

2 Gen. 32



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO MECANICO Y TERMICO DE SISTEMAS
DE TUBERIAS**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

presenta

SERGIO A. DIAZ AVILA



México, D. F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

CONTENIDO

INTRODUCCION

1. BASES DE DISEÑO

- 1.1 CODIGOS Y NORMAS
- 1.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

II. ESFUERZOS EN TUBERIAS

- 2.1 ESFUERZOS PERMISIBLES
- 2.2 EFECTOS ESTRUCTURALES
- 2.3 EFECTOS POR EXPANSION TECNICA
- 2.4 EVALUACION DE ESFUERZOS
- 2.5 COMBINACION DE ESFUERZOS

III. COMPONENTES LOCALES

- 3.1 CODOS CARGA ESTRUCTURAL
- 3.2 FLEXION DE TUBOS DEBIDO A PRESION INTERNA

IV. TIPOS DE METODOS

- 4.1 METODOS APROXIMADOS O SIMPLIFICADOS
- 4.2 METODO ANALITICO GENERAL SIMPLIFICADO
- 4.3 DIAGRAMA DE FLUJO
- 4.4 INSTRUCCIONES DEL USUARIO
- 4.5 LISTADO DE PROGRAMA
- 4.6 EJEMPLO DE CALCULO

V. CONCLUSIONES

VI. BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

El objeto del Análisis de Flexibilidad en Tuberías es proporcionar confiabilidad respecto a la falla del material de la tubería en los extremos de conexión, así como evitar esfuerzos excesivos sobre los equipos interconectados, sin desperdicio de material. Aunque en muchos casos las juntas de expansión de los diversos tipos resultan útiles para los propósitos mencionados, el procedimiento más común y generalmente preferible, es observar las expansiones térmicas utilizando la flexibilidad inherente de la tubería, haciéndola trabajar a esfuerzos de flexión y torsión en lugar de esfuerzos directos de tensión y compresión.

El Análisis de Flexibilidad consta realmente de dos pasos: Primero Cálculo de las Fuerzas, Momentos y Esfuerzos (a veces desplazamientos) debidas a los efectos de expansión o contracción térmica en todos los puntos significativos de la estructura tubular y, Segundo, comparación de los elementos mecánicos con los límites permisibles, bien sean del

material en sí o las restricciones especificadas respecto a equipos conectados.

Comparado con un problema usual de Análisis Estructural, la evaluación de reacciones en un sistema de tubería sometido a temperaturas superiores a las del medio ambiente involucra ciertas consideraciones adicionales, siendo las más importantes:

- 1) Existen componentes de tubería, principalmente codos y cambios de dirección que exhiben un comportamiento de flexión, diferente al de los tramos rectos de tubería que se refleja como un incremento en la flexibilidad, usualmente acompañada de una intensificación de esfuerzos.
- 2) Los sistemas de tuberías no se comportan elásticamente ni en su totalidad ni a través del tiempo, ya que como resultado de flujo plástico debido al efecto de la temperatura, ocurren redistribuciones de esfuerzos, tanto de las partes más esforzadas a las menos esforzadas, como de la condición en operación a la condición de instalación.
- 3) Debido a la naturaleza cíclica de la operación de los sistemas de tubería, la fatiga se convierte en un factor relevante, principalmente cuando se presenta acompañado de efectos de corrosión.

- 4) A diferencia de cualquier otro problema de diseño, el aumentar el espesor de la sección, sólo agravaría el problema.

En general se podría decir que la importancia de los sistemas de tuberías para la realización de los procesos, que se efectúan en las plantas industriales (refinerías, petroquímicas, etc.), es evidente ya que constituyen más del 40% del total del equipo de una planta.

CAPITULO I.

BASES DE DISEÑO

Este Capítulo ofrece un panorama general de los factores que intervienen en la evaluación de esfuerzos en sistemas de tuberías debido a varias cargas externas e internas, su asociación con límites de diseño, reglamentos y códigos y, finalmente su significado y aplicación en la práctica del diseño.

Con la creciente complejidad, tamaño y significado económico de las instalaciones de tuberías, es necesario ver más allá de los límites de la práctica de diseño ordinario de tuberías y poner atención a las experiencias de diseñadores en campos relacionados, particularmente a los de diseño de recipientes a presión. Incluso frecuentemente no hay una distinción significativa entre los recipientes a presión y las tuberías. Por lo tanto los comentarios apropiados relacionados con los enfoques comparativos de diseño de tuberías y de recipientes a presión se

mencionan con frecuencia en este Análisis.

Para consecuencias posteriores de la importancia económica de las instalaciones de tubería actuales es necesario al igual que en el diseño de estructuras y equipos a presión, efectuar un compromiso cuidadoso y realista entre las características del diseño (sin pasar por alto materiales, fabricación y requisitos de inspección), y la economía general de la planta (costo, mantenimiento e imprevistos por daño al personal y al medio ambiente). La seguridad del personal de operación y los intereses del público en general hacen que todas las precauciones posibles deban llevarse a cabo. Una confiabilidad máxima de la seguridad sin embargo, requeriría el examen completo de todos los materiales y de la fabricación por los mejores medios disponibles. Aun así no podría obtenerse la certeza absoluta de seguridad, debido a fallas del personal y limitaciones del mismo, en la sensibilidad de métodos disponibles, etc.

Con esta base de enfoque práctico de lograr la seguridad adecuada económicamente, se aceptan niveles más bajos de calidad a base de incluir factores de seguridad en el diseño, los cuales son el resultado combinado de experiencia y razonamiento.

Aun existen muchas inconsistencias en la práctica actual relativa a los requisitos de calidad de materiales y fabricación y al valor puesto sobre varios grados de inspección.

Debe tomarse en cuenta que los Códigos y Normas pueden establecer so lo un nivel de requisitos mínimos para un servicio promedio, basados en conocimientos, experiencias y el consenso de personas calificadas. Muchas de las circunstancias relacionadas con la operación del servi- cio materiales y fabricación, limitaciones de inspección o con un dise- ño no usual merecen una consideración especial, si los sistemas de tu- berías van a estar razonablemente libres de mantenimiento, o si van a proporcionar un período de vida satisfactorio con un funcionamiento se- guro.

Para ayudar al Ingeniero de Dise ño a tener un buen criterio de estos - problemas, se mencionan las consideraciones siguientes:

1.1 CODIGOS Y NORMAS.

El objetivo de los Reglamentos de Códigos y Normas (apar- te de fijar valores dimensionales,), es el de lograr los re- quisitos mínimos para una construcción segura; en otras palabras proporciona protección definiendo aquellos requi- sitos de material, diseño, fabricación e inspección cuya omisión pueda aumentar en gran escala los peligros de operación.

La experiencia con reglas y códigos ha demostrado que la probabilidad de una falla puede reducirse hasta un nivel extremadamente bajo, necesario para proteger la vida y

el medio ambiente, con requisitos mínimos adecuados y factores de seguridad. Obviamente, es imposible para los códigos anticiparse más allá del servicio convencional y no sería económico para éstos prevenir la corrosión, la erosión fatiga, choque o la estructura por fragilidad, excepto al grado de que se conozcan dichas condiciones.

Las precauciones adecuadas, son por lo tanto, responsabilidad del Ingeniero de Diseño guiado por las necesidades y especificaciones del usuario.

1.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

Un sistema de tuberías constituye un marco de espacio irregular en el cual pueden introducirse esfuerzos y deformaciones en la fabricación inicial y montaje; también pueden existir debido a varias circunstancias durante la operación.

Ya instalado un sistema de tuberías está sujeto a cargas debidas a peso muerto (tuberías, accesorios, aislamiento), nieve o hielo, contenidos en la línea, cargas de viento, temblor ú otras consideraciones especiales.

Las restricciones de la expansión térmica proporcionada por anclajes terminales o restricciones intermedias, -- guías, etc., introducen esfuerzos en las tuberías debido a cambios de temperatura. Pueden además introducirse más esfuerzos debido al movimiento del equipo terminal u otras cargas de cualquier influencia, que afecten la posición relativa de la línea, anclajes o fijaciones intermedias.

Los efectos de carga muerta, exceptuando el contenido, se mantienen en todo momento, mientras que los efectos del viento o de temblores son variables y raramente alcanzan valores máximos de diseño. Los cambios de temperatura y de presión, por lo regular ocurren simultáneamente, pero pueden ser independientes o tener una relación dependiente. Pueden ser relativamente uniformes por períodos enteros de servicio o pueden involucrar cambios de duración variable.

Los efectos de carga muerta, de viento y de temblor son iguales a las estructuras convencionales, mientras que los efectos de presión son esencialmente los mismos que para recipientes a presión o en caldera. Los efectos de expansión en general difieren de aquellas estructuras ex-

puestas a cambios de temperatura ambiente, en el que la variación de temperatura sobre la tubería es mucho mayor.

En muchos problemas, el diseñador debe considerar más de una condición en servicio así como el arranque, paro y condiciones de emergencia. Muchas plantas tienen líquidos altamente inflamables, tóxicos o de otra forma, poco comunes, o de maquinaria especializada y equipo que debe aislarse cuidadosamente del aire o contaminantes. El arranque y paro pueden requerir largos períodos de calentamiento, enfriamiento u operaciones tales como purgación, lavado limpiado con baño químico, descoquizar por vapor de aire, etc., cada uno de los cuales pueden introducirse combinaciones totalmente diferentes de temperatura y presión en los sistemas de tuberías.

Las diferencias de temperatura u otras cargas más severas que las condiciones normales de servicio, puede resultar cuando las partes de un sistema se calientan excesivamente. Una apreciación adecuada de estas posibilidades requiere un conocimiento preciso del diseño en proceso, operación, instrumentación y control del equipo conectado, o de la planta entera.

El efecto estático de cargas individuales forma solamente una parte del diseño de tuberías.

Es importante considerar la duración, frecuencia y manera de aplica -

ción de cada carga y su ocurrencia mutua. Tanto la presión como el esfuerzo térmico, si se aplican con número suficiente de ciclos repetitivos, puede resultar una fractura por fatiga. La falla puede acelerarse por la influencia dinámica de cambios repentinos de presión o de temperatura. Los efectos dinámicos también pueden introducir la posibilidad de falla, aparte de las fracturas por fragilidad asociadas con consideraciones metalúrgicas o aceros ferríticos a temperaturas abajo de los límites de transición. Mientras que la falla debida a la corrosión o a los cambios metalúrgicos no es tema de este trabajo, se debe mencionar que el rango de esfuerzos en la tubería o la ocurrencia de un flujo puede ser factor contribuyente en algunos casos.

Las cargas antes discutidas pueden separarse para propósitos de diseño en dos categorías:

1. Aquellas que representan la aplicación de fuerzas externas que sí son excesivas, provocarían falla independientemente de la deformación.
2. Aquellas que representan la aplicación de una deformación interna o externa, generalmente introducidas por un cambio en la temperatura.

La consideración del diseño de cargas individuales puede ser:

- a) Presentes durante la operación normal
- b) Mantenido a través de la vida de servicio

c) Ocasionales y de corta duración.

Para establecer suposiciones adecuadas de diseño, es necesario tener una apreciación adecuada de todos los requisitos directos a los cuales estará sujeta la tubería, y además, comprender las relaciones entre el comportamiento de estructuras y materiales.

CAPITULO I I.

ESFUERZOS EN TUBERIAS

2.1 ESFUERZOS PERMISIBLES.

Esta sección se dedica a la discusión de la naturaleza de los esfuerzos para varias cargas comunes en la tubería, así como una consideración de los esfuerzos permisibles, límites de diseño y factores de seguridad.

Al considerar los valores de esfuerzos, es conveniente distinguir entre dos tipos de esfuerzos: primarios y secundarios.

Aunque no existe una definición aceptada de esfuerzos primarios y secundarios, se tomará el siguiente criterio:

Los esfuerzos primarios son los esfuerzos directos, de corte o de flexión generados por las cargas impuestas que es necesario satisfacer las leyes simples de equilibrio de momentos y fuerzas

internas y externas.

Entre los esfuerzos primarios debidos a efectos externos están los esfuerzos directos longitudinales y circunferenciales debidos a la presión interna y a los esfuerzos por flexión y torsión debidas a carga muerta, nieve o hielo, viento o temblor.

Además, están los esfuerzos directos de flexión y de torsión debidos a carga y restricciones térmicas, las fuerzas externas en este caso son proporcionadas por los anclajes de la línea y otras restricciones.

En general, el nivel de esfuerzos primarios mide directamente la habilidad de un sistema de tubería para soportar con seguridad la carga impuesta.

Los esfuerzos secundarios son usualmente de una naturaleza de flexión, variando desde positivos o negativos a través del espesor de pared de tubo y surgiendo generalmente debido a deflexión radial de la pared del tubo. Uno de los ejemplos más importantes de esfuerzos secundarios es aquel de un esfuerzo de flexión circunferencial de un tubo curvo sujeto a flexión mencionada en el siguiente capítulo.

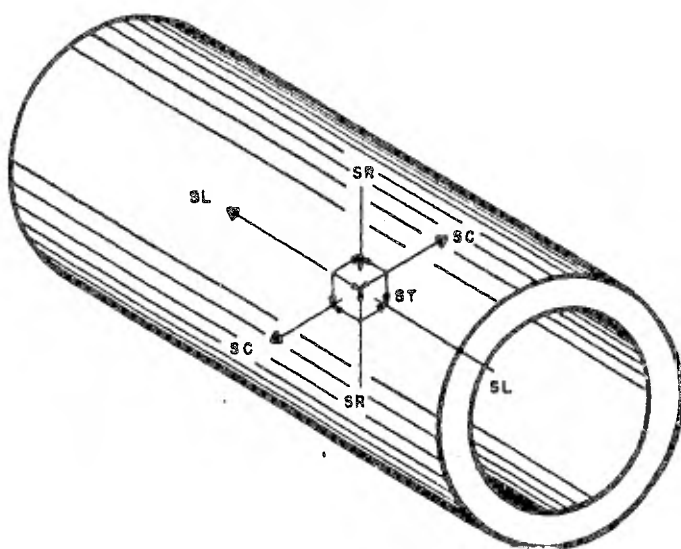


FIG. 2-1

SL= ESFUERZO LONGITUDINAL

SC= ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL O DE HOOP

SR=ESFUERZO RADIAL

ST=ESFUERZO TORSIONAL O DE CORTE

Los esfuerzos secundarios no son una fuente de falla directa en materiales dúctiles con alguna aplicación de carga.

