perfil de deformaciones de la Ilustración 4.29. Asimismo, se muestra el perfil de esfuerzos en la Ilustración 4.30. En este caso, se debe limitar la magnitud de la deformación provocada por los tramos rectos de tuberías, ya que las deformaciones generadas en sentidos contrarios provocan altas concentraciones de esfuerzos térmicos en la Tee. Para aliviar este fenómeno, se debe eliminar la deformación en dirección Z de uno de los tramos, en este caso, será el tramo entre los nodos 120-180. Esto se logra transportando el brazo 110-120 hacia las válvulas, asimismo, se debe colocar un soporte al lado de la válvula del extremo derecho para aliviar la deformación que el peso de la misma produce. Esta solución alivia de los esfuerzos térmicos como se observa en la Ilustración 4.31.



## 5. CONCLUSIONES

- I. Los métodos empíricos de cálculo, simulaciones y otras herramientas similares están tomando fuerza estos últimos años. La complejidad del fenómeno de flexibilidad y la particularidad de análisis (cada sistema tiene consideraciones independientes de tratamiento) propician la utilización de estos, con resultados confiables. Sin embargo, los métodos y principios teóricos no deben dejarse de lado. El entendimiento e interpretación de los resultados obtenidos de una metodología de análisis (sea la que fuera) es tan y más importante que el análisis *per sé*. Asimismo, las herramientas de simulación u otras dependen de las restricciones iniciales que introduzca el diseñador, pueden existir resultados incongruentes con los esperados normalmente, siendo responsabilidad del analista identificarlas. Es por esas razones que el análisis de flexibilidad de forma teórica no debe subestimarse, el entendimiento de los principios de este fenómeno brindan los conocimientos necesarios al analista para identificar incongruencias en los resultados obtenidos o incluso hacer evaluaciones sencillas que determinen de manera rápida y aproximada la criticidad del sistema.
- II. El análisis de flexibilidad simplifica e idealiza muchos efectos del sistema. Estas simplificaciones no permiten un análisis completo del mismo; sin embargo, nos dan una aproximación aceptable del comportamiento su comportamiento. Asimismo, la complejidad (número de bifurcaciones y ramificaciones) limita el análisis manual, ya que se tendría que idealizar efectos más complejos (con criterios definidos por el analista en base a su experiencia en el campo). Debido a estas razones, se puede concluir de forma general que el análisis manual de flexibilidad no es concluyente, es criterio del analista definir si los resultados obtenidos son suficientes para aliviar

- las tensiones ocasionadas por las deformaciones térmicas para que el sistema de tuberías no colapse.
- III. El análisis de sistemas de tuberías más complejos deben ser sustentados con herramientas de cálculo empírico como CAEPIPE, CEASAR II, ANSYS, entre otros. Esto debido a que los sistemas con mayores elementos tienen comportamientos que no pueden ser estimados con facilidad. Las estimaciones y simplificaciones pueden llevar a errores de diseño que pueden convertirse en altos esfuerzos inesperados.
  - IV. Es importante conocer el tipo de carga a evaluar, ya que el criterio de evaluación es diferente. Por ejemplo, evaluar la falla del sistema debido a una carga externa, como el peso de una válvula es completamente diferente a evaluar la falla del sistema debido al efecto de fragilización debido a una carga cíclica. De esta forma, la previa clasificación de las cargas involucradas en el sistema es paso primordial para aplicar algún método de análisis.
  - V. El coeficiente de dilatación térmica en los metales es alto, por ello los esfuerzos generados por expansiones térmicas en tramos rectos pueden fácilmente colapsar el sistema de tuberías. Asimismo, se puede observar en la Eq 1.5 (página 15) que la magnitud del esfuerzo generado por la deformación axial es independiente de la longitud de la tubería. Este esfuerzo es únicamente dependiente del material de la tubería y de las condiciones de trabajo del sistema, condiciones que no pueden modificarse. Por ello, si la deformación es tal que hace fallar el sistema, se deben utilizar accesorios adicionales al sistema de tuberías para aliviar las tensiones ocasionadas por la deformación.
  - VI. El esfuerzo flector debido a contracciones o dilataciones térmicas en sistemas de tuberías depende directamente del material de la tubería, el diámetro exterior de la tubería y de la deformación transversal. Asimismo, es indirectamente dependiente del cuadrado del brazo de la tubería en dirección perpendicular a la deformación (revisar acápite 1.4.2). Debido a que las condiciones que normalmente no se modifican son: material de la tubería y diámetro exterior de la tubería. Se puede concluir que para aminorar el esfuerzo flector, lo más efectivo es aumentar la longitud de la tubería.
  - VII. Las juntas de expansión tienen gran capacidad de absorción de esfuerzos axiales. Sin embargo, estos accesorios son robustos, requieren de personal calificado para su instalación y manipulación y son de elevado costo. Estos elementos son utilizados

