

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA DILATACIÓN
TÉRMICA EN TUBERIAS MEDIANTE
SIMULACIÓN NUMERICA**

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

Martín Javier Vásquez Ponce

ASESOR: Dr. Quino Martín Valverde Guzmán



**A mis padres Liliana y Efrain
que su apoyo incondicional.
A mi hermana Liliana por
siempre empujarme a ser
mejor.**

RESUMEN

Esta tesis establece un procedimiento de análisis de las tensiones generadas por la dilatación térmica en tres arreglos de tuberías: una tubería simple enterrada, una tubería con un cambio de dirección de 90° y una tubería enterrada con un cambio de dirección de 90°.

Para darle solución a cada uno de los casos se analizan los esfuerzos térmicos por dos vías diferentes: la simulación numérica mediante el programa ANSYS y por teorías de resistencia de materiales. El planteamiento de estos dos métodos da la ventaja de corroborar los valores obtenidos verificando que sean similares entre sí y a la vez analizar los comportamientos complejos de ciertos parámetros en la tubería.

Para plantear el análisis por resistencia de materiales se explica los siguientes conceptos: dilatación térmica, esfuerzo térmico, longitud virtual entre apoyos, modelo analítico del terreno, flexión en vigas, vigas sobre fundación elástica y teorías de falla. Junto con los conocimientos anteriores es posible, para cada caso, simplificar el modelo teórico y así obtener valores de tensión crítica por medio del procedimiento realizado con los conceptos estudiados.

Luego se plantea el estudio por simulación numérica usando modelos lineales para las tuberías y de resortes para el terreno. Se confirma la validez de la simulación como método de análisis al contrastar valores con el planteamiento teórico y obtener porcentajes de similitud del grado del 83 – 98 %.

Además es posible analizar con mayor profundidad cada caso ya que la simulación da las herramientas suficientes para ver el comportamiento de la dilatación y fuerza a lo largo de la tubería y obtener los esfuerzos máximos (que varían de 35 a 166 MPa según el arreglo de tubería) para realizar un análisis de fallas.

ÍNDICE

RESUMEN

LISTA DE VARIABLES

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS 4

1.1.. Dilatación térmica 4

1.2.. Esfuerzo térmico 5

1.2.1. Fuerza axial en una tubería 6

1.3. Longitud virtual entre apoyos 7

1.4. Representación analítica de terreno mediante resortes inelásticos 9

1.4.1. Resorte axial 9

1.4.2. Resorte lateral 14

1.4.3. Resorte vertical 16

1.4.3.1. Carga superior 17

1.4.3.2. Carga inferior 18

1.5. Flexión en vigas 20

1.6. Viga sobre fundación elástica 21

1.7. Teoría de la máxima energía de distorsión 23

1.8. Cálculo en tuberías en forma de L según ASHRAE 23

CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS TEÓRICO 26

2.1. Caso 1: Método de cálculo de la dilatación en una tubería enterrada 26

2.1.1. Esfuerzo térmico 26

2.1.2. Fuerzas generadas por el terreno 27

2.1.2.1. Resorte axial 27

2.1.2.2. Resorte lateral 29

2.1.2.3. Resorte vertical 33

2.1.3. Longitud virtual entre apoyos	35
2.2. Caso 2: Método de cálculo para una tubería con cambio de dirección.....	35
2.2.1. Elongación del tramo AB.....	39
2.2.2. Flexión en el tramo BC.....	39
2.2.3. Estado de esfuerzo y longitud BC	40
2.3. Caso 3: Método de cálculo para una tubería enterrada con cambio de dirección ..	41
2.3.1. Elongación del punto B	46
2.3.2. Constante de elasticidad del terreno y factor β	47
2.3.3. Fuerza Q, momento crítico y dilatación	47
CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	51
3.1. Conceptos para el análisis	54
3.2. Procedimiento para el análisis mediante ANSYS.....	54
3.2.1 Caso 1: Simulación de una tubería enterrada	54
3.2.1.1. Enunciado del problema.....	54
3.2.1.2. Resultados del cálculo analítico.....	55
3.2.1.3. Modelación de la tubería	55
3.2.1.4. Modelación del terreno	59
3.2.1.5. Condiciones térmicas	62
3.2.2. Caso 2: Modelación de una tubería con cambio de dirección.....	63
3.2.2.1. Enunciado del problema.....	63
3.2.2.2. Resultados del cálculo analítico.....	64
3.2.2.3. Modelación de la tubería y las condiciones térmicas	64
3.2.3. Caso 3: Modelación de una tubería enterrada con cambio de dirección	66
3.2.3.1. Enunciado del problema.....	67
3.2.3.2. Resultados del cálculo analítico.....	67
3.2.3.3. Modelación de la tubería, resortes y las condiciones térmicas	68
3.3. Comparación de resultados	71
3.3.1 Caso 1: Dilatación térmica en una tubería enterrada	72

3.3.2. Caso 2: Dilatación térmica en tuberías con cambio de dirección.....	75
3.3.3. Caso 3: Dilatación térmica en tuberías en L enterradas.....	79
3.3.3.1. Longitud de 35 metros.....	79
3.3.3.2. Longitud de 70 metros.....	81
3.3.3.3. Longitud de 100 metros.....	83
3.3.3.4. Factor de corrección de las tres longitudes	84
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
CONCLUSIONES	90
BIBLIOGRAFÍA.....	94



LISTA DE VARIABLES

- = Longitud, m
- = Dilatación en la longitud, m
- = Coeficiente de dilatación térmica. $1/$
- = Diferencial de temperatura, $^{\circ}C$
- = Esfuerzo térmico lineal, Pa
- = Modulo de elasticidad, Pa
- = Fuerza axial en el elemento, N
- = Área transversal del elemento, m
- = Fuerza axial en el apoyo del tubo, N
- = Diámetro exterior de la tubería, m
- t = Espesor de la tubería, m
- = Longitud virtual entre apoyos, m
- = Fuerza axial generada por el terreno, $N/$
- = Fuerza del resorte axial, $N/$
- = Cohesión del terreno, kPa
- = Distancia de entierro desde el centro del tubo,
- \bar{y} = Peso específico del suelo, $N/$
- = Factor de adhesión
- = Ángulo de interface entre tubo y terreno = f