Otro tipo de esfuerzos son los esfuerzos localizados que se desvanecen rápidamente a poca distancia de su origen. Entre los ejemplos están los esfuerzos de flexión en la campana de una brida, en una reducción, o en el diámetro interior de una conexión de ramal.

Estos esfuerzos pueden considerarse equivalentes en significado a los esfuerzos secundarios.

Los códigos de tuberías y recipientes a presión, contienen tablas de esfuerzos permisibles a varias temperaturas que se relacionan solamente con los esfuerzos primarios de cargas estáticas.

El nivel de esfuerzos localizados en boquillas conexiones de ramal, cabezales, etc., se controlan solamente por requerimientos de fórmula y fácilmente pueden estar arriba del 100% del esfuerzo de membrana, aunque el Código puede advertir al diseñador de tales cargas.

Se pueden considerar dos criterios asociados con esfuerzos en tuberías. Uno es el llamado "Esfuerzo permisible del Código" a la temperatura de operación; el otro se conoce como "Límites

de esfuerzo permisible" que se deriva de los esfuerzos permisibles del código que se cubre más tarde en este Capítulo.

El esfuerzo permisible es una función de las propiedades del material y de los factores de seguridad asociados con el diseño.

La experiencia ha demostrado que la presión y otras cargas como esfuerzo, etc., para un equipo promedio, quedan comprendidas dentro de los códigos especializados, además se pueden permitir duraciones moderadas de sobrecarga o alta temperatura debido a circunstancias fuera de lo normal o de emergencia que los códigos toman en cuenta.

A continuación se dan las diversas consideraciones que influyen en el servicio o la seguridad de sistemas de tuberías y se aumentan por la opinión actual en cuanto a límites aconsejables de esfuerzos u otros criterios de diseño.

Para cargas de Presión. En el Código A SME de Calderas y recipientes a presión las bases para los esfuerzos permisibles para materiales ferrosos tanto en la sección I. Calderas de Potencia, como en la sección VIII, Recipientes a Presión, se proporcionan en el apéndice P. de la sección VIII. Este apéndice es importante como referencia general no solo por su explicación sobre las bases de esfuerzos permisibles dados en el código, sino también por su guía en establecer valores de esfuerzo

para materiales similares.

Los esfuerzos permisibles están limitados a un tercio de la mínima fuerza de tensión o a un 60% de la mínima resistencia a fluencia pura. Las otras secciones del Código para tuberías a presión para servicio de temperaturas relativamente moderadas o ambiente, con esfuerzos permisibles en porcentajes variables de resistencia a la fluencia S_y ó esfuerzo de tensión S_u como se indica.

SECCION 2. Tuberías para gas y aire: 0.6 a 0.72 S_y

SECCION 3. Tuberías para transmisión de petróleo: 0.85 S_y

SECCION 4. Sistemas de calefacción: 0.25 S_u

SECCION 5. Sistemas de refrigeración: 0.25 S_u

SECCION 8. Sistemas de transmisión de gas: 0.72 S_y

En un principio el material en consideración debe obedecer la relación de esfuerzo-deformación, siendo los esfuerzos dependientes de las deformaciones de acuerdo con la teoría de deformación. Además, se supone una función del tipo:

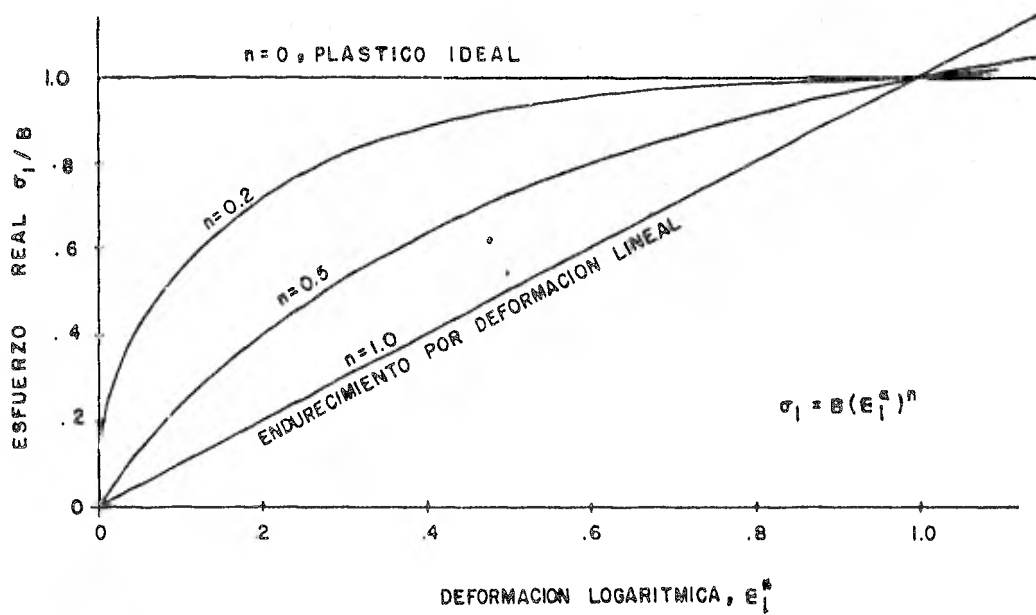
donde:
$$\bar{\sigma}_l = B (\epsilon_l^*)^n \dots (2.1)$$

ϵ_l^* = esfuerzo real de tensión uniaxial

B = deformación logarítmica de tensión uniaxial
constante del material.

que puede describir adecuadamente la curva esfuerzo-deformación de tensión uniaxial. Los tipos de curvas esfuerzo-deformación son obtenidos de la ecuación (2.1) a través de una variación de la constante n (algunas veces referido como exponente de deformación) se muestran en la figura 2.2.

FIG.2-2 CURVAS DE REPRESENTACION ANALITICA DE TENSIONES
 ESFUERZO-DEFORMACION PARA LOS VALORES DE
 n



Por las suposiciones anteriores, puede demostrarse que el esfuerzo -
convencional en una barra sujeta a tensión, en el instante de máxima
carga está dado por:

$$S_u = B (n / e)^n \dots (2.2)$$

S_u = Esfuerzo último de tensión

e = 2.71828 base de los logaritmos naturales

B y n = definidas previamente.

2.2 EFFECTOS ESTRUCTURALES.

Las reglas del Código para Tuberías ANSI B31.1 requieren que los esfuerzos principales debidos al peso de la tubería, accesorios, válvulas, líquido contenido, aislamiento y otras cargas - externas se mantengan dentro del esfuerzo permisible en caliente.

Los efectos ocasionales tales como viento y temblores deben tener poca influencia sobre la vida de fatiga del sistema de tuberías o flujo a altas temperaturas. Por lo tanto, pueden tratarse similar a las prácticas del AISC (American Institute of Steel construction) en donde se permite un 33 1/3% del esfuerzo más alto para los efectos separados de viento o temblor sobre puestos a la carga básica.

En los sistemas de tuberías, la carga estructural se investiga en una forma general, en lugar de eso, es controlada por prácticas estandarizadas y detalles. En casos extremos de tuberías grandes (en longitud) ó rígidos, es aconsejable evaluar la carga completa. Debe ponerse cuidado a aquellas cargas que puedan ocurrir simultáneamente para obtener una resistencia cíclica equivalente. Una inestabilidad estructural o una falla en la tubería bajo cargas longitudinales, tal como se encuentra en columnas es casi imposible. Una falla por pandeo circunferencial lo más probable es que ocurra aunque las relaciones de espesor y radio utilizadas en aplicaciones de tubería son usualmente lo suficiente altas para evitar esto. Como un criterio de diseño para protección de pandeo circunferencial, se sugiere que los esfuerzos longitudinales a compresión no deben exceder a $0.07 E t / r$ en donde E es el módulo de Young, t es el espesor de la pared de tubería y r es el radio de curvatura.

El rango de esfuerzos permisibles, fue sugerido inicialmente - por Rossheim y Markl ⁽¹⁾, como medida del rango del esfuerzo permisible de deformación en un ciclo de aplicación de carga - para protegerse en contra de la posibilidad de una falla por fatiga después de un número dado de ciclos.

Se sugiere que sea aplicable en materiales dúctiles y en condiciones de tuberías comunes o comerciales.

Las principales cargas cíclicas son: la expansión térmica restringida y la presión, aunque el peso del contenido y los efectos ocasionales tales como viento y temblor también son repetitivas en la naturaleza.

Un ciclo de carga externa generalmente varía desde la presencia total de la carga durante la operación hasta removerse completamente bajo condiciones fuera de servicio: la distribución de la deformación interna asociada entre los extremos frío y caliente del ciclo, puede ser variada por otro lado, debido a dependencias de deformación sobre las propiedades del material a cada temperatura y la presencia de esfuerzos de fabricación inicial o esfuerzos residuales como resultado de flujo plástico.

Con la instalación y complementación de las uniones finales de cada ramal de un sistema de tuberías, los esfuerzos internos pueden deberse a tracción en frío, contracción de la soldadura, o reemplazo de bridas. Esto establece un estado inicial de esfuerzo, limitado solamente por el punto de cedencia del material.

Un cambio de temperatura en el primer período de la operación, la deformación por expansión se impone sobre las deformaciones residuales de fabricación.

Si el total excede al límite en cualquier punto, ocurre la deformación, conduciendo a una relajación de los esfuerzos de fabricación inicial y una redistribución de la resistencia térmica.

Una temperatura elevada prolongada servirá para reducir aún más los esfuerzos en la condición caliente a un nivel proporcional al esfuerzo combinado (expansión, presión, peso, etc.)

La reducción del esfuerzo debido a la carga por deformación térmica o flujo plástico a la temperatura de operación se llama "relajación".

La deformación por relajación aparece en el extremo frío del ciclo de temperatura con un signo invertido.

(Ver figura 2 - 3)

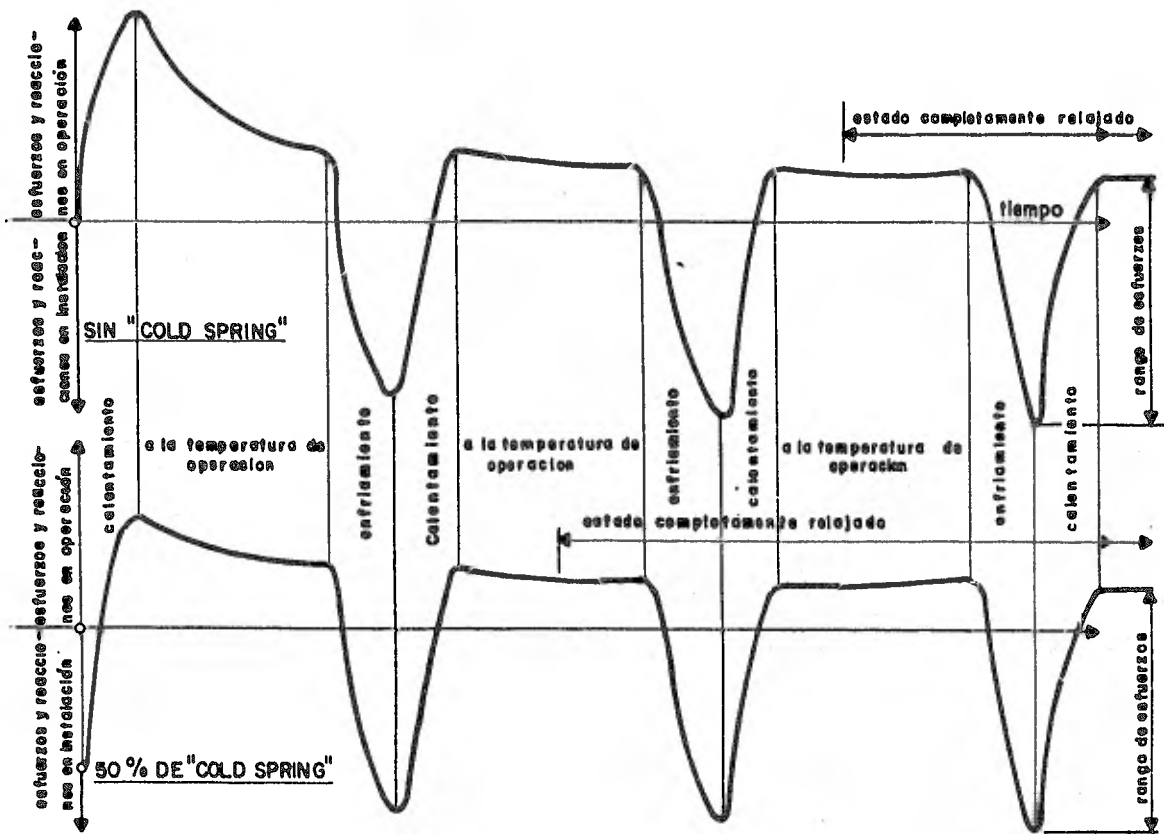


FIG.2-3 EFECTOS DEL TIEMPO EN ESFUERZOS
Y REACCIONES

Para las tuberías con temperaturas moderadas, la división de la deformación térmica entre las condiciones caliente y fría se ajusta durante el ciclo primario en una cantidad dada por el es fuerzo de fabricación residual inicial y la magnitud de esfuer - zo térmico.

La imposición de una carga temporal durante la operación pue - de efectuar otro cambio más de deformación desde la condición en caliente a la condición en frío.

Para temperaturas más altas, en que ocurre flujo plástico, el ajuste de deformación continúa hasta que el esfuerzo combina - do con la temperatura de operación se reduce al límite de rela - jación.

Por conveniencia en el diseño esto generalmente se supone co - mo el nivel de esfuerzo permisible del Código.