en casos críticos, donde no se tenga acceso para colocar alguna junta de expansión, cuando la colocación de un soporte flexible no sea factible o cuando el esfuerzo a aliviar sea de muy grande. La utilización de estos elementos se hace de forma excepcional.

- VIII. Los lazos de expansión transforman los esfuerzos axiales en esfuerzos de flexión, estos elementos son mayormente usados en plantas térmicas de vapor o generadoras de energía, su costo es bajo y pueden construirse de tamaños personalizados por el usuario ya que sólo requieren cuatro codos 90 grados y tres tramos de tubería. Por estas características, la utilización de este elemento es la primera elección.
- IX. Una de las formas de soluciones constructivas es el llamado pre tensionado o *cold-spring* (descritas en el acápite 3.3 Criterios de instalación). Este supone un análisis detallado de las deformaciones que se generarán en el sistema cuando este entre en funcionamiento ya que se está cargando el sistema, lo que puede ocasionar fallas prematuras. Es debido a esto que este tipo de solución al análisis de flexibilidad debe realizarse con apoyo de un *software* de análisis. En este caso, cálculo teórico no sustenta este tipo de solución.
- X. El esfuerzo flector generado por la deformación transversal de la tubería de la expresión Eq 1.7 (página 17) depende directamente del material de la tubería, el diámetro exterior de la tubería y de la deformación transversal. Asimismo, es indirectamente dependiente del cuadrado de la longitud de la tubería. Las características difícilmente variables son: material de la tubería y diámetro exterior de la tubería (que depende del diámetro nominal y presión de trabajo, condiciones definidas en el análisis hidráulico del sistema), por ello, se puede concluir que para aminorar el esfuerzo flector es más efectivo es aumentar la longitud de la tubería desarrollada.
- XI. La realización de una pre evaluación a un sistema de tuberías utilizando el código ASME B31.1 (Eq 1.10), puede utilizarse para determinar el rango de temperaturas en la que el sistema trabajará sin riesgo de falla por causas de deformaciones. Para ello se debe iterar la expresión de la Eq 1.10 y determinar la temperatura máxima de trabajo para que el método empírico clasifique al sistema como crítico. De esta manera, se puede concluir que ecuación empírica de puede utilizarse no sólo para determinar si el sistema debe ser evaluado por un análisis estricto de

flexibilidad, sino que también puede ser utilizada para determinar el pico de temperatura a la cual trabajará sin inconvenientes el sistema.

- XII. Al observar la ecuación empírica del código de diseño ASME (Eq. 1.9), se puede observar que el resultado depende directamente de la deformación térmica e inversamente del desarrollo del sistema de tuberías, esto lleva a inferir para reducir el riesgo de falla por deformaciones térmicas en un sistema de tuberías, debe aumentarse la longitud de la tubería desarrollada. Sin embargo, se debe tener cuidado con la estabilidad del sistema y la sobre flexibilidad del sistema.
- XIII. Las soluciones constructivas seleccionadas para aliviar los esfuerzos de flexibilidad son diversos, entre las consideraciones a tomar, se han descrito características como capacidad de absorción de deformaciones de flexibilidad, costo del accesorio, espacio geométrico y detalles constructivos. No existen soluciones únicas y un balance de todas estas características deben ser evaluadas por el analista.
- XIV. El código ASME B31.1 nos da las pautas generales de diseño, es decir, nos brinda información para determinar los esfuerzos de flexibilidad resultantes y los esfuerzos de flexibilidad límites de diseño. Sin embargo, la norma no especifica cómo determinar los momentos producidos por las deformaciones térmicas. Es por ello que los métodos para determinar estos momentos son independientes de los métodos de análisis de flexibilidad. Las formas y herramientas usadas por el analista son válidas y es responsabilidad del mismo comprobar la confiabilidad de estos métodos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