- ϕ = Ángulo interno de fricción del suelo
- f = Factor de fricción del tubo
- K_0 = Coeficiente de presión del suelo en reposo.
- P_u = Fuerza lateral del terreno, N/m
- N_{ch} = Factor de capacidad de carga horizontal de arcilla
- N_{qh} = Factor de capacidad de carga horizontal de arena
- N_{cv} = Factor vertical superior de arcilla
- N_{qv} = Factor vertical superior de arena
- γ = peso efectivo total, N/m^3
- γ = Dilatación en el tramo AB, m
- P = Fuerza generada por el desplazamiento del punto B, N
- l_{BC} = Longitud del tramo BV, m
- D_e = Diámetro exterior del tubo, m
- D_i = Diámetro interior del tubo, m
- M_c = Momento en el punto C, Nm
- σ_c = Esfuerzo de flexión en C, Pa
- τ_c = Esfuerzo cortante en C, Pa
- σ_{eq} = Esfuerzo equivalente en C, Pa
- σ_F = Esfuerzo de fluencia de la tubería, Pa
- FS = Factor de seguridad, Pa

Q = Fuerza generada por dilatación en B para la condición de entierro, N

β = Constante de la ecuación para medio elástico, m^{-1}

K = Constante elástica del medio elástico, N/m^3

M_0 = Momento Inicial en B para la condición de entierro, Nm

σ_e = Esfuerzo en el tramo BC enterrado, Pa



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la instalación de tuberías se ha incrementado en el Perú por la gran demanda que existe de diversos recursos energéticos como el gas natural o el petróleo. Debido a este boom del país por desarrollar proyectos energéticos de gran escala, es de suma importancia realizar estudios relacionados al tema de tuberías.

Proyectos nacionales, como la explotación de los yacimientos del gas de Camisea en Cuzco o el Gaseoducto Sur Peruano, sirven como ejemplo para demostrar la evolución que tiene el uso de las tuberías en el país. Por ello, la necesidad de contar con información completa para el diseño de ciertas instalaciones es vital para el desarrollo de estos proyectos.

Si los centros de operación se ubican en parajes con climas y temperaturas fluctuantes es probable que sus instalaciones de tuberías encargadas de contener y dirigir fluidos sufran efectos de dilatación o cargas térmicas.

Cuando se recurre a las normas internacionales, se observa que estas tocan el tema de la dilatación térmica de manera superficial, por lo que en casos complejos como la condición de entierro o cuando ocurren simultáneamente diferentes efectos, no se tiene las herramientas necesarias para obtener un análisis completo de las tensiones.

Por esto la presente tesis está dirigida a presentar un planteamiento de un procedimiento para el estudio del comportamiento de una tubería cuando está sometida a dilataciones térmicas en tres diferentes casos de estudio: cuando se encuentra una tubería simple completamente enterrada, cuando se tiene un cambio de dirección de 90° en el tubo, y un tercer caso de esta misma tubería con cambio de dirección pero enterrada. Este análisis se limita a analizar solo el efecto de la temperatura, sin tomar en cuenta las cargas externas al terreno o de presión interna del tubo

Este estudio se realiza mediante un método analítico con conceptos de resistencias de materiales y también con ayuda del *software* de análisis estructural-térmico ANSYS. Luego de realizar los dos tipos de análisis se comparan los valores de ciertos efectos como cargas, esfuerzos o dilataciones.

Con la comparación de ambos métodos se busca contrastar el modelo de simulación y verificar si se tienen resultados físicamente posibles y consistentes con los valores obtenidos del estudio analítico. Además, se procede a mostrar algunos comportamientos de ciertos efectos físicos mediante mapas de cargas o esfuerzos para entender con mayor profundidad el fenómeno estudiado.

Conociendo todo esto, se plantea los siguientes objetivos:

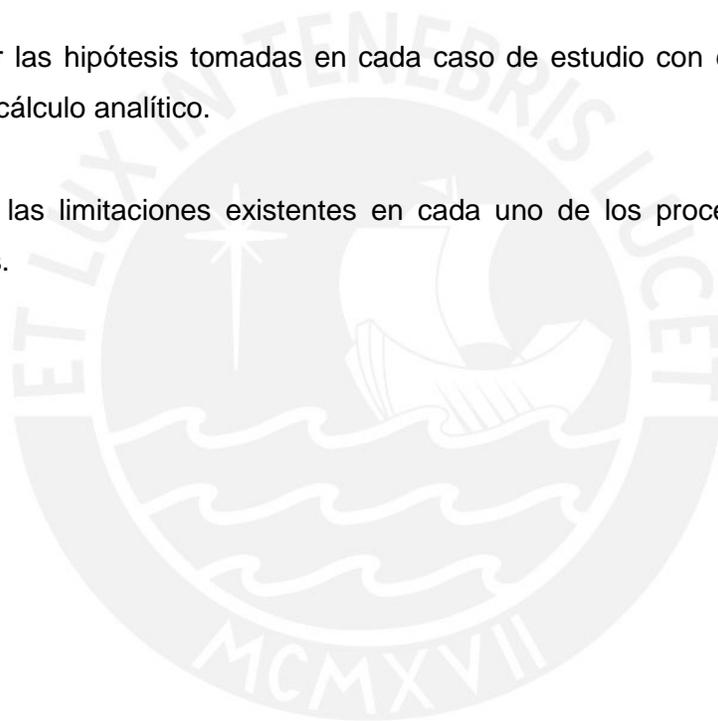
Objetivo general:

Proponer un procedimiento de análisis de tensiones térmicas por efecto de la dilatación térmica mediante principios de resistencia de materiales y simulación numérica para el caso de una tubería simple enterrada, una tubería en L en la superficie, y una tubería en L enterrada.

Objetivos específicos:

- Calcular mediante principios de resistencia de materiales las tensiones térmicas ocasionadas por la dilatación térmica en una tubería según el caso de estudio.
- Plantear un modelo del arreglo de tubería y su entorno en el *software* de simulación ANSYS para representar de forma real el comportamiento mecánico del sistema según el caso de estudio.
- Representar en el *software* de simulación numérica los efectos de la dilatación térmica en una tubería de gas y de las condiciones externas de caso de estudio para aproximarse al caso real.

- Contrastar los procedimientos analíticos utilizando los resultados de la simulación por el *software* ANSYS y, según sea el caso, los resultados del cálculo propuesto por una norma internacional.
- Analizar el comportamiento de las fuerzas generadas por el terreno y por la dilatación térmica a lo largo de la longitud de una tubería de gas en cada uno de los casos estudiados.
- Comprobar las hipótesis tomadas en cada caso de estudio con el fin de simplificar y obtener el cálculo analítico.
- Mencionar las limitaciones existentes en cada uno de los procedimientos analíticos propuestos.



CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Dilatación térmica

Cuando existe una variación en la temperatura de un elemento sólido este suele cambiar de volumen como respuesta. A este fenómeno se denomina expansión térmica.

Si una sustancia se calienta, sus partículas comienzan a moverse ocasionando que la separación entre ellas se incremente y por consecuencia que el elemento se expanda. Lo contrario ocurre cuando la temperatura disminuye: la sustancia se contrae debido a que la separación entre sus partículas se acorta.

Para obtener una ecuación con la que se cuantifique dicha expansión en un cuerpo se necesita un coeficiente que describa la longitud de expansión por cada grado de cambio de temperatura. Este factor varía según sea el material. Cuando un cuerpo se dilata, lo hace en todas las direcciones; sin embargo, si la expansión en un sentido es despreciable por su magnitud se puede establecer que solo hay dilatación en un área o en una dirección lineal, según sea el caso.

De acuerdo a lo anterior, puede establecerse la siguiente fórmula para el cálculo de la expansión lineal, considerando la presión constante y material isotrópico.

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T \quad (1.1)$$

1.2. Esfuerzo térmico

Como se explicó anteriormente, un elemento sometido a un cambio de temperatura va a tender a expandirse, si es que está contenido en las direcciones de expansión entonces la restricción de movimiento ocasionará los llamados esfuerzos térmicos. Para saber la magnitud de este esfuerzo, se puede usar la teoría de desplazamientos en elementos hiperestáticos en el siguiente ejemplo (véase la Figura 1.1).

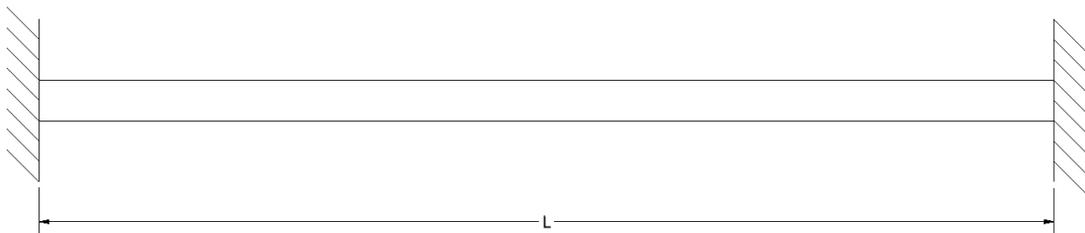


Figura 1.1. Elemento sometido a esfuerzos térmicos.

Entonces, como no hay expansión en toda la longitud del elemento, se puede afirmar que la expansión térmica es contenida por la fuerza ejercida por la pared. Por compatibilidad y usando la Ley de Hooke, se puede deducir lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 0 &= \delta_{\text{Termico}} - \delta_{\text{Hooke}} \\
 0 &= \alpha \Delta T L - \frac{FL}{AE} \\
 \frac{F}{A} &= \sigma_T = \alpha \Delta T E
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

En el caso del estudio de las tuberías enterradas, se tomará el valor del esfuerzo térmico de la ecuación 1.2 como dicta la norma B31.8 de la American Society of Mechanical Engineers (2003) para estimar aproximadamente las cargas, ya que en la realidad existirá una pequeña expansión en el tubo. Además, se debe tener una tubería con una longitud lo suficientemente larga para que su posible movimiento esté 'restringido'. Este último concepto se explicará más adelante con mayor detalle.

1.2.1. Fuerza axial en la tubería

Con el esfuerzo térmico ya establecido puede hallarse la fuerza teórica necesaria para que un apoyo en la tubería soporte la fuerza de dilatación e impida el movimiento longitudinal del elemento. Esta se le denominará fuerza axial, y es posible deducirla de ecuaciones anteriores.

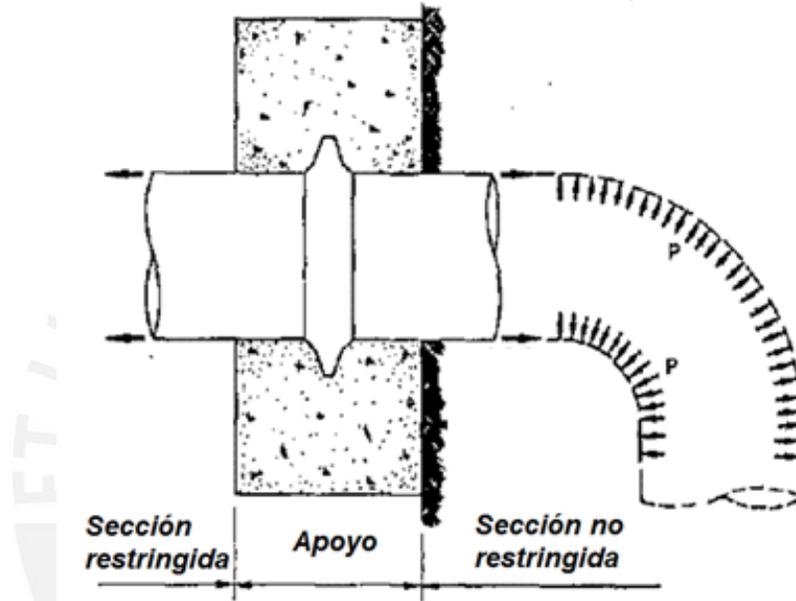


Figura 1.2. Esquema de un apoyo en una tubería enterrada
Fuente: Peng (1978).

En la Figura 1.2 se muestra el apoyo real de una instalación de tuberías así como su lado restringido por la fricción del terreno. En este cálculo se considerará la sección del tubo como el producto del perímetro con el espesor.

$$\frac{F_a}{A} = \alpha \Delta T E \quad \wedge \quad A = Dt$$

$$F_a = \pi D t \alpha \Delta T E \quad (1.3)$$

1.3. Longitud virtual entre apoyos

La fricción en el tubo está en función de la longitud, a mayor sea el largo mayor área de fricción. Existe una cierta longitud, para cada tipo de terreno y tubería, donde la fuerza de

fricción disponible es la suficiente para impedir la expansión de la tubería. Si el tubo es de menor longitud a la longitud virtual entre apoyos entonces se expandirá total o parcialmente, en cambio si la longitud es igual o mayor entonces la tubería no se expandiría y se comportaría como un tubo con dos apoyos en los extremos.