A pesar de que dicho ajuste toma lugar, es importante ver el - hecho de que el nivel de deformación por ciclo no cambia y que la habilidad del material para sostener el nivel es una función tanto de sus propiedades calientes como frías.

El proceso por el cual la línea de tubería busca una condición de equilibrio resultado de cedencia y deslizamiento se llama

Para las tuberías con temperaturas moderadas, la división de la deformación térmica entre las condiciones caliente y fría se ajusta durante el ciclo primario en una cantidad dada por el esfuerzo de fabricación residual inicial y la magnitud de esfuerzo térmico.

La imposición de una carga temporal durante la operación puede efectuar otro cambio más de deformación desde la condición en caliente a la condición en frío.

Para temperaturas más altas, en que ocurre flujo plástico, el ajuste de deformación continúa hasta que el esfuerzo combinado con la temperatura de operación se reduce al límite de relajación.

Por conveniencia en el diseño esto generalmente se supone como el nivel de esfuerzo permisible del Código.

A pesar de que dicho ajuste toma lugar, es importante ver el hecho de que el nivel de deformación por ciclo no cambia y que la habilidad del material para sostener el nivel es una función tanto de sus propiedades calientes como frías.

El proceso por el cual la línea de tubería busca una condición de equilibrio resultado de cedencia y deslizamiento se llama

"self - springing" . Esto puede reducirse al mínimo mediante "cold - spring" que consiste en incorporar un pre-esfuerzo a la tensión durante el montaje de la tubería.

No puede darse una respuesta general en el uso del cold - spring para controlar la reacción en caliente inicial,

En los códigos de tuberías, el nivel permisible de esfuerzos podría elevarse cuando un 50% o más de "cold - spring" se proporciona para reducir las cargas por expansión térmica hasta en $2/3$. La única conclusión clara es que el "cold - spring" puede tener solo efectos ventajosos, especialmente en lo que concierne a reacciones en las terminales.

Por lo tanto, es una práctica deseable cuando está justificada económicamente y llevada a cabo con efectividad.

Para aclarar lo anterior, es interesante estudiar una simple analogía, consistente en una barra teniendo una sección con un área reducida como se muestra en la figura 2 - 4, sujeta en los extremos y sometida a un calentamiento y enfriamiento cíclico.

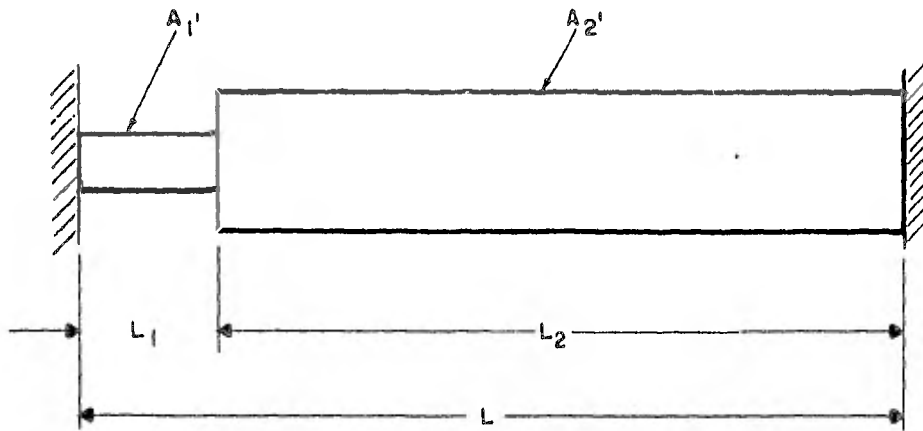


FIG.2-4 REPRESENTACION DE UNA BARRA PARA CALCULOS DE DEFORMACIONES PLASTICAS

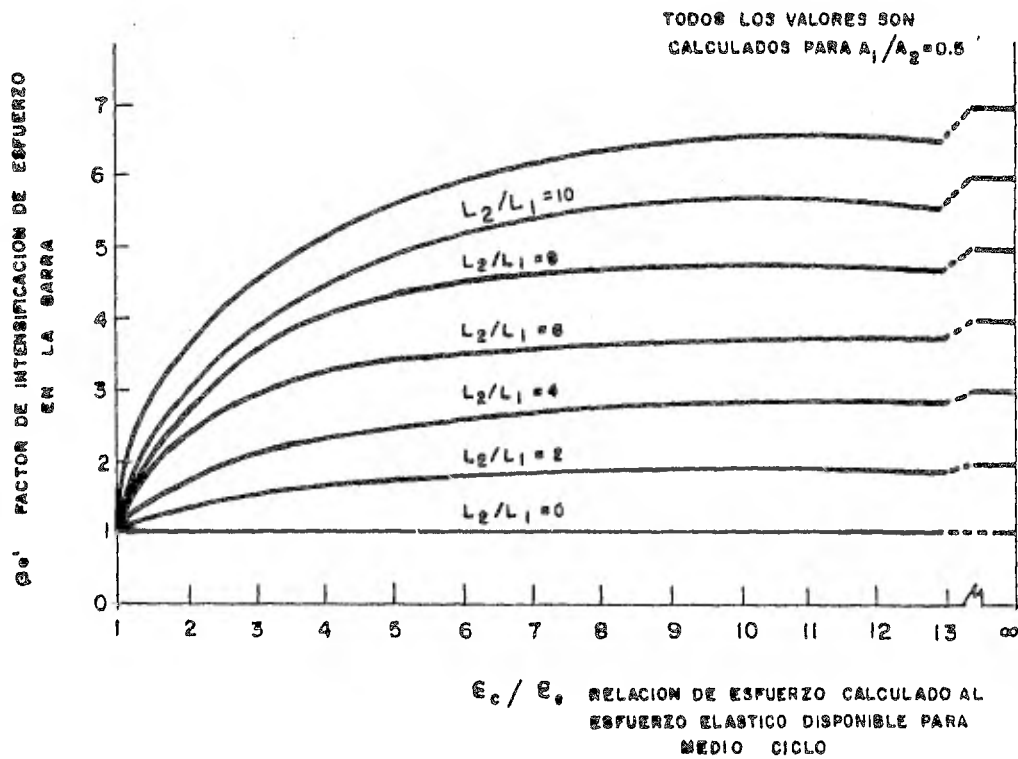


FIG.2-5 ESFUERZO EN LA PARTE DEBIL DE LA BARRA

La barra se supone está hecha de un material ideal elastoplástico. Permitiendo que la barra se sujete a enfriamientos y calentamientos cíclicos de una amplitud constante. Puede demostrarse que durante cualquier ciclo térmico (desde calentamiento a enfriamiento ó viceversa), aparte de la primera operación de calentamiento la deformación unitaria en el miembro 1 está dada por:

$$E_1 = \frac{e L}{L_1} - E_e \frac{A_1 L_2}{A_2 L_1} \dots (2.3)$$

(Fig. 2 - 3)

en donde:

- E_e = Límite del rango elástico
- = $\frac{S_{yc}}{E_c} + \frac{S_{yh}}{E_h}$
- e = Expansión térmica lineal unitaria para un AT.
- L = Longitud total
- $L_1 L_2$ Longitudes de miembros 1 y 2 respectivamente.
- $A_1 A_2$ Areas transversales para miembros 1 y 2
- S_{yc} = Resistencia en el punto de cedencia temperatura en frío.
- S_{yh} = Resistencia en el punto de cedencia temperatura en caliente.
- $E_c E_h$ Módulo de elasticidad de Young en las temperaturas fría y caliente, respectivamente.

Si esta barra se hubiese analizado sobre la suposición que todas las deformaciones permanecen elásticas, el nivel de deformación unitario calculado en el miembro está dado por:

$$E_c = \frac{e \frac{L}{L_1}}{1 + \frac{A_1 L_2}{A_2 L_1}} \dots (2.4)$$

La deformación dada por la ecuación (2.3) es más alta que aquella indicada por la (2.4) y la relación de las dos se le llama factor de deformación que se obtiene de la siguiente ecuación válida para cuando $E_c \geq E_e$

$$\beta_e = 1 + \frac{A_1 L_2}{A_2 L_1} \left(1 - \frac{E_e}{E_c} \right) \dots (2.5)$$

Este es un resultado de extremo interés, ya que E_c es la máxima resistencia unitaria calculada para la aplicación de la teoría elástica y E_e es el máximo nivel de deformación unitaria que los materiales pueden aceptar sin permitir deslizamiento plástico o flujo para cada ciclo.

Siempre y cuando E_c no exceda a E_e no existe un factor de deformación. El factor de deformación para cuando E_c es mayor que E_e está dado por la ecuación (2.5)

La figura (2.5) es una gráfica de esta ecuación para una relación específica de $A_1 / A_2 = 0.5$ y muestra al factor de deforma -

ción como una función de E_c / E_e y L_2 / L_1 estos factores aumentan al aproximarse el área A_1 al A_2 . A primera vista esto no puede ser, la explicación es que al aproximarse A_1 / A_2 a la unidad, la parte de la deformación calculada en el miembro 2 - que no se desarrolla, sino que causa flujo plástico en el miembro 1 aumentando directamente la función A_1 / A_2 .

El rango de esfuerzos permisibles establecidos por el código de tuberías son tales que el flujo plástico debido a efectos por expansión no se permite que ocurra en cada ciclo. Tanto los efectos de flujo plástico como los de cedencia han sido considerados en la parte del rango de esfuerzo permisible en caliente (S_h), sea cual sea el que rija. Las deformaciones repetitivas sobre longitudes sustanciales de tuberías, por lo tanto no debe ocurrir.

Sin embargo, para líneas que no estén preesforzadas, es posible que ocurra alguna deformación durante el período de operación inicial, mientras que la línea se está sometiendo a un "self spring" puesto que esto ocurre solamente una vez, debe considerarse con una visión diferente y no tendrá influencia sobre la fatiga.

La analogía de la barra presentada anteriormente se utilizó para derivar factores de deformación suponiendo que el área debilitada se conocía inicialmente, y que se hizo un análisis elástico

con condiciones conocidas de esfuerzos. Esta analogía podría modificarse fácilmente para mostrar el factor de deformación local extremadamente alto que existiría en algún defecto de la barra con área uniforme, lo cual es suficientemente serio como para causar flujo plástico local. Es bien sabido que la falla por fatiga sigue repetidamente por la presencia de dicho defecto.

2.3 ESFUERZOS POR EXPANSION TERMICA.

Puesto que la expansión térmica ocurre como una carga de deformación finita asociada predominantemente con efectos de flexión, no es probable que ocurra una fractura en la aplicación inicial en materiales dúctiles. Las fracturas resultantes de aplicaciones repetidas de carga de deformaciones térmicas son similares a la falla por fatiga bajo carga mecánica. Por lo tanto, los límites de deformación o esfuerzos permisibles deben estar relacionados con el número de ciclos anticipados durante la vida del sistema de tubería. La falla ocurre en la zona de más alta deformación cíclica localizada.

Es necesario por esta razón aplicar factores de intensificación de esfuerzos para cualquier componente de tubería. Debido a la importancia de dichos esfuerzos desde el punto de vista de fatiga, el Capítulo III se dedica a registrar conocimientos de fac

tores de intensificación de esfuerzos de componentes de tuberías así como su influencia sobre la flexibilidad adicional del sistema de tuberías.

El diseño general se basa en los niveles de esfuerzos para el componente crítico, según se establece por su factor de intensificación y el esfuerzo primario. Este nivel básico de esfuerzos permisibles establecidos para esfuerzos de expansión térmica según el Código de Tuberías es:

$$1.25 S_c + 0.25 S_h \quad \dots (2.6)$$

S_c = esfuerzo permisible a la temperatura del medio ambiente.

S_h = esfuerzo permisible a la temperatura de operación.

Se ha seleccionado con el objeto de proporcionar un mínimo de 7,000 ciclos de operación sin falla. Los esfuerzos secundarios y locales se mantienen dentro de este límite por los factores de intensificación de esfuerzos.

Para un ciclo mayor de 7,000, el nivel de esfuerzos se reduce por un factor relacionado al nivel de esfuerzos permisible por número de ciclos según se determina por pruebas de fatiga a temperatura ambiente sobre material de acero al carbón.

El factor de reducción tiene un límite menor a 0.5

indudablemente será necesario algún ajuste de estos factores, al obtenerse mayor información sobre la fatiga, particularmente para los materiales que no sean de acero al carbón.

El rango de esfuerzos permisibles, citado anteriormente, supone que los esfuerzos longitudinales debidos a la presión y otras cargas externas sostenidas no serán mayores que el esfuerzo permisible en caliente (S_h). Para líneas calientes, los esfuerzos por expansión a temperaturas de operación se supone que disminuyen gradualmente por cedencia y deslizamiento plástico para ser llevados esencialmente como un esfuerzo en frío. Si el esfuerzo longitudinal debido a cargas sostenidas es menor a S_h , el código permite que la parte no usada se aplique para extender el nivel de esfuerzos disponible por efectos de expansión. Por lo tanto, el código admite un total permisible de esfuerzos igual a $1,25 (S_c + S_h)$ para esfuerzos de expansión térmica combinado con esfuerzos por otro tipo de cargas sostenidas.

En general, el diseño de Códigos se simplifica para su uso a lo más considera solamente condiciones estáticas promedio y establece requisitos mínimos de diseño dependiente del factor de seguridad para condiciones no valuadas de esfuerzos.

La naturaleza cíclica de la carga y la posibilidad de falla por fa

tiga no se considera específicamente, excepto en el código de tuberías, en el tema sobre flexibilidad de tuberías por expansión térmica.

Puede uno preguntarse el porqué del enfoque de diseño de fatiga que actualmente se encuentra limitado al análisis de expansión de tuberías.