**American Society for Testing and Materials. 2012.** *ASTM A53/A53M - 12 Especificación Normalizada para Tubos de Acero Negro, Inmersos en Caliente, Galvanizados, Soldados y Sin Costura.* s.l. : ASTM Standards, 2012.

**Alvarado , Matías, et al. 2006.** Regular Paper: Decision-making on pipe stress analysis enabled by knowledge-based systems. Londres : Springer-Verlag, Noviembre 25, 2006.

**ASME/ANSI. 2001.** *ASME/ANSI B16.9 Factory-made wrought Steel Buttwelding Fitting.* New York : ASME/ANSI, 2001.

**Beta Machinery Analysis. 2011.** A Recommended Approach to Piping Flexibility Studies to Avoid Compressor System Integrity Risk. *Beta Machinery Analysis.* [Online] Octubre 2, 2011. [www.betamachinery.com](http://www.betamachinery.com).

**Díaz Andrade, Guillermo . 2008.** Apuntes de flexibilidad. *coraci sa.* [Online] 2008. [www.coraci.es](http://www.coraci.es).

**Gómez-Gordo, Esteban Melchor. 2007.** *Proyecto de fin de carrera: Análisis de Flexibilidad en sistemas de tuberías.* s.l. : Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, 2007.

**Howard, A. k. 1996.** *Pipeline Installation.* s.l. : Relativity Printing, 1996.

**L. C. Peng, PE. 2002.** *Quick Check on Piping Flexibility .* Houston : s.n., 2002. Paper.

**L.A. Efimenko, et al. 2008.** Analysis of the susceptibility of pipe steels of different strength groups to thermal strain ageing. *Welding International.* s.l. : Taylor & Francis, 2008.

**METRAFLEX. 2005.** Expansion Joint. Design guide. [Online] 2005. [www.metroflex.com](http://www.metroflex.com).

**Nayyar, Mohinder L. 2000.** *Piping Handbook.* New York : R. R. Donnelley & Sons Company, 2000.

**Ollegos, Ignacio Romero. 2011.** *Introducción a la mecánica de los sólidos deformables.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2011.

**S. Itou. 2007.** Thermal Stresses in an infinite elastic pipe weakened by two cylindrical cracks. s.l., Japan : Taylor & Francis Group, LLC, 2007.

**S. Timoshenko, J. N. Goodier. 1951.** *Theory of elasticity.* New York : McGraw-Hill, 1951.

**San-Soo Jeon, Thomas D. O'Rourke and Anil N. Neravali. 2004.** Repetitive Loading Effects on Cast Iron Pipelines with Cast-in-Place Pipe Lining Systems. s.l. : Asce, Diciembre 2004.

**The American Society of Mechanical Engineers (ASME). 2007.** *ASME B31.1 Power Piping.* New York : The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2007.

—. **2002.** *ASME B31.2 Fuel gas piping.* New York : The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2002.

—. **2002.** *ASME B31.3 Process Piping.* New York : The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2002.

—. **2002.** *ASME B31.4 Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids.* New York : The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2002.

—. **2001.** *ASME B31.5 Refrigerations piping and heat transfer.* New York : The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2001.

—. **2008.** *ASME B31.9 Building Services Piping.* New York : The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2008.

**Universidad Politécnica de Valencia. 2000.** *Resistencia de Materiales.* Valencia : Servicio de publicaciones, 2000.

**Veritas, Det Norske. 2008.** *Structural Analysis of piping systems.* Norway : Det Norske Veritas, 2008.