Para el análisis, esta distancia es importante al ser la condición necesaria para aplicar las fórmulas de esfuerzos térmicos estáticos. Como ya se dijo, si el tramo de tubería es menor a la longitud virtual entre apoyos entonces la fuerza axial del terreno no podrá contener la dilatación. Esto ocasionará que la tubería se expanda y no se produzca ningún esfuerzo, haciendo que el análisis de falla no sea necesario.

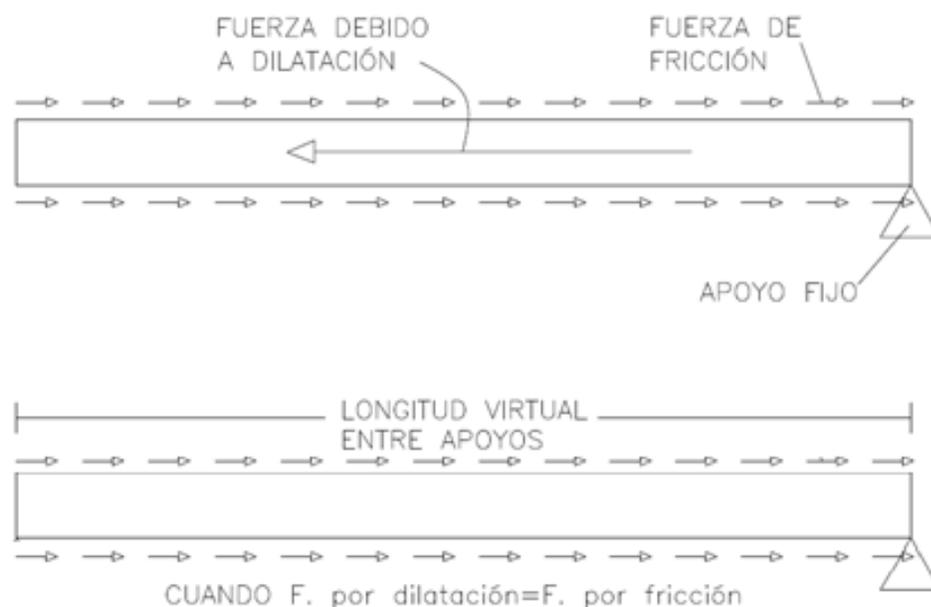


Figura 1.3. Consideraciones de la longitud virtual entre apoyos.

Hay que notar que este parámetro es solo una aproximación debido a que la fuerza de fricción no es constante a lo largo de la tubería. Esto es debido a que la dilatación de la tubería es mucho mayor en el extremo sin un apoyo físico, e irá disminuyendo en la medida que se acerque al otro extremo. La fricción producida contrarrestará la dilatación de modo proporcional, por lo que habrá una mayor fuerza axial en cuanto más lejos se

esté del apoyo fijo. No obstante ello, también es necesario considerar otro factor en el procedimiento, mediante la simulación numérica. Esto debido a que el modelo de aproximación del comportamiento del terreno también tiene limitaciones.

En la Figura 1.3 se visualiza el apoyo fijo de la tubería y la fuerza axial generada por el terreno en función de la longitud del tubo. Por ahora, se establecerá t_u como la carga axial del terreno entre la longitud total de la tubería. Considerando esto, se obtiene la fórmula 1.4.

$$\begin{aligned}t_u L_v &= F_a \\L_v &= \frac{F_a}{t_u}\end{aligned}\tag{1.4}$$

Sin embargo, se recomienda incrementar los valores obtenidos de la ecuación 1.4 al doble o más si se desea tener una mayor seguridad en el cálculo debido a que lo planteado solo es una aproximación. En la simulación se deberá iniciar la simulación con el valor obtenido y luego ir incrementando la longitud con el fin de obtener un valor de esfuerzo en el tubo convergente. Este es un método más exacto de tener la longitud virtual entre apoyos.

1.4. Representación analítica del terreno mediante resortes inelásticos

Este tipo de modelo propone una forma de representar la interacción entre los dos elementos analizados en la presente tesis. Para esta aproximación, las consideraciones fueron suponer al tubo como una viga elástica lineal con una longitud igual o mayor a la longitud virtual entre apoyo –suelo modelado como resortes no lineales en las direcciones x , y y z , con un comportamiento deformable–, y material y propiedades uniformes del terreno en toda la longitud enterrada.

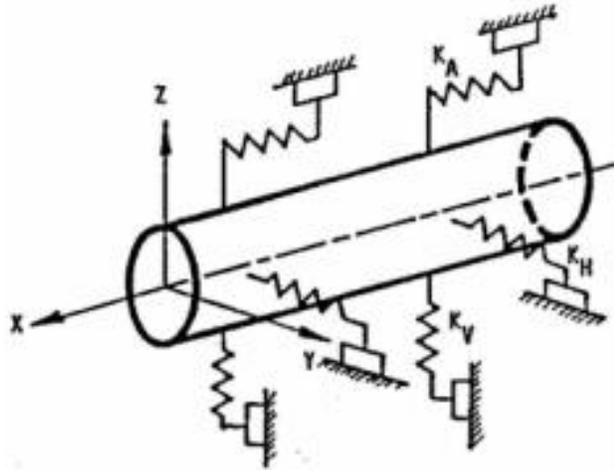


Figura 1.4. Modelamiento del terreno mediante resortes.
Fuente: Gantes, Bouckovalas y Koumouis (2008).

1.4.1. Resorte axial

Las propiedades de este tipo de resortes se estiman mediante dos efectos presentes en el terreno.

El primer efecto se da por la cohesión y adhesión del terreno. Esto se refiere a la capacidad de las partículas del suelo, con el que se rellenó y rodeó la tubería, de permanecer junto a la tubería debido a los puntos de contacto entre materiales. El efecto se va a presentar en el coeficiente de cohesión, que variará según el tipo de terreno. En general, se tendrá mayor cohesión cuanto más finas sean las partículas del suelo.

El segundo factor corresponde a la fuerza de fricción originada entre el suelo y la tubería. Debido a la complejidad para representar la fricción por la distinta distribución de presiones alrededor de la curvatura de la tubería, se toma formas aproximadas para obtener un número. De acuerdo con Peng (1978), es posible aproximar esta fuerza asumiendo que el peso del terreno es la normal que actúa en el tubo, y que con un coeficiente de fricción es posible obtener la carga que se presenta axialmente en la tubería.