Esto se debe principalmente al hecho de que las reglas del Código de recipientes a presión no limitan los esfuerzos de presión en materiales ferríticos a $62\frac{1}{2}\%$ del esfuerzo de cedencia y 25% del esfuerzo de tensión. Lo anterior proporciona un margen contra la posibilidad de fatiga debida a esfuerzos localizados y secundarios, mismos que pueden estar 100% o más arriba de este esfuerzo permisible, para el tipo de condiciones cíclicas normalmente encontradas en la mayoría de los servicios de recipientes a presión. En comparación, las deformaciones térmicas juegan un papel más importante en el diseño de tuberías que sería afectado económicamente (y sería virtualmente impráctico en el caso de sistemas rígidos grandes) si el esfuerzo total incluyendo los efectos de expansión se sostuvieran dentro del esfuerzo permisible por el Código a la temperatura de operación.

Impulsados por esta necesidad, la experiencia y el trabajo ana-

lítico han conducido al tratamiento más adelantado de deformaciones térmicas en el Código de Tuberías y a reglas que han reconocido la influencia del número de ciclos, propiedades del material frío y caliente, e intensificaciones locales de esfuerzos.

2.4 EVALUACION DE ESFUERZOS.

La evaluación de los esfuerzos se limita comunmente a esfuerzos primarios directos, de flexión o de torsión, los cuales en la tubería resultan del efecto de presión, peso y expansión térmica.

Los esfuerzos localizados y secundarios que no afectan al sistema en general no se evalúan ordinariamente a pesar de que su influencia sobre la vida de fatiga o cíclica bajo expansión térmica se toma en cuenta a través de los llamados factores de intensificación de esfuerzos.

EXPANSION.

Las fuerzas de expansión en sistemas tridimensionales resultan de 3 componentes de fuerzas y 3 componentes de momentos de flexión en cada punto terminal. El número de dichos componentes se reduce con una fijación en un extremo cualquiera.

La evaluación de las reacciones terminales permite el cálculo de los tres momentos (2 de flexión y 1 de tor-

si3n) en cualquier punto de la lnea de tuberfa por esttica. Estos momentos a su vez, permiten al diseador calcular los esfuerzos utilizando el mdulo de secci3n de la tuberfa.

La contribuci3n de fuerzas directas para los esfuerzos de expansi3n en sistemas de tuberfas es generalmente insignificante, a menos que la disposici3n de la tuberfa sea extremadamente atiesada.

Para simplicidad, el C3digo de Tuberfas estipula que los esfuerzos de expansi3n se calculen con las condiciones en fro (temperatura ambiente). Los esfuerzos de diseo y la relaci3n de Poisson para esfuerzos de expansi3n se refieren igualmente a esa temperatura. Este uso de datos a temperatura ambiente evita la necesidad de usar propiedades a temperaturas elevadas, que tal vez sean determinadas con menor precisi3n.

Otras cargas que pueden actuar sobre los sistemas de tuberfas son: las cargas de peso de la tuberfa, incluyendo miembros estructurales, el peso del aislamiento y contenidos; cargas de nieve y hielo; cargas de viento si est3 expuesta; cargas debido a la aceleraci3n impartida

por terremotos, etc.

Ordinariamente, estos efectos no son lo suficientemente críticos como para exigir el costo extra de ingeniería de un enfoque más preciso.

En su lugar, se controlan indirectamente de una manera estandarizada (por ejemplo, estandar de soportes) o estimados individualmente y controlados de modo que la suma de todos los efectos alcanzara aproximadamente el mismo criterio de esfuerzos combinados.

Los efectos de peso se reducen convenientemente por la previsión de soportes adecuados. En dichos soportes solamente balancean la reacción debida a el peso y pueden ignorarse en el análisis de expansión térmica.

Esta condición raramente se logra aún con soportes de resortes.

2.5 COMBINACION DE ESFUERZOS.

INTENSIFICACION DE ESFUERZOS Y FACTORES DE FLEXIBILIDAD.

Las reglas del Código de Tuberías para Flexibilidad dan la siguiente ecuación para la combinación de esfuerzos debido a la

expansión térmica:

$$SE = \sqrt{Sb^2 + 4 St^2} \text{ en donde ..(2.7)}$$

SE = Esfuerzo equivalente para compararse con el rango de expansión térmica permisible.

Sb = Esfuerzo flexionante longitudinal resultante
 $lb/pg^2 = \beta M/Z = i Mb / Z$

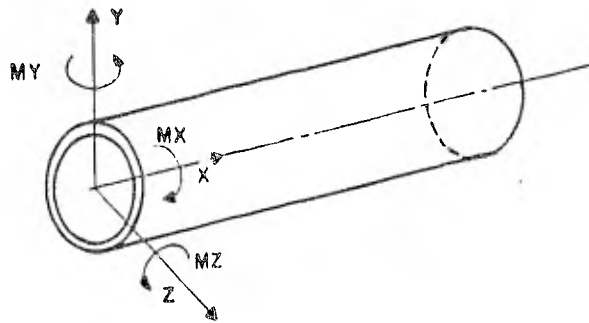
St = Esfuerzo cortante torsional resultante
 $lb/pg^2 = M^t / 2Z$

Mb = Momento flexionante resultante
lb / pulg.

Z = Módulo de sección de la tubería (in³)

$\beta, i =$ Factor de intensificación de esfuerzos

(Figs. 2.6 y 2.7)



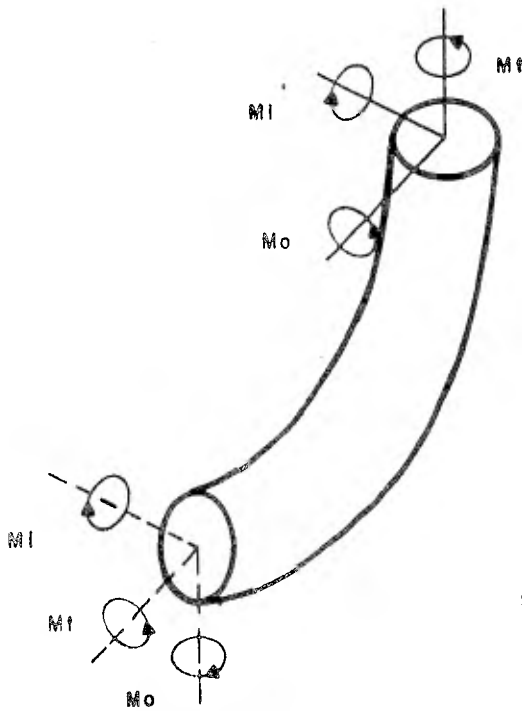
M_x - TORSION
 M_y - FLEXION
 M_z - FLEXION

$$M^2_b = M^2_y + M^2_z$$

$$SE = \sqrt{\frac{I^2 (M_y^2 + M_z^2)}{Z^2} + 4 \left(\frac{M_x^2}{4 Z^2} \right)}$$

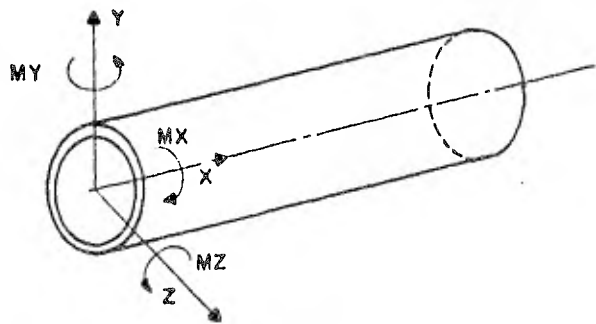
$$SE = \frac{\sqrt{(M_y^2 + M_z^2) I^2 + M_x^2}}{Z}$$

FIG. 2-6



$$S_b = \frac{\sqrt{(I_1 M_1)^2 + (I_0 M_0)^2}}{Z}$$

FIG. 2-7



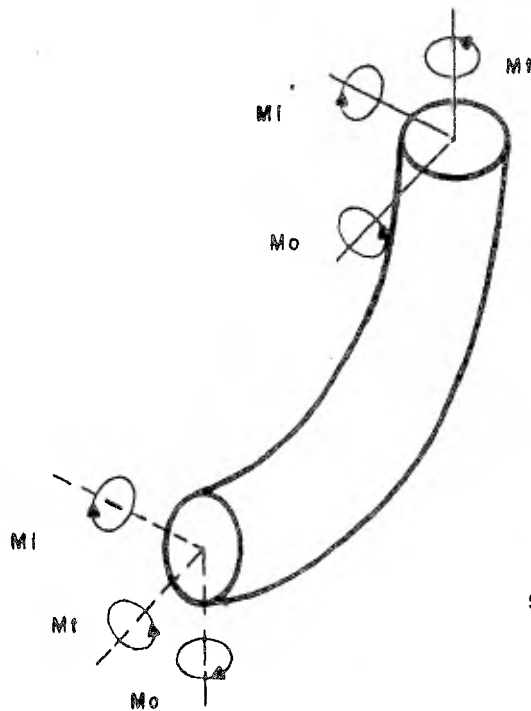
M_x - TORSION
 M_y - FLEXION
 M_z - FLEXION

$$M^2_D = M^2_y + M^2_z$$

$$SE = \sqrt{\frac{I^2 (M^2_y + M^2_z)}{Z^2} + 4 \left(\frac{M_x^2}{4Z^2} \right)}$$

$$SE = \frac{\sqrt{(M_y^2 + M_z^2) I^2 + M_x^2}}{Z}$$

FIG. 2-6



$$S_b = \frac{\sqrt{(I_1 M_i)^2 + (I_0 M_o)^2}}{Z}$$

FIG. 2-7

Esta ecuación se basa en la teoría del cortante máximo y para comparación conveniente con el nivel de esfuerzos permisibles del código la ecuación (2. 7) representa dos veces el máximo es fuerzo de corte debido a cargas por expansión.

Como se mencionó antes, el Código de tuberías establece un límite separado de S_h para el máximo esfuerzo longitudinal, debi do a presión, peso y otras cargas externas sostenidas, siempre y cuando dichas cargas no llegaran a sumar S_h , la diferencia pue de utilizarse para aumentar el nivel del esfuerzo permisible para efectos de expansión.

El enfoque ha sido adoptado por conveniencia para el cálculo de diseños prácticos. Es obvio que al utilizar fórmulas de combinación de esfuerzos y un criterio de cedencia específico los esfuerzos de todas las cargas deberán incluirse para determinar los esfuerzos principales antes de combinarlos.

Por otro lado, desde el punto de vista de falla por fatiga, las car gas que causan esfuerzos cíclicos son las más importantes. Hay por tanto, una lógica razonable al combinar éstos por separado para comparación con un nivel de esfuerzo permisible.

Realmente siempre y cuando el nivel de esfuerzo permisible sea ajustado para adaptarse a los métodos de cálculo y combinación

de esfuerzos que serán usados, los diseños alcanzados desde va
rios enfoques pueden hacerse sustancialmente iguales. La sim-
plicidad de la aplicación ha sido el objeto del Código.

El uso en el Código del criterio de máximo esfuerzo de corte pa-
ra esfuerzos de expansión representa un alejamiento de la eva-
luación de esfuerzos en otras partes del Código, en que solamen-
te se consideran los esfuerzos principales. Mientras que sería
preferible un criterio uniforme para evitar confusión y permitir
mejor evaluación y valoración de factores de seguridad, hay ma-
yor necesidad de una cuidadosa evaluación de cargas de deforma-
ción cíclica lo cual puede conducir a falla por fatiga.

El enfoque mencionado se recomienda para la práctica común,
en vista de los requisitos obligatorios del Código y la relativa
simpleza de manejar por separado los esfuerzos por expansión.
Para aplicaciones críticas, o cuando se analizan simultáneamen-
te las cargas es más apropiado evaluar todos los esfuerzos an-
tes de combinarlos y compararlos al nivel total de esfuerzo ad-
misible de $1.25 (S_c + S_h)$.

Deberá observarse una revisión adicional sobre el esfuerzo prin-
cipal debido a cargas sostenidas a largo plazo aparte de la ex-
pansión, que no deberán exceder a S_h .

En el método analítico general, la influencia de efectos localizados sobre deflexiones y rotaciones se prevee por la inclusión de factores de flexibilidad con las constantes de forma. En efecto, esto compensa por los desplazamientos adicionales proporcionando un aumento en la longitud del miembro a una llamada longitud virtual, produciendo la deflexión relativa deseada.

La influencia neta de esta flexibilidad aumentada es la de disminuir reacciones y esfuerzos nominales primarios.

Esta mayor flexibilidad de componentes locales, tales como flexiones, es el resultado de esfuerzos localizados cuya magnitud arriba del nivel de esfuerzo primario nominal se expresa por un factor de intensificación de esfuerzo, cuyo uso es obligatorio en las nuevas Reglas del Código de Tubería. Estas reglas contienen factores sugeridos de flexibilidad y esfuerzo para componentes comunes de tubería, con la previsión de permitir el uso alternado de factores determinados experimentalmente.

CAPITULO III.

COMPONENTES LOCALES

Este Capítulo considera los componentes de un sistema de tuberías - como: tubería recta, incluyendo bridas, codos y conexiones terminales, las cuales se designan como componentes locales, dado que ocupan una longitud limitada del total de la tubería y a menudo introducen significativamente la flexibilidad de todo el sistema debido a la expansión térmica, intensificación o concentración de esfuerzos.

El intento de este Capítulo es ofrecer un compendio de conocimientos generales acerca de cada componente local y discutir su aplicación - práctica en el diseño de tuberías. La evaluación exacta de los esfuerzos y deflexión es con frecuencia compleja, o aún imposible como resultado existen suposiciones simplificadas y métodos abreviados los - cuales se discuten aquí.

3.1 C O D O S .

CARGA ESTRUCTURAL .

La teoría de vigas o teoría de las secciones planas que se estudian en resistencia de materiales, no se cumple rigurosamente ya que en realidad deberían ser consideradas como "cascarones" puesto que su espesor es pequeño comparado con sus otras dimensiones.

Sin embargo, se ha observado que en el caso de barras de eje longitudinal recto, los resultados obtenidos de un análisis como viga pueden aceptarse sin incurrir en grandes errores, mientras que en el caso de barras de eje curvo (codos) los efectos de cascarón son pronunciados y tiende a producirse un "ovalamiento" de la sección transversal, que se refleja en una disminución del momento de inercia y en consecuencia, en un aumento de las deformaciones por lo que es necesario realizar ciertas modificaciones a la teoría de vigas para incluir en los cálculos dicho efecto. Usualmente este efecto se considera introduciendo el análisis como viga un factor de corrección de flexibilidad denotado por la letra (k).

La investigación sistemática de codos empezó en 1920, cuando Bantlin (2) observó y reportó sobre el fenómeno de ovalización y sobre el hecho de que implica una flexibilidad mayor del sistema que pudo explicarse por medio de las teorías de barras. (fig. 3-1)

SECCION A-A

(a) EN EL PLANO DE FLEXION CON FUERZAS TANGENTES

(b) EN EL PLANO DE FLEXION SIN FUERZAS TANGENTES

(c) FUERA DEL PLANO DE FLEXION

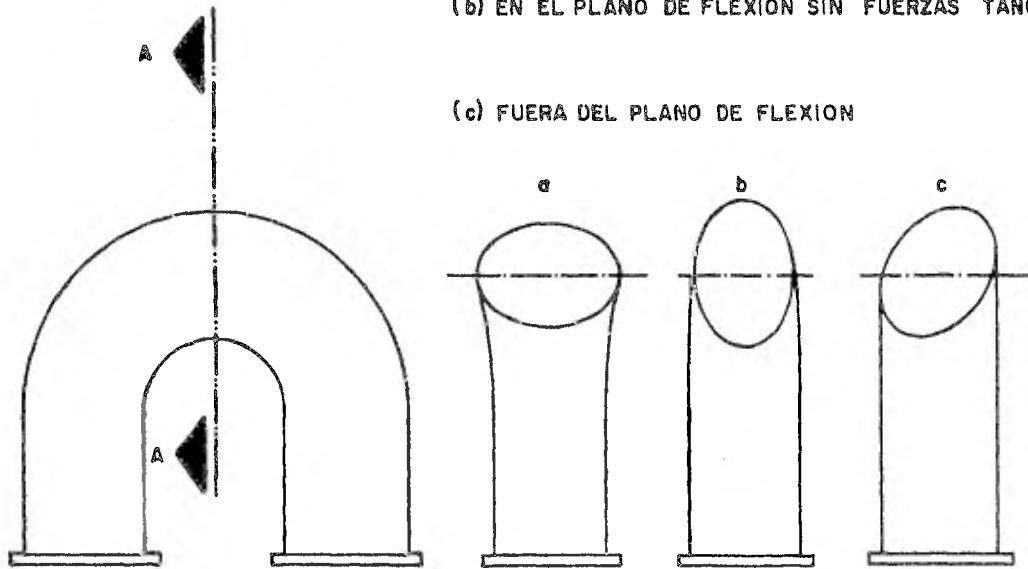


FIG. 3-1 OVALIZACION DE TUBOS CURVOS BAJO MOMENTOS DE FLEXION (EXAGERADO)

Un año más tarde, la primera teoría fue presentada por Von Karman ⁽³⁾ quien investigó la distribución del esfuerzo en tubos curvos presentados en un plano de inflexión. Por el mismo tiempo, Lorenz ⁽⁴⁾ y Marbec ⁽⁵⁾, independientemente proporcionaron una solución de este problema. Usando el teorema de Castigliano en su trabajo en lugar del principio de potencial mínimo de energía como el usado por Karman, Horgaard continuó el trabajo de Karman y llegó a una solución idéntica a través de un acercamiento diferente mientras Karl ⁽⁶⁾, perfeccionaba la solución considerando más términos en las series de expansión por las variables básicas. En 1943 Vigness ⁽⁷⁾, amplió la teoría para incluir el caso de "fuera de plano" para codos en tubos curvos.

Estas investigaciones establecen los siguientes puntos:

1. La teoría elemental de barras sometidas a flexión que supone una variación lineal de los esfuerzos longitudinales no considera la distribución de esfuerzos reales en tubos curvos bajo cargas de flexión externa, por ejemplo, el esfuerzo de flexión longitudinal en las fibras externas está relevado en cierta medida por la ovalización de la sección transversal, recorriéndose el esfuerzo máximo hacia el eje neutro.
2. Esta distribución de esfuerzos por flexión disminuye el -

momento resistente a la flexión de la sección. La relación entre la deflexión incrementada por la ovalización y la predicha por la teoría convencional de vigas se denomina: "factor de flexibilidad" para ese miembro (k).

3. También se generan esfuerzos circunferenciales altos. La teoría para flexión indica que los esfuerzos máximos se presentan cerca del eje neutro de la tubería.

La relación del esfuerzo máximo en el codo de la tubería al que podría existir en un tramo recto sujeto al mismo momento, se le denomina: "factor de intensificación de esfuerzos" (i).

Se puede notar de lo anterior, que los codos además de poseer mayor flexibilidad que un tramo recto equivalente (factor de flexibilidad) son elementos sensibles del sistema en los que se presentarán los estados de esfuerzos mayores (factor de intensificación de esfuerzos).

Estos descubrimientos fueron subsecuentemente reexaminados por Beskin ⁽⁸⁾, quien encontró que los resultados previamente establecidos eran aplicables solamente cuando la característica de flexibilidad de la curva fuera comparativamente grande, cuando la característica disminuye, los resultados llegaron a ser cada vez más divergentes, demostrando que tanto la flexi-

bilidad como el factor de intensificación de esfuerzos llegan a ser infinitos en este valor extremo. Si el tubo curvo es finito, la teoría es aplicable solamente si las condiciones de los extremos permiten el desarrollo de deformaciones (aplastamiento u ovalización).

Las restricciones en los extremos tienden a impedir la ovalización (tales como tangentes de tuberías rectas muy pequeñas, bridas, terminales, etc.), reducirán los factores de intensificación de esfuerzos y flexibilidad. En estos casos la teoría dará valores mayores que los que en realidad están presentes. Estas desviaciones entre la teoría y el comportamiento real serán más grandes conforme más severas sean las restricciones de los extremos o más pequeño sea el arco subtendido por la curva de tubería para una determinada restricción de los extremos.

Tratando el problema de flexión dentro del plano para tubos curvos por medio de la teoría de la membrana, Clark y Reissner⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ encontraron las soluciones de Lorentz, Karman, Karl y Beskin, que son un poco más altas en orden de aproximación y confirmaron los descubrimientos de Karl⁽⁶⁾ que alterna soluciones por el principio del potencial mínimo de energía (usado por Karman) y el principio del trabajo mínimo (adoptado por Lorentz, Karl y Beskin).

La solución de Clark y Reissner se obtiene en términos de una serie trigonométrica en función del esfuerzo y el cambio de ángulo meridional, conservando dos términos solamente de cada serie y limitando el rango de $h > 0.5$, el acercamiento de Clark Reissner llega a ser equivalente a la solución de Karl.

De la solución asintótica de Clark y Reissner se obtiene la siguiente expresión válida para valores pequeños de h

$$K = 1.65 / h \quad \dots (3.1)$$

Es importante hacer notar que todos los análisis tratan con el problema de flexión de tubos curvos de factores de igual flexibilidad, para flexión ya sea dentro o fuera del plano.

Los factores de intensificación de esfuerzos, difieren dentro y fuera del plano de flexión. En general dentro del plano de flexión, domina el esfuerzo circunferencial más alto, que fuera del plano de flexión para tuberías curvas sujetas a iguales momentos de flexión.

Para esfuerzos longitudinales, exactamente el opuesto de este enunciado los factores de intensificación de esfuerzos en las superficies externas son válidas únicamente para pequeños valores característicos del codo ($h < 0.5$), se tienen las siguientes expresiones:

En el plano de Flexión longitudinal $B_i = 0.84/h^{2/3} = \dots (3.2)$

$$\text{circunferencial} \quad \gamma_i = 1.80/h^{2/3} \quad (3.3)$$

En el plano de Flexión

$$\text{longitudinal} \quad \beta_o = 1.08/h^{2/3} \quad (3.4)$$

Fuera del plano de Flexión

$$\text{circunferencial} \quad \gamma_o = 1.50/h^{2/3} \quad (3.5)$$

En este mismo rango la variación del ángulo perteneciente al esfuerzo longitudinal más grande como está mostrado en la fig. (3.2) con el valor característico h, puede obtenerse como

$$\alpha_i = 0.82 h^{1/3} \quad \dots (3.6)$$

Las ecuaciones (3.2, 3.3 y 3.6), se obtienen del análisis asintomático de Clark-Reissner. Las ecuaciones (3.4 y 3.5) representan propuestas empíricas hechas por la Compañía M. W. Kellog.

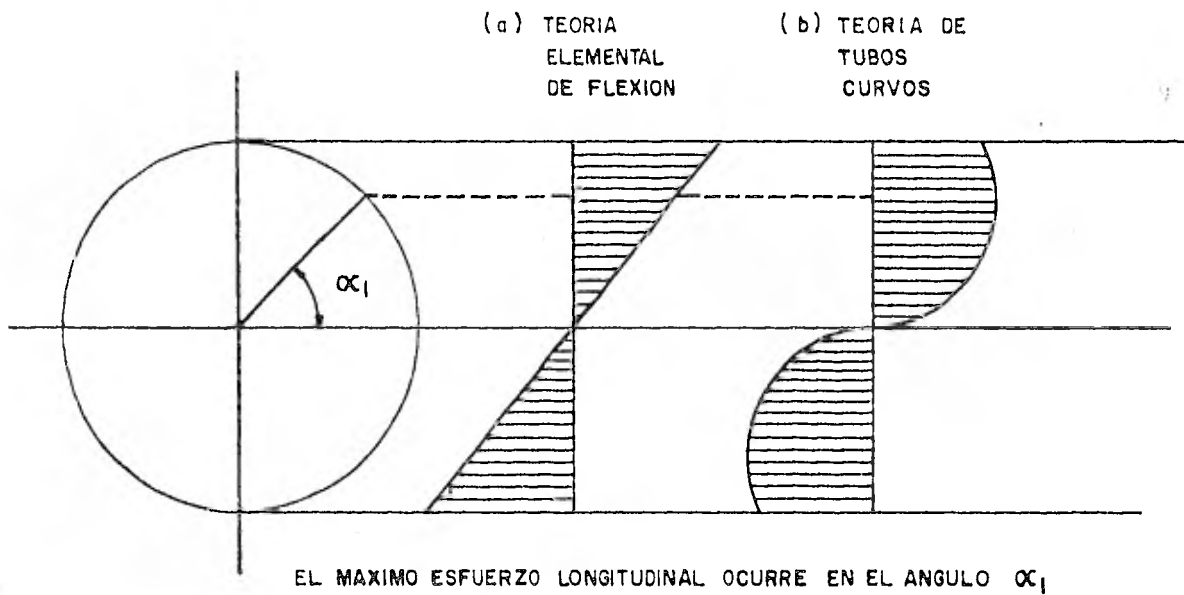


FIG. 3-2 DISTRIBUCION DEL ESFUERZO LONGITUDINAL EN TUBERIAS CURVAS

Estos resultados indican que para cualquier valor de intensificación de esfuerzos ya sea dentro fuera del plano, el esfuerzo circunferencial en las cercanías de $\alpha = 0^\circ$ primero se excederá el esfuerzo mínimo de deformación aparente, siendo éste a pura flexión (excluyendo los efectos de la presión interna), variando de un máximo positivo en la superficie exterior, a un máximo negativo en la pared interior.

Deducciones similares pueden hacerse con respecto al esfuerzo longitudinal máximo en la superficie externa.

El esfuerzo de fluencia seguirá solamente cuando el máximo esfuerzo longitudinal que se encuentra en la mitad de la superficie exceda al esfuerzo mínimo de deformación aparente.

Por eso en la opinión de muchos investigadores el significado de intensificación de esfuerzos, el más grande es el perteneciente al esfuerzo longitudinal máximo que existe entre la superficie y el espesor de pared del tubo.

Un escrutinio más cercano de los desarrollos teóricos descritos antes, revela que además de tratar solamente con tubos teniendo una curvatura constante con la línea central (eje) propiedades constante de sección transversal, hechas de un material isotrópico y homogéneo, obedecen la ley de Hooke y los análisis se basan en las siguientes suposiciones:

1. Las secciones planas permanecen constantes y los ejes neutros tienen una longitud igual después de la carga.
2. Los esfuerzos longitudinales y circunferenciales son principales.
3. El momento de flexión es constante para todo el desarrollo del codo.
4. Los esfuerzos radiales y longitudinales son uniformes a través del espesor de pared.
5. Los esfuerzos circunferenciales producen solamente flexión y de este modo se anulan entre la superficie de la pared del tubo.
6. Los radios de los codos son mucho más grandes y el espesor de la pared es pequeño comparado con el diámetro de la tubería.

La suposición 1, es fundamental en la teoría de la elasticidad y puede aceptarse como verdadera. La segunda y tercera condiciones, se satisfacen solamente si el tubo corvo está influenciado por los momentos flexionantes.

Las suposiciones 4 y 5, tratan de esfuerzos desarrollados bajo carga con simplificaciones idealizadas, de la distribución del esfuerzo y estarán de acuerdo solamente con los esfuerzos reales, cuando $R/r_m > 10$ (es decir, más grande que 5 veces el diámetro del codo

Para codos de radio corto $1 \leq R / r_m \leq 10$ se ha demostrado que bajo flexión dentro del plano (reduciendo la curvatura del radio) el esfuerzo circunferencial no desaparece en la capa media. (Ver suposición número 5).

La última suposición sencillamente limita la precisión de las teorías anteriores de pared delgado para codos de radios largos.

El punto de vista generalmente aceptado es que estos análisis son adecuados solamente si R / r_m y r_m / t sean mayores de 10.

Dado que la derivación de Berskin indica que en $h > 1.0$ los factores de intensificación de esfuerzos generalmente llegan a ser descuidados, esto es de interés para notar que este desarrollo no está condicionado sobre la limitación del estado mencionado sobre el espesor de la pared.

Finalmente, todas las teorías descritas se aplican rigurosamente a las secciones toroidales infinitas, si el tubo curvo no es infinito, entonces la teoría es exacta solamente si las condiciones finales permiten el desarrollo de esfuerzos y desplazamientos idealizados.