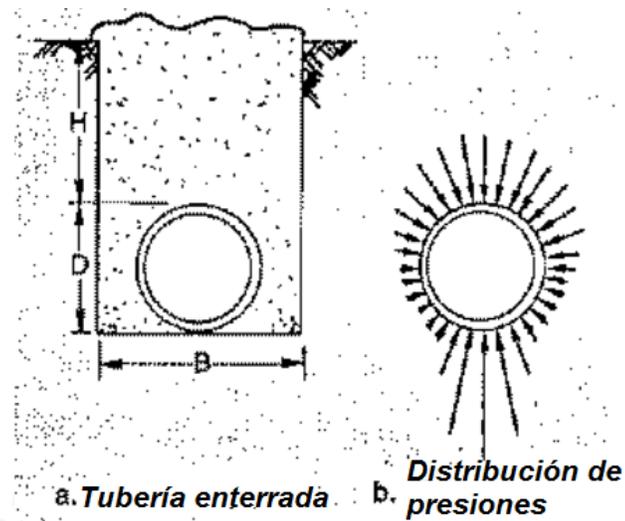


Figura 1.5. Distribución de presiones reales en una tubería para hallar una fuerza normal.
Fuente: Peng (1978).

Comparando lo calculado por Peng con la información de ASCE se ve que el manual considera más variables, como un coeficiente de presión del terreno, obtenido en forma experimental; y el peso específico del suelo. Para determinar la fricción, además del coeficiente de rozamiento, también se usó el ángulo interno de fricción.

Es por esto que se plantea la solución con las fórmulas del código. La siguiente ecuación contiene los dos efectos antes explicados. Se debe notar que la fuerza t_u es newton sobre metros de la tubería.

$$t_u = \pi D \alpha c + \pi D H \bar{y} \frac{(1 + K_0)}{2} \tan \delta \quad (1.5)$$

Donde el valor de la cohesión α se calcula con la ecuación 2.6 considerando e en $\text{kPa}/100$.

$$\alpha = 0.608 - 0.123e - \frac{0.274}{e^2 + 1} + \frac{0.695}{e^3 + 1} \quad (1.6)$$

Para el valor de K_0 es posible usar la fórmula 2.7 llamada fórmula de Jaky o puede ser tomado de la tabla 1.2

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (1.7)$$

Valores del factor de fricción según el material en contacto con el terreno y valores de K_0 según el suelo:

Tabla 1.1. Factor de fricción de la tubería. (ASCE)

Revestimiento de la tubería	f
Concreto	1
Alquitrán de hulla	0.9
Acero rugoso	0.8
Acero liso	0.7
Resina epoxica	0.6
Polietileno	0.6

Tabla 1.2. Coeficiente de presión del suelo en reposo según el tipo. (ASCE)

Tipo de suelo	K_0
Suelo suelto	0.5 - 0.6
Suelo denso	0.3 - 0.5
Arcilla seca	0.5 - 0.6
Arcilla húmeda	0.8 - 1.1
Suelo sobre-compactado	1.0 - 1.3

Para tener una idea de ciertos valores que se van a usar en el cálculo de la fuerza se puede usar las siguientes tablas que muestran datos a usar según algunas características del terreno.

Tabla 1.3. Cohesión según la consistencia del terreno. (NAVFAC)

Penetración SPT (golpe/pie)	Consistencia estimada	Cohesión (kPa)
0 - 2	Muy blando	0 - 24
2 - 4	Blando	24-48
4 - 8	Medio	48-96
8 - 16	Compacto	96-192
16 - 32	Muy compacto	192-383
>32	Sobre-compactado	>383

Tabla 1.4. Ángulo de fricción según el tipo de suelo. (NAVFAC)

Tipo de suelo	Ángulo de fricción interna ϕ	Peso específico (kg/m ³)
Arena suelta	27.5° - 30°	1700
Arena semi-compactada	30° - 32.5°	1800
Arena compacta	35°	1900
Grava	37.5°	1700
Grava arenosa	35*	1900
Arcilla blanda	17.5°	1700
Arcilla media	20°	1800
Arcilla arenosa firme	25°	1900
Marga arenosa firme	30°	2200
Limo blando	22.5°	1800
Limo	25°	1900
Limo compacto	27.5°	2000

Se ha comprobado que el comportamiento de este resorte es diferente a uno lineal. La fuerza incrementa de acuerdo al desplazamiento hasta un valor máximo, a partir de esa distancia la carga se vuelve constante y no incrementa más. Para saber la deformación

necesaria para llegar a esta fuerza constante se usó experimentos y se llegó a un cuadro el cual nos indica la distancia de acuerdo con el tipo de suelo a analizar. En la figura 1.6 se presentan dos curvas, la de líneas seguidas corresponde al comportamiento real y la de línea punteadas corresponde al modelo aproximado. Para los cálculos y simulación se usará la curva punteada.

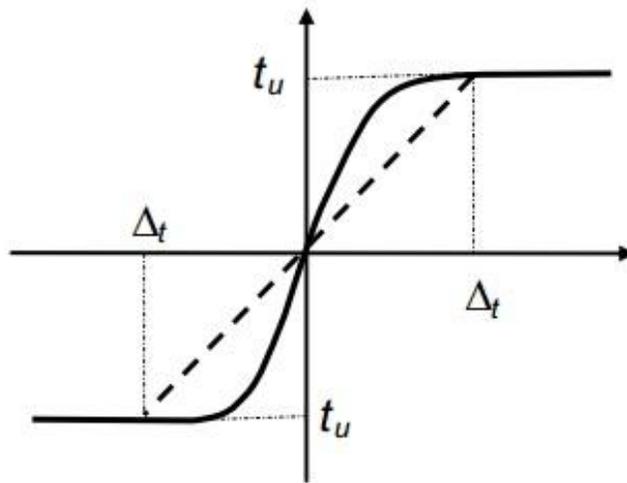


Figura 1.6. Comportamiento real del resorte axial. (ASCE)

Tabla 1.5. Desplazamiento para fuerza máxima en el resorte axial. (ASCE)

Tipo de suelo	Desplazamiento Δt_u (mm)
Arena compacta	3
Arena suelta	5
Arcilla firme	8
Arcilla blanda	10

1.4.2. Resorte lateral:

Este tipo de resorte considera principalmente la resistencia y presión que ejerce el terreno sobre la tubería. Solo responde con alguna fuerza si es que la tubería se mueve

lateralmente. Para su cálculo se consideran las propiedades del terreno entero del lugar más no del terreno con el que se cubrió el tubo.