El Código ANSI B31.1 recomienda que el factor de intensificación de esfuerzos

$$i = 0.90 / h^{2/3} \quad \dots (3.7)$$

sea utilizado, habiendo aceptado la selección de un factor único solamente por razones prácticas. El factor de flexibilidad (k) según comprobado por la teoría y experimentos se dá como

$$k = 1.65 / h \quad \dots (3.8)$$

que son las ecuaciones que usaremos de aquí en adelante para el diseño de tubería.

Habiendo elaborado suposiciones y obtenido resultados de un acercamiento analítico se podrá observar cómo las teorías se comparan con los resultados obtenidos en el trabajo experimental.

Las investigaciones deben separarse en exámenes realizados bajo condiciones estáticas y aquellas que se refieren a condiciones de pérdida de resistencia debida a esfuerzos continuos, dado que estos representan fundamentalmente diferentes tipos de carga.

Los primeros exámenes estáticos significativos fueron hechos por Horgaard,⁽⁵⁾ quien demostró que los experimentos estaban estrechamente de acuerdo con las predicciones teóricas para la flexibilidad, distorsión o esfuerzos de un sistema dado -- aunque los esfuerzos calculados mostraron extremos más pequeños que aquellos verdaderamente observados.

3.2 FLEXION DE TUBERIAS DEBIDO A PRESION INTERNA

Las teorías y prácticas anteriores trataron únicamente con flexiones de la tubería sometida a cargas externas. Además de este efecto, la pared del tubo será reforzada y forzada por la presión del líquido del sistema, este fenómeno fue investigado por Walk⁽¹⁰⁾ quien encontró que la tendencia hacia la restauración de la forma circular de la sección transversal, no es significativa y como resultado de ello se ha llegado a la conclusión de despreciar dicho efecto, sin embargo, esta conclusión puede requerir modificarse para codos de radio corto de pared delgada de diámetros grandes.

Para un tubo curvo sometido a una presión, los esfuerzos de membrana longitudinal, circunferencial se dan aproximadamente

$$\sigma_l = r m P / 2t \quad \dots (3.9)$$

$$\sigma_c = \frac{2R + r m \operatorname{sen} a}{2 (R + r m \operatorname{sen} a)} \frac{r m p}{t} \quad \dots (3.10)$$

Una investigación más elaborada⁽¹⁰⁾, y pruebas llevadas a cabo sobre tubos curvos bajo presión interna confirmaron la validez general de las ecuaciones 3.9 y 3.10 y mostraron que los

esfuerzos máximos son alcanzados en la línea de flexión que tenga el menor radio de curvatura. A pesar de esto no es práctica común aplicar estas fórmulas en el diseño de flexión del tubo.

CAPITULO I V.

TIPOS DE METODOS

4.1 METODOS APROXIMADOS O SIMPLIFICADOS.

Este tipo de métodos llamados aproximados o simplificados se usan comunmente en el diseño de ingeniería para obtener resultados dentro de aproximaciones convenientes para un mínimo de tiempo con el fin de evitar el empleo de sistemas exactos que son un poco más tardados, más exactos pero obviamente, más costosos.

Es importante tener presente que los códigos relativos ordenan un estudio por métodos exactos en sistemas de tuberías conectadas a equipos delicados en sus extremos como son bombas, turbinas, compresores, etc., ya que estos se encuentran bien definidos en cuanto a fuerzas y momentos, por lo que no es recomendable un método de los llamados aproximados.

Existen muchos métodos aproximados, y cada uno tiene sus propias consideraciones e hipótesis, y es bueno aclarar que cualquiera de éstos métodos ha probado ser suficientemente útil en el análisis de tuberías, y se siguen usando con bastante frecuencia.

Debido a que generalmente los métodos exactos son procesados por computadoras, y muy pocas compañías pueden contar con este servicio, el método llamado "general" también se puede seguir a mano, pero dadas las dificultades de tiempo y la gran cantidad de operaciones realizadas en él, hacen impráctico este procedimiento en esta época.

Es por eso la importancia de estos métodos, algunos de ellos son:

Método del Area de Momentos

Método del Centro Elástico

Método de la Viga Conjugada

Método de la Pendiente de Deformación

Método de la Distribución de Momentos

Analogía con Columnas.

La mayoría de estos métodos trabajan para sistemas planos - (dos dimensiones) en donde para el caso de tres dimensiones se hacen cierto tipo de consideraciones que arrojarán errores en los cálculos, por lo que se hace necesario métodos exactos.

No es propósito de este trabajo presentar cada uno de estos métodos, así como sus ventajas y desventajas, cualquier persona que quiera profundizar más sobre este tema, deberá referirse a la bibliografía seleccionada.

Dentro de estos métodos se presenta el Método Analítico General por medio de tarjetas programables para calculadora y fue diseñado para resolver un gran rango de problemas de análisis de flexibilidad con la mayor comodidad.

4.2 METODO ANALITICO GENERAL SIMPLIFICADO.

La solución presentada en esta sección es una forma limitada del método analítico general, el cual puede seguirse paso a paso por cualquier persona, este método es aplicable a configuraciones en diferentes planos sometidas a expansión térmica y movimientos externos, mismos que deberán satisfacer las siguientes condiciones:

1. Dos extremos fijos
2. Sin restricciones intermedias
3. No exista ningún ramal
4. Recorridos de la tubería rectos

Para sistemas representados dentro de estas limitaciones, la precisión es la misma que aquella del Método General. Debido a esta precisión, este método es más recomendado que cualquier

otro método aproximado que intervenga con un grado comparable de esfuerzos.

Antes de describir realmente el procedimiento para hacer los cálculos, se resume una discusión de los fundamentos, convenciones y terminología.

Primero, se determina la expansión del sistema sin restricciones, se selecciona entonces al azar un extremo fijo para reducir el análisis a un sistema de cantilever. El otro extremo - llamado libre, se supone estar sujeto a fuerzas y momentos de valores desconocidos. Estos valores desconocidos pueden encontrarse de la condición de que deben producir deflexiones del extremo libre que nulifiquen los desplazamientos del otro extremo debido a expansión térmica.

El sistema de coordenadas se estandariza como:

Eje x	horizontal y positivo a la derecha
Eje y	vertical y positivo hacia arriba
Eje z	horizontal y positivo hacia el observador

Los signos direccionales se aplican consistentemente a las distancias, desplazamientos, (expansiones o deflexiones), y fuerzas. Los signos de desplazamientos angulares (rotación y movimientos) serán positivos en la dirección opuesta a las maneci-

llas del reloj del eje relacionado.

El origen del sistema de coordenadas puede ser en cualquier punto en o fuera del sistema de tubería. Una localización cerca del centro del sistema dá una mayor presión por un nivel más uniforme de los coeficientes dimensionales. En donde los miembros coinciden con los ejes, implica que algunos coeficientes serán cero.

El sistema de la tubería está subdividida en ramales los cuales se llaman miembros. Si un recorrido recto contiene un cambio en rigidez, tal como una reducción, debe ser tratado como dos miembros.

Este método está basado en el Método Analítico General presentado por M. W. Kellogg Co.

El programa reduce el tiempo de cálculo y con eso hace más práctico y económico el análisis de sistemas de tuberías con dos anclajes y cualquier grado de complejidad, con exactitud aceptable.

El programa tiene las características siguientes:

1. Puede ser usada cualquier conversión de unidades
2. Pueden evaluarse esfuerzos y reacciones para el sistema de tuberías, basados en el comportamiento

elástico.

4. Todos los elementos pueden ser orientados en cualquier dirección arreglados en cualquier orden y tener cualquier rigides, tamaño, espesor o Constante elástica.

CONSIDERACIONES.

Las consideraciones de este Método son parecidas al "Método Analítico General" y pueden listarse así:

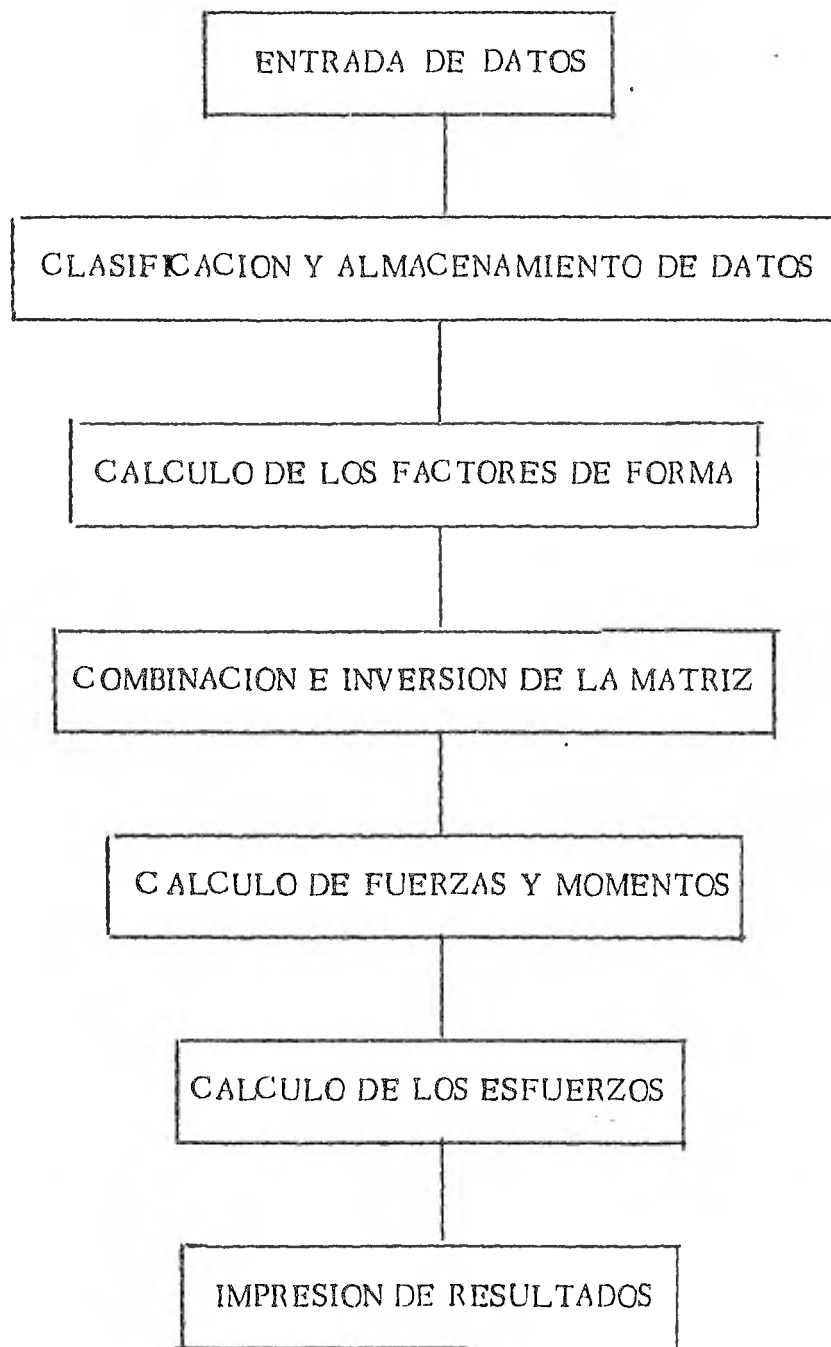
1. El coeficiente de forma Q deberá ser conocido, así como los términos secundarios si son relativamente pequeños pueden despreciarse en comparación con estos coeficientes.
2. Los coeficientes de Tensión y Compresión así como los de corte pueden despreciarse. Estos efectos normalmente tienen poca importancia en la práctica de diseño de tuberías y no alteran los resultados.
3. Los miembros curvos son sustituidos por tramos rectos o una longitud de arco equivalente, con un factor adicional de flexibilidad.
4. Si la longitud del arco del codo es mayor que 4 D, -

donde D es el diámetro nominal de la tubería, el codo será dividido en un número de tramos rectos de tal manera que la longitud del arco del miembro individual no exceda a $4 D$.

Esta aproximación de reemplazo de codos por tramos rectos se requiere para ajustar el programa para la capacidad de la memoria de la calculadora. Sin embargo esta aproximación tiene resultados de alrededor de un 10% de los resultados del Método Analítico General.

Puede verse por lo tanto, que aunque los análisis aproximados tienen un lugar en los análisis de tuberías, el grado de su utilidad depende fuertemente de la experiencia y el juicio de los diseñadores, evitando así errores no valorables en el análisis.

4.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA.