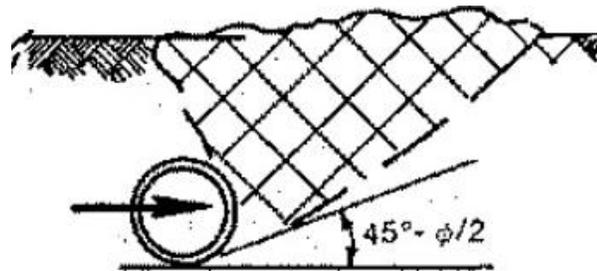


Figura 1.7. Representación gráfica de la fuerza lateral del suelo. (Peng. L- 1978)

El autor Peng establece una relación con la que se puede obtener la fuerza lateral por medidas geométricas sin embargo para esta tesis se modelará con la ecuación enunciada en el manual ASCE. Esta ecuación tiene dos componentes que corresponde a distintas propiedades del terreno. Una parte de la ecuación contiene la capacidad de carga debido a la cohesión del terreno, la otra componente es la capacidad de carga normal debido al peso o presión del suelo. En esta fórmula usa factores de carga horizontales por cohesión, uno llamado factor de arcilla y el otro factor general. La obtención de estos factores se realiza mediante fórmulas obtenidas empíricamente y tienen cierta dependencia del ángulo interno de fricción.

$$P_u = N_{ch}cD + N_{qh}\bar{\gamma}HD \quad (1.8)$$

El factor de capacidad de carga horizontal de arcilla N_{ch} tiene la condición especial de tener valor nulo cuando la cohesión es cero, el factor de capacidad de carga horizontal de arena N_{qh} por el contrario tiene la condición de ser cero cuando el ángulo interno de fricción es cero.

Si es que las condiciones explicadas anteriormente no se cumplen entonces se usan las siguientes as fórmulas para obtener los factores de carga son:

$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x + 1)^2} + \frac{d}{(x + 1)^3} \leq 9 \quad (1.9)$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (1.10)$$

El valor de x es la relación H/D, los valores de a, b, c, d y e se obtienen empíricamente, el manual ASCE nos da estos datos mediante la siguiente tabla:

Tabla 1.6. Tabla de valores para los factores de carga. (ASCE)

Factor	ϕ	a	b	c	d	e
Nch	-	6.752	0.065	-11.063	7.119	-
Nqh	20°	2.399	0.439	-0.03	1.059E-03	-1.754E-05
	25°	3.332	0.839	-0.09	5.606E-03	-1.319E-04
	30°	4.565	1.234	-0.089	4.275E-03	-9.159E-05
	35°	6.816	2.019	-0.146	7.651E-03	-1.683E-04
	40°	10.959	1.783	0.045	-5.425E-03	-1.153E-04
	45°	17.658	3.309	0.048	-6.443E-03	-1.299E-04

En el caso de tener ángulos intermedios entre 20° y 45° se puede interpolar.

De la misma manera que los resortes axiales el comportamiento de este elemento es de ir incrementando hasta el valor máximo P_u , en este caso el desplazamiento en donde se tendrá esta carga máxima no es obtenida por tabla si no mediante una fórmula que usa el diámetro exterior de la tubería y la altura de entierro que se tiene en el caso.

$$\Delta p = 0.04 \left(H + \frac{D}{2} \right) \quad (1.11)$$

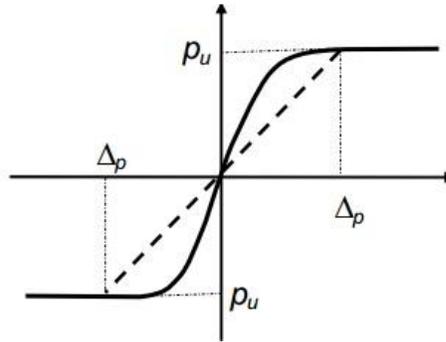


Figura 1.8. Comportamiento real del resorte lateral. (ASCE)

1.4.3. Resorte vertical

En la dirección vertical se tiene un resorte que representa la fuerza ejercida por el terreno cuando se deforma la tubería hacia arriba o abajo y que variará de resistencia según sea el caso. A diferencia del resorte horizontal la magnitud de la fuerza depende de la dirección debida que por encima del tubo se tiene que vencer una menor presión dependiente de la altura de entierro mientras que por debajo se tiene una distribución diferente del terreno que interactúa con la tubería enterrada. Eso por estas razones que para cada caso se tiene desplazamientos y fórmulas distintas, considerando distintos efectos y propiedades del suelo, obtenidas principalmente por medio de experimentos hechas en laboratorio y aproximaciones con modelos teóricos.

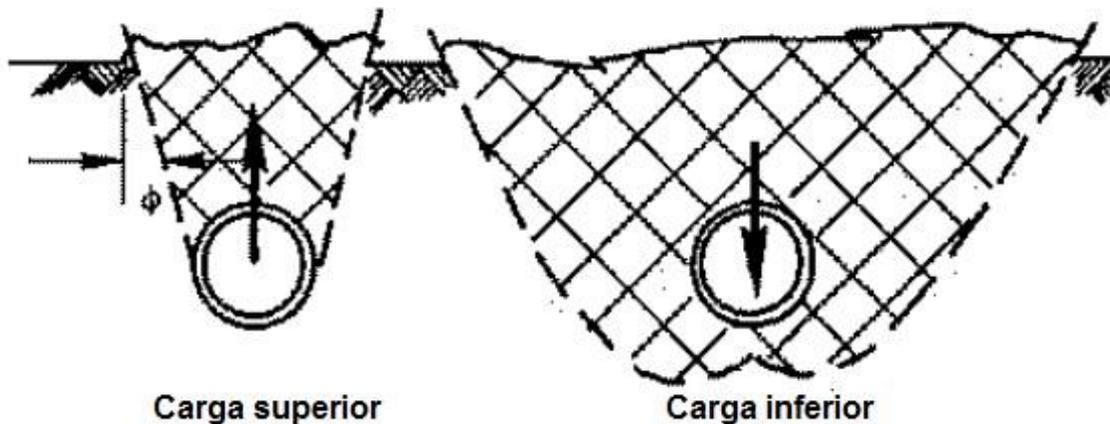


Figura 1.9. Representación gráfica de las cargas (Adaptado de Peng. L- 1978)

1.4.3.1. Carga superior

La máxima resistencia que se da en la parte superior del tubo dependerá mucho de la altura en la que se entierro la tubería. El uso de esta fórmula está restringido a distancias de entierro relativamente cortas, para saber si se está en el rango necesario se usa la relación altura de entierro y diámetro H/D la cual debe ser menor o igual a 10. En el caso que se supere este ratio es necesario hacer un análisis para el caso específico con estudios geotécnicos para saber la magnitud de la fuerza del resorte y el desplazamiento necesario para la fuerza máxima.

Los componentes de la carga son parecidas a los del resorte horizontal, una referida a la cohesión y otra a la presión. En este caso se usa coeficientes que usan medidas geométricas para su cálculo.

$$Q_u = N_{cv}\epsilon D + N_{qv}\bar{\gamma}HD \quad (1.12)$$

De la misma forma que con el resorte lateral se tiene que el factor vertical superior de arcilla N_{cv} tiene la condición especial de tener valor nulo cuando la cohesión es cero mientras que el factor vertical superior de arena N_{qv} tiene el valor de cero cuando el ángulo interno de fricción es cero.

Considerando las condiciones anteriores se procede o no con el cálculo de los factores mediante las formulas 2.13 y 2.14.

$$N_{cv} = 2 \left(\frac{H}{D} \right) \quad (1.13)$$

$$N_{qv} = \left(\frac{\phi H}{44D} \right) \leq N_q \quad (1.14)$$

El valor de N_q corresponde al valor de la carga inferior que va a ser analizado en el subíndice siguiente.

El desplazamiento necesario para lograr la fuerza Q_u se calcula con la siguiente consideración.

0.01H a 0.02H , Para arenas

0.1H a 0.2H , Para arcillas

1.4.3.2. Carga inferior

El cálculo de esta carga proviene de múltiples experimentos, es por esto que la formula resultante contiene factores los cuales se calculan mediante ecuaciones elaboradas y dependientes del ángulo interno de fricción. Para una rápida referencia se usa un gráfico donde se obtiene rápidamente los valores necesarios a usar según sea el caso.

$$Q_d = N_c \epsilon D + N_q \bar{y} H D + N_y y \frac{D^2}{2} \quad (1.15)$$

Donde los factores de la ecuación 1.15 se calculan mediante las formulas 1.16, 1.17 y 1.18 o mediante la gráfica 1.10.

$$N_c = [\cot(\phi + 0.001)] \left\{ \exp[\pi \tan(\phi + 0.001)] \tan^2 \left(45 + \frac{\phi + 0.001}{2} \right) - 1 \right\} \quad (1.16)$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \phi) \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (1.17)$$

$$N_y = \exp(0.18\phi - 2.5) \quad (1.18)$$

El desplazamiento necesario para alcanzar Qd es:

0.1D, para suelos granulares

0.2D, para suelos cohesivos

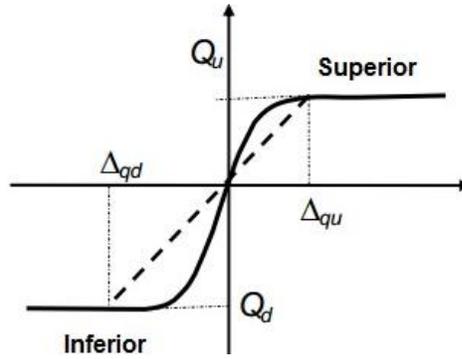


Figura 1.10. Comportamiento real del resorte vertical. (ASCE)

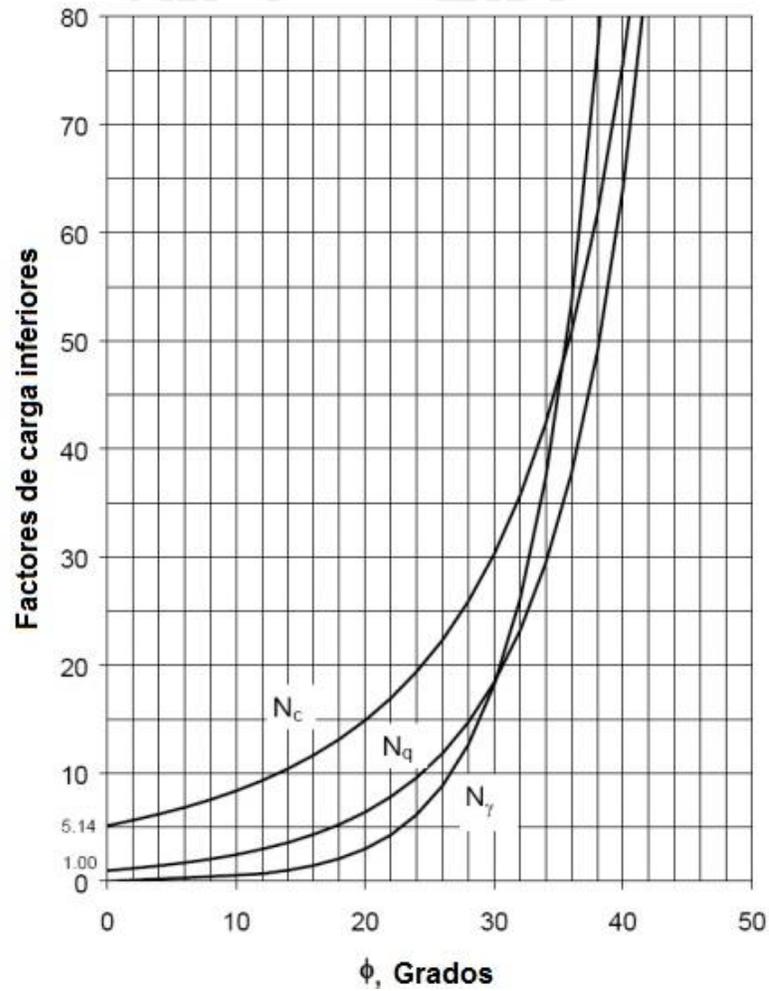


Figura 1.11. Selección de los factores de carga. (ASCE)

Debido a que las fuerzas y desplazamientos del resorte vertical depende del sentido su gráfica de fuerza vs desplazamiento no es simétrica (como se ve en la figura 1.11). Esto cambia con los valores obtenidos del cálculo, en general la fuerza superior va a ser mucho menor que la fuerza inferior mientras lo contrario sucede con el desplazamiento, es decir es mayor cuando es superior.