NOMENCLATURA

<u>SIMBOLO</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>UNIDADES</u>
a	Coseno Director eje X	
b	Coseno Director eje Y	
c	Coseno Director eje Z	
e	Unidad de expansión térmica lineal	
h	Características del codo	
k	Factor de flexibilidad de la tubería en codos.	
q	Coefficiente de forma conocido como término secundario.	
t	Espesor de la tubería	
x, y, z	Coordenadas del punto en cuestión	
D	Diámetro de la tubería	
Ec	Módulo de Young's a temperatura ambiente	
Eh	Módulo de Young's a temperatura operación	
Fx, Fy, Fz	Componente de las fuerzas en la dirección indicada	
I	Momento de inercia	
i	Designación para el punto final de miembro	
j	Designación de otro punto final del mismo miembro	
Mx, My, Mz	Componente del momento alrededor del eje indicado	

<u>SIMBOLO</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>UNIDADES</u>
O	Origen del sistema	
Q	relación de rigidez	
R	Radio de curvatura del miembro	
R'	Reacción calculada basada en Eh	
Rc	Reacción en frío	
Sc	Esfuerzo permisible a temperatura ambiente	
Sh	Esfuerzo permisible a temperatura de operación	
S' E	Rango de esfuerzo basado en Eh	
Se	Rango de esfuerzo basado en Ec	

4.4 INSTRUCCIONES DEL USUARIO.

Paso	Instrucciones	Variable	Se ingresa	Pantalla
1	Inserte la tarjeta para calcular los coeficientes de forma			
2	Ingrese las coordenadas del punto fijo O'	Xo Yo Xo	Ent Ent B	Xo'
3	Ingrese las variables del primer miembro de tubería	K Q X ₁ Y ₁ Z ₁	Ent C Ent Ent R / S	K X ₁
4	Repita el paso 3 para los miembros intermedios	K Q X _i Y _i Z _i	Ent C Ent Ent R/S	K X _i
5	Ingrese las variables del último miembro	K Q X Y Z	Ent C Ent Ent R / S	X
	A continuación se obtienen los coeficientes de forma			Axx Bxy Bxz Ayy Byx Ayy

Paso	Instrucciones	Variable	Se ingresa	Pantalla
				Byy Byx Byz Azz Bzx Bzy Cxx Cxy Cxz Cyy Cyz Czz
6	Ingrese la tarjeta para calcular fuerzas y momentos			
7	Ingrese las constantes de deformación	EhI X EhI Y EhI Z	Ent Ent A	Mxo
8	Ingrese el factor de intensificación de esfuerzos	B	B	B
9	Ingrese módulo de sección	Z	C	Z
10	Ingrese las coordenadas del punto "A"	X Y Z	Ent Ent E	S'E X Y Z Mx My Mz Fx Fy Fz Mxo Myo Mzo

NOTAS:

1. Denota la dirección normal de la sección transversal para la dirección x; para la dirección Y y para la dirección Z

Pasos	Instrucciones	Variable	Se Ingresa	Pantalla
-------	---------------	----------	------------	----------

2. M_{x0} , M_{y0} , M_{z0} , son los componentes del vector momento en las coordenadas de origen
- 11 Para el cálculo de fuerzas y momentos de cualquier otro punto regrese al paso 8 ó 9 el que sea más apropiado.

4.5 LISTADO DE PROGRAMA

01 *LBL "TUR	
02 *LBL B	
03 7CLREG	
04 7PKDS	
05 7CLREG	
06 *LBL 13	Almacena en memoria las
07 STO 24	coordenadas Xi, Yi, Zi
08 RDN	
09 STO 23	
10 RDN	
11 STO 22	
12 RTN	-----
13 *LBL E	Levanta Bandera 00
14 SF 00	-----
15 *LBL 12	
16 *LBL C	Almacena en memoria
17 STO 00	Qj, Kj
18 RDN	
19 STO 20	-----
20 STOP	
21 STO 03	Calcula y almacena en memoria
22 RCL 24	$\bar{Z} = \frac{Zj + Zi}{2}$
23 ST- 03	
24 +	
25 2	
26 /	-----
27 STO 24	
28 RDN	
29 STO 02	Calcula y almacena en memoria
30 RCL 23	$\bar{Y} = \frac{Yj + Yi}{2}$
31 ST- 02	
32 +	
33 2	
34 /	-----
35 STO 23	
36 RDN	
37 STO 01	Calcula y almacena en memoria
38 RCL 22	$\bar{X} = \frac{Xj + Xi}{2}$
39 ST- 01	
40 +	
41 2	
42 /	-----
43 STO 22	
44 RCL 01	
45 X↑2	Calcula y almacena en memoria
46 RCL 02	la Longitud L
47 X↑2	$L = \sqrt{x^2 + y^2}$
48 RCL 02	
49 X↑2	
50 +	
51 +	

52 SORT
 53 STO
 54 ST+ 00
 55 ST/ 01
 56 ST/ 02
 57 ST/ 03
 58 4
 59 STO 25
 60 XEQ 01
 61 XEQ 05
 62 RCL 24
 63 XEQ 06
 64 XEQ 01
 65 RCL 23
 66 CHS
 67 XEQ 06
 68 XEQ 02
 69 XEQ 05
 70 RCL 24
 71 CHS
 72 XEQ 06
 73 XEQ 02
 74 RCL 22
 75 XEQ 06
 76 XEQ 03
 77 XEQ 05
 78 RCL 23
 79 XEQ 06
 80 XEQ 03
 81 RCL 22
 82 CHS
 83 XEQ 06
 84 XEQ 03
 85 RCL 23
 86 X↑2
 87 *
 88 XEQ 02
 89 RCL 24
 90 X↑2
 91 *
 92 +
 93 RCL 02
 94 X↑2
 95 RCL 03
 96 X↑2
 97 +
 98 XEQ 04
 99 XEQ 05
 100 XEQ 03
 101 RCL 23
 102 *
 103 RCL 23

 Almacena en Memoria Q x L

 Almacena Cosenos Directores

$$\frac{Ax}{L}, \frac{Ay}{L}, \frac{Az}{L}$$

 Almacena 4 en memoria 25

 Calcula y Almacena

$$A_{xx} = K + (1.3 - K)a^2 \quad Q \times L \quad B_{xy} = \bar{Z} A_{xx}$$

$$B_{xz} = \bar{Y} A_{xxx}$$

$$A_{yy} = K + (1.3 - K)b^2 \quad Q \times L$$

$$B_{yx} = \bar{Z} A_{yy}$$

$$B_{yz} = \bar{X} A_{yy}$$

$$A_{zz} = K + (1.3 - K)c^2 \quad Q \times L$$

$$B_{zx} = \bar{y} A_{zz}$$

$$B_{zy} = \bar{X} A_{zz}$$

$$C_{xx} = y A_{zz} + Z A_{yy} + KL(b^2 + c^2) \quad Q \times L$$

$$C_{xy} = x y A_{zz} - ab \frac{KL}{12} \quad Q \times L$$

104 *
 105 RCL 01
 106 RCL 02
 107 +
 108 XEQ 04
 109 CHS
 110 XEQ 05
 111 XEQ 02
 112 RCL 23
 113 *
 114 RCL 24
 115 *
 116 RCL 01
 117 RCL 03
 118 *
 119 XEQ 04
 120 CHS
 121 XEQ 05
 122 XEQ 03
 123 RCL 23
 124 X↑2
 125 *
 126 XEQ 01
 127 RCL 24
 128 X↑2
 129 *
 130 +
 131 RCL 01
 132 X↑2
 133 RCL 03
 134 X↑2
 135 +
 136 XEQ 04
 137 XEQ 05
 138 XEQ 01
 139 RCL 23
 140 *
 141 RCL 24
 142 *
 143 RCL 02
 144 RCL 03
 145 *
 146 XEQ 04
 147 CHS
 148 XEQ 05
 149 XEQ 02
 150 RCL 23
 151 X↑2
 152 *
 153 XEQ 01
 154 RCL 23
 155 X↑2

$$C_{xz} = -\bar{X}\bar{Z} A_{yy} - ac \frac{KL^2}{12} Q_{xL}$$

$$C_{yy} = \bar{X} A_{zz} + \bar{Z} A_{xx} + \frac{KL^2}{12} (a^2 + b^2) Q_{xL}$$

$$C_{yz} = -\bar{Y}\bar{Z} A_{xx} - bc \frac{KL^2}{12} Q_{xL}$$

$$C_{zz} = \bar{X} A_{yy} + \bar{Y} A_{xx} + \frac{KL^2}{12} (a^2 + b^2) Q_{xL}$$

156 *
 157 +
 158 RCL 01
 159 X↑2
 160 RCL 02
 161 X↑2
 162 +
 163 XEQ 04
 164 XEQ 05
 165 RCL 21
 166 2
 167 /
 168 ST* 01
 169 ST* 02
 170 ST* 03
 171 RCL 22
 172 RCL 01
 173 +
 174 RCL 23
 175 RCL 02
 176 +
 177 RCL 24
 178 RCL 03
 179 +
 180 GTO 15
 181 LBL 01
 182 RCL 01
 183 GTO 00
 184 LBL 02
 185 RCL 02
 186 GTO 00
 187 LBL 03
 188 RCL 03
 189 LBL 00
 190 X↑2
 191 1.3
 192 RCL 20
 193 -
 194 *
 195 RCL 20
 196 +
 197 RCL 00
 198 *
 199 RTN
 200 LBL 04
 201 RCL 21
 202 X↑2
 203 *
 204 RCL 20
 205 *
 206 12
 207 /

CALCULA

$$\frac{Ax}{2} = \frac{aL}{2}$$

$$\frac{Ay}{2} = \frac{bL}{2}$$

$$\frac{Az}{2} = \frac{cL}{2}$$

$$Xj = \bar{X} + Ax / 2$$

$$Yj = \bar{Y} + Ay / 2$$

$$Zj = \bar{Z} + Az / 2$$

Registra para el siguiente miembro

Subrutina para calcular

Axx, Ayy, Azz

Multiplica por $\frac{KL^2}{12}$ Q x L y suma
también y al registro

208 RCL 06
209 +
210 +
211 RTN
212 LBL 06
213 +
214 LBL 05
215 ST+ IND
05
216 RCL IND
25
217 F67 00
218 7PRN
219 RDN
220 7ISZ
221 RTN
222 STOP
223 END

Multipluca X por el registro Y

Suma la memoria 25,
imprime la suma E
incrementa la memoria 25

01 *LBL TUB
--2--

02 *LBL A
03 STO 22
04 RDN
05 STO 21
06 RDN
07 STO 20
08 RCL 04
09 STO 23
10 RCL 05
11 XEQ 02
12 RCL 05
13 RCL 06
14 XEQ 01
15 RCL 06
16 XEQ 02
17 7P<>S
18 ST- 08
19 RDN
20 ST- 07
21 RDN
22 ST- 06
23 7P<>S
24 RCL 07
25 STO 23
26 RCL 08
27 XEQ 02
28 RCL 08
29 RCL 09
30 XEQ 01
31 RCL 09
32 XEQ 02
33 7P<>S
34 ST- 08
35 RDN
36 ST- 05
37 RDN
38 ST- 03
39 RCL 00
40 STO 23
41 RCL 01
42 XEQ 02
43 ST- 03
44 RCL 01
45 RCL 02
46 XEQ 01
47 ST- 04
48 RCL 02
49 XEQ 02
50 ST- 06

Almacena
EI AZ
EI Ay
EI Ax

Elimina M_x

Elimina M_y

Elimina M_z

51 RCL 03
52 STO 23
53 RCL 04
54 XEQ 02
55 ST- 06
56 RCL 04
57 RCL 05
58 XEQ 01
59 ST- 07
60 RCL 05
61 XEQ 02
62 ST- 08
63 RCL 07
64 *12
65 RCL 06
66 /
67 ST- 08
68 RCL 21
69 RCL 04
70 RCL 20
71 XEQ 01
72 -
73 STO 21
74 RCL 22
75 RCL 05
76 RCL 20
77 XEQ 01
78 -
79 RCL 07
80 RCL 21
81 +
82 RCL 06
83 /
84 -
85 RCL 08
86 XEQ 03
87 STO 09
88 ST* 07
89 ST* 05
90 RCL 21
91 RCL 07
92 +
93 RCL 06
94 XEQ 03
95 STO 08
96 ST* 04
97 ST* 02
98 RCL 20
99 RCL 05
100 +
101 RCL 04
102 +

Elimina F_x

Elimina F_y

Calcula y Almacena

F_z

Calcula y Almacena

F_y

Calcula y Almacena

F_x

```
103 RCL 03
104 XEQ 03
105 STO 07
106 ST* 01
107 RCL 02
108 RCL 01
109 +
110 RCL 00
111 XEQ 03
112 STO 22
113 7P<>S
114 RCL 07
115 RCL 08
116 RCL 09
117 7P<>S
118 RCL 09
119 *
120 X<>Y
121 RCL 07
122 *
123 +
124 X<>Y
125 XEQ 03
126 STO 21
127 7P<>S
128 RCL 04
129 RCL 05
130 RCL 06
131 7P<>S
132 RCL 09
133 +
134 X<>Y
135 RCL 08
136 *
137 +
138 X<>Y
139 XEQ 03
140 STO 20
141 RTN
142 ♦LBL 01
143 *
144 ♦LBL 00
145 RCL 23
146 ✓
147 RTN
148 ♦LBL 02
149 XT2
150 GTO 00
151 ♦LBL E
152 STO 03
153 RDN
154 STO 02
```

Calcula y Almacena
 M_z

Calcula y Almacena
 M_y

Calcula y Almacena
 M_x

Subrutina

Almacena
 Z_i

155 RDN
 156 STO 01
 157 RDN
 158 5
 159 +
 160 STO 25
 161 RCL 08
 162 RCL 03
 163 *
 164 RCL 09
 165 RCL 02
 166 *
 167 -
 168 RCL 20
 169 +
 170 STO 04
 171 X↑2
 172 STO 00
 173 RCL 09
 174 RCL 01
 175 *
 176 RCL 07
 177 RCL 03
 178 *
 179 -
 180 RCL 21
 181 +
 182 STO 05
 183 X↑2
 184 ST+ 00
 185 RCL 07
 186 RCL 02
 187 *
 188 RCL 08
 189 RCL 01
 190 *
 191 -
 192 RCL 22
 193 +
 194 STO 06
 195 X↑2
 196 ST+ 00
 197 1
 198 RCL 23
 199 X↑2
 200 ST* 00
 201 -
 202 RCL IND
 25
 203 X↑2
 204 *
 205 ST+ 00

Y_i

X_i

3 +

 Calcula y Almacena M_{xi}

$$M_{xi} = M_{x0} + Z_i F_y - Y_i F_z$$

 Almacena M_x^2

Calcula y Almacena M_{yi}

$$M_{yi} = M_{y0} + X_i F_z - Z F_x$$

 Almacena $M_x^2 + M_y^2$

Calcula y Almacena M_{zi}

$$M_{zi} = M_{z0} + Y_i F_x - Z_i F_z$$

 Almacena $M_x^2 + M_y^2 + M_z^2$

Calcula
 $B^2 (M_x^2 + M_y^2 + M_z^2)$

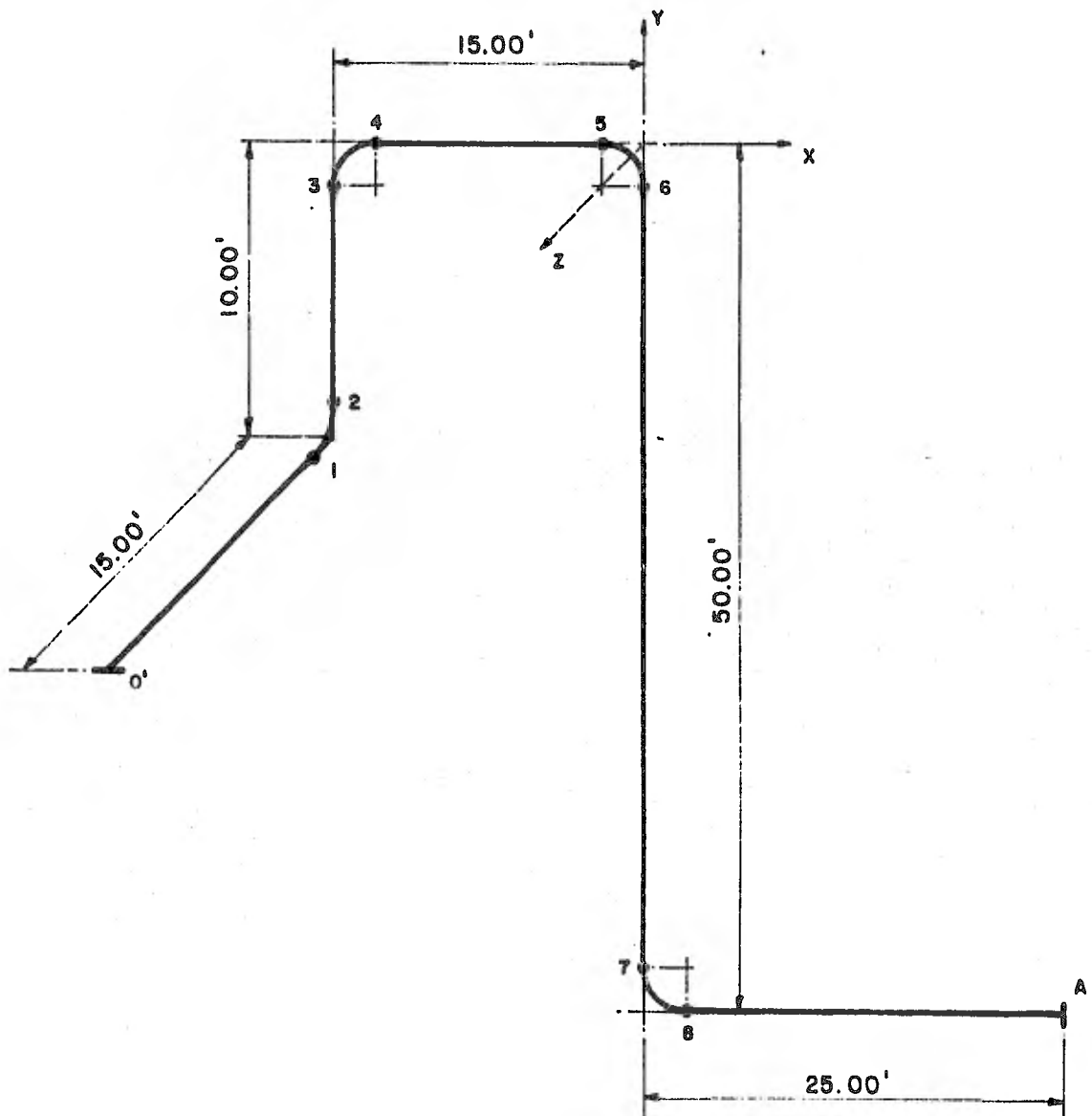
206 RCL 00
207 SQRT
208 RCL 24
209 /
210 12
211 *
212 STO 00
213 7PRREG
214 RTN
215 *LBL C
216 STO 24
217 RTN
218 *LBL B
219 STO 23
220 RTN
221 *LBL 03
222 CHS
223 /
224 RTN
225 GTO 67
226 .END.

Calcula S' E

Almacena Z

Almacena B

Subrutina



"CASO PRUEBA"

4.6 EJEMPLO DE CALCULOS

P A R T E 1

PASO	COMENTARIOS	INGRESE		PANTALLA
1	Coordenadas del punto fijo	- 15.00 - 10.00 15.00	ENT ENT B	- 15.00
2	Factor de flexibilidad y relación de rigidez del primer miembro	1.00 1.00	ENT C	1.00
3	Coordenadas del punto 1	- 15.00 - 10.00 1.25	ENT ENT R/S	- 15.00
4	Repita los pasos 3 y 4 para los demás puntos	8.00 1.11	ENT C	8.00
5		- 15.00 - 8.75 0.00	ENT ENT R/S	- 15.00
6	Punto 3	1.00 1.00	ENT C	1.00
7		- 15.00 - 1.25 0.00	ENT ENT R/S	- 15.00
8	Punto 4	8.00 1.11	ENT C	8.00
9		- 13.75 0.00 0.00	ENT ENT R/S	- 13.75

Paso	Comentarios	Ingreso		Pantalla
10	Punto 5	1.00 1.00	ENT C	1.00
11		- 1.25 0.00 0.00	ENT ENT R/S	- 1.25
12	Punto 6	8.00 1.11	ENT C	8.00
13		- 0.00 1.25 0.00	ENT ENT R/S	0.00
14	Punto 7	1.00 1.00	ENT C	1.00
15		- 0.00 48.75 0.00	ENT ENT R/S	0.00
16	Punto 8	8.00 1.11	ENT C	8.00
17		- 1.25 50.00 0.00	ENT ENT R/S	1.25
18	Factor de flexibilidad y relación de rigidez del último miembro	1.00 1.00	ENT E	1.00
19	Coordenadas del último miembro	25.00 - 50.00 0.00	ENT ENT R/S	25.00

(RCL 04) Axx = 158.95
(RCL 05) Bxy = 121.53
(RCL 06) Bxz = 3515.34
(RCL 07) Ayy = 158.00

Paso	Comentarios	Ingreso	Pantalla
------	-------------	---------	----------

(RCL 08)		Byx = -117.42	
(RCL 09)		Byz = -402.56	
(RCL 10)		Azz = 165.34	
(RCL 11)		Bzx = - 3471.49	
(RCL 12)		Bzy = 525.18	
(RCL 13)		Cxx = 140225.43	
(RCL 14)		Cxy = 11398.38	
(RCL 15)		Cxz = 1761.32	
(RCL 16)		Cyy = 18230.63	
(RCL 17)		Cyz = 1211.21	
(RCL 18)		Czz = 156355.51	

P A R T E II

PASO	COMENTARIOS	INGRESE	PANTALLA
20	Constantes de deformación	6238280 - 6238280 - 2339369	ENT ENT A - 1947.44
21	Módulo de Sección Z	29.90	C 29.90
22	Factor de intensificación de esfuerzos	2.60	B 2.60
23	Notación de la dirección normal de conexión para el punto o'	3.00	ENT
24	Coordenadas del punto o'	- 15.00 - 10.00 15.00	ENT ENT E 14495.28
		(RCL 04) (RCL 05) (RCL 06) (RCL 07) (RCL 08) (RCL 09)	Mx = 13214.04 My = 5775.87 Mz = 6518.37 Fx = - 400.75 Fy = 923.98 Fz = - 5.01
25	Repita el paso 24 para los demás puntos		
	Punto 1	- 15.00 - 10.00 1.25	ENT ENT E
		(RCL 04) (RCL 05) (RCL 06) (RCL 07) (RCL 08) (RCL 09)	Mx = 509.26 My = 265.55 Mz = 6518.37 Fx = - 400.75 Fy = 923.98 Fz = - 5.01
	Punto 2	- 15.00 - 8.75 0.00	ENT ENT E

Paso	Comentarios	Ingrese	Pantalla
		(RCL 04)	Mx = - 639.45
		(RCL 05)	My = - 235.39
		(RCL 06)	Mz = 6017.43
		(RCL 07)	Fx = - 400.75
		(RCL 08)	Fy = 923.98
		(RCL 09)	Fz = - 5.01
Punto 3		(RCL 04)	Mx = 601.84
		(RCL 05)	My = - 235.39
		(RCL 06)	Mz = - 3011.80
		(RCL 07)	Fx = - 400.75
		(RCL 08)	Fy = 923.98
		(RCL 09)	Fz = - 5.01
Punto 4		(RCL 04)	Mx = - 595.57
		(RCL 05)	My = - 241.66
		(RCL 06)	Mz = 1355.88
		(RCL 07)	Fx = - 400.75
		(RCL 08)	Fy = 923.98
		(RCL 09)	Fz = - 5.01
Punto 5		(RCL 04)	Mx = - 595.57
		(RCL 05)	My = - 304.34
		(RCL 06)	Mz = - 10193.92
		(RCL 07)	Fx = - 400.75
		(RCL 08)	Fy = 923.98
		(RCL 09)	Fz = - 5.01
Punto 6		(RCL 04)	Mz = - 601.84
		(RCL 05)	My = - 310.61
		(RCL 06)	Mz = - 10847.96
		(RCL 07)	Fx = - 400.75
		(RCL 08)	Fy = 923.98
		(RCL 09)	Fz = - 5.01
Punto 7		(RCL 04)	Mz = - 840.03
		(RCL 05)	My = - 310.61
		(RCL 06)	Mz = 8187.70
		(RCL 07)	Fx = - 400.75
		(RCL 08)	Fy = 923.98
		(RCL 09)	Fz = - 5.01
Punto 8		(RCL 04)	Mz = - 846.30
		(RCL 05)	My = - 316.88

Paso	Comentarios	Ingrese	Pantalla
		(RCL 06)	Mz = 7533.65
		(RCL 07)	Fx = -400.75
		(RCL 08)	Fy = 923.98
		(RCL 09)	Fz = -5.01
	Punto "A"	(RCL 04)	Mx = -843.30
		(RCL 05)	My = -435.97
		(RCL 06)	Mz = -14410.97
		(RCL 07)	Fx = -400.75
		(RCL 08)	Fy = 923.98
		(RCL 09)	Fz = -5.01

VI. BIBLIOGRAFIA.

THE M. W. KELLOG COMPANY. - "Design of Piping Systems"
2a. Edición John Wiley & Sons., Inc., New York 1956.

TUBE TURNS. - "Piping Engineering", Monogramas preparados por
Tube Turns Division of Chemetron Corp., Louisville, Ky.

CENTRO DE EDUCACION CONTINUA. - (Varios Autores)
"Análisis y Diseño de Sistemas de Tuberías de Plantas Industriales."
U. N. A. M. México (1980)

I. T. T. GRINNELL INDUSTRIAL PIPING, INC. - "Piping Design &
Engineering" Company, Edition 5 ed.; (1969)

REFERENCIAS.

1. D. B. ROSSHEIM and A. R. C. MARKL. "The significance of and Suggested Limits for, the Stress in Pipe Lines due to the Combined Effects of Pressure and Expansion".
Trans. A. S. M. E. , Vol. 62, No. 5 (1940).
2. A. BANTLIN. "Formänderung und Beanspruchung federnder Ausgleichrohre; Z. , V. D. I. , Vol. 54, pp. 43 - 49 (1910).
3. Th. Von KARMAN. "Über die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federnder Ausgleichrohre;" Z. , V. D. I. Vol. 55, pp. 1889 - 1895 (1911).
4. H. LORENZ. "Die Biegung gekrümmter Rohre", Z. Physik Vol. 13 pp 768 - 774 (1912).
5. M. MARBEC. "Flexibilité des tubes". Bulletin de l'Association Technique Maritime, Vol. 22 pp. 441-457 (1911).
6. H. KARL, "Biegung gekrümmter, dünnwandiger Rohre," Z. Angew, Math Mech. , Vol. 23 pp. 331 - 345 (1943).
7. I. VIGNESS. "Elastic Properties of Curved Tubes"
Trans. A. S. M. Vol. 65, pp. 105 - 120 (1943).
8. L. BESKIN, "Bending of Curved Thin Tubes". J. Applied mechanics, Vol. 12, pp. 1 - 7 (1945).
9. R. A. CLARK and E. REISSNER. "Bending of Curved Tubes",
Advances in Applied Mechanics, Vol. 2, pp. 93 - 122, Academic Press, Inc. , 1951 .
10. A. M. WAHL. "Stresses and reactions in Expansion Pipe Bends"
Trans. A. S. M. E. , Vol. 50 pp. 241-255 (1928).

V. CONCLUSIONES.

El Análisis Estructural de Sistemas de Tubería, juega un papel muy importante en el diseño de plantas.

El país necesita cada vez más de personal calificado debido a su desarrollo, y para lograr este objetivo se requiere recursos económicos y personal con amplios conocimientos como para efectuar el diseño y construcción que además, operen y mantengan a la industria que esta nación requiere.

Por tal razón, no debemos carecer de técnicas especiales para resolver problemas tan específicos como el análisis de flexibilidad de tuberías.

Nadie dudaría de la necesidad del análisis del diseño de una estructura de acero o de concreto, sin embargo, con demasiada frecuencia las condiciones existentes en una tubería de alta temperatura son más críticas que una estructura que soporta. Las consecuencias de las fallas mecánicas pueden ser aún más severas.

Una mínima parte de las firmas de ingeniería de México cuenta con los recursos económicos para la adquisición de programas y computadoras que simplifiquen el cálculo de flexibilidad y por otro lado, las firmas de computación que proporcionan este servicio, carecen de apoyo técnico para la correcta interpretación de resultados.

El propósito de este trabajo es señalar los aspectos más importantes de una etapa necesaria en el diseño de sistemas de tuberías, que

es la determinación de las fuerzas originadas por efecto de la expansión térmica.

El método aquí presentado puede resolver un buen número de problemas y ayudará en gran parte el cálculo manual.

La variación de exactitud entre este método y otras formas de cálculo por computadora no son mayores al diez por ciento.

Considero que he logrado, o cuando menos espero haberlo hecho, ya que la forma en que está presentado este método ayudará a ahorrar un buen tiempo al analista de esfuerzos en tuberías, muchas veces desperdiciado.