1.5. Flexión en vigas

Cuando un elemento del tipo viga es sometido a una carga en su longitud está experimentando una deflexión la cual debe ser analizada para establecer límites de falla. Los métodos de análisis son mediante integración, funciones de discontinuidad o el método de superposición. En el caso de esta tesis se usará el método de integración para obtener una fórmula y usarla en conjunto con otras ecuaciones para obtener los esfuerzos actuantes.

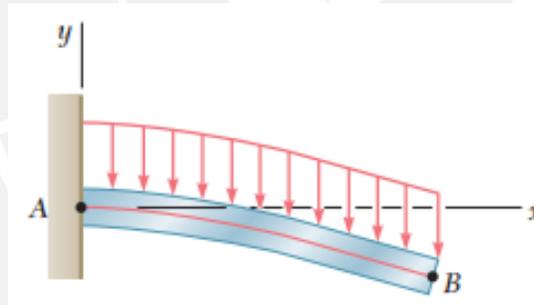


Figura 1.12. Viga Cantilever usada para el análisis. (Beer)

Como base del método para obtener la deflexión de una viga se toma la relación entre el radio de curvatura y el momento que existe en el elemento. Esta relación se obtiene al analizar la curvatura con la deformación en el arco que se genera al deformar el elemento. Al final se obtiene esta deformación con el momento al que está sometida la viga con lo que se consigue la ecuación necesaria.

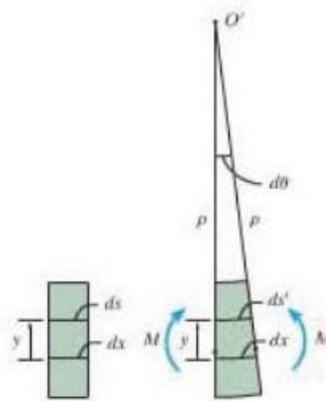


Figura 1.13. Porción de la viga: antes sometida a deformación (iza) y después (der). (Hibbeler)

A su vez este radio de curvatura se puede expresar mediante un análisis matemático como una derivada de segundo grado entre el sentido vertical y el sentido horizontal. Con esto se obtiene cuanto de deforma verticalmente la viga de acuerdo a la longitud del elemento que se está estudiando.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (1.19)$$

Lo que finalmente se necesita es el momento en función de la posición horizontal, esto es posible de obtener con un análisis de momentos internos de un elemento tipo viga considerando todas las fuerzas en el sistema.

1.6. Viga sobre fundación elástica

Timoshenko analizó el caso de aplicar momento y fuerza a una viga reposada en toda longitud sobre una fundación con un comportamiento elástico. Se trabaja con la hipótesis de que la fuerza de reacción que depende de la constante de elasticidad del medio y de la dilatación en el terreno. Sabiendo esto el autor obtuvo una ecuación diferencial para analizar el caso como la ecuación 1.19 para flexión en vigas.

$$\frac{d^4y}{dx^4} = \frac{K\gamma}{EI} \quad (1.20)$$

La solución de esta cuarta derivada da la siguiente ecuación considerando una constante para su análisis.

$$\gamma = e^{\beta x}(A \cos \beta x + B \sin \beta x) + e^{-\beta x}(C \cos \beta x + D \sin \beta x) \quad (1.21)$$

Sabiendo que:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} \quad (1.22)$$

Las constantes A a la D se pueden simplificar según sea el caso mediante ecuaciones diferenciales considerando las inclinaciones o tangentes de la curva dilatación así como teoría de flexibilidad en vigas. El caso que se usó en esta tesis corresponde a una viga semi-infinita lo cual significa que la viga es lo suficientemente larga para simplificar la fórmula dada. Esto nos da una ecuación de la siguiente manera:

$$\gamma = e^{-\beta x} \left(\frac{Q - \beta M_o}{2\beta^3 EI} \cos \beta x + \frac{M_o}{2\beta^2 EI} \sin \beta x \right) \quad (1.23)$$

Para verificar que la viga se comporta como una viga semi-infinita se usa la siguiente condición:

$$\beta l_{BC} \geq 5 \quad (1.24)$$

En caso de tener otra longitud que no corresponda a esta condición se recomienda revisar la teoría del autor para vigas mucho más cortas.

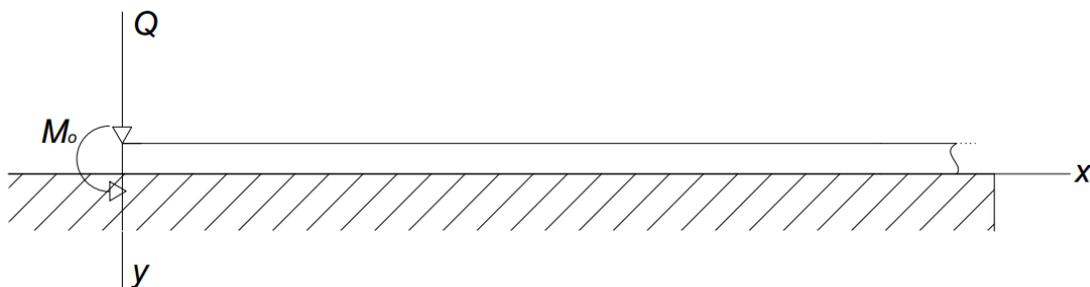


Figura 1.14. Una viga apoyada en un medio elástico.

Con la ecuación 1.23 es posible saber el comportamiento de la dilatación y de las cargas que actúan en la viga. El autor Timoshenko encontró que el punto crítico se encuentra al principio de la viga donde se aplica la fuerza Q y momento M_o .

Sin embargo solo con eso no es suficiente para obtener todas las ecuaciones para resolver el sistema, es por esto que el autor realiza el principio de superposición y es capaz de obtener las cargas de fuerza y momento en función de la dilatación directamente.

$$M_o = 2\beta^2 EI\gamma \quad (1.25)$$

$$Q = 4\beta^3 EI\gamma \quad (1.26)$$

Con el valor de beta es posible simplificar aún más estas ecuaciones a:

$$\gamma = \frac{Q\beta}{K} \quad (1.27)$$

$$M_o = \frac{Q}{2\beta} \quad (1.28)$$

Con todas estas condiciones es enteramente posible obtener los datos sabiendo condiciones básicas de la tubería y del medio elástico.

1.7. Teoría de la máxima energía de distorsión

Analizar un elemento sometido a esfuerzos combinados es necesario tener en cuenta el estado general de esfuerzos para saber si se está analizando en el plano más cargado del elemento. Con herramientas como el círculo de Mohr es posible realizar el análisis de la sección crítica.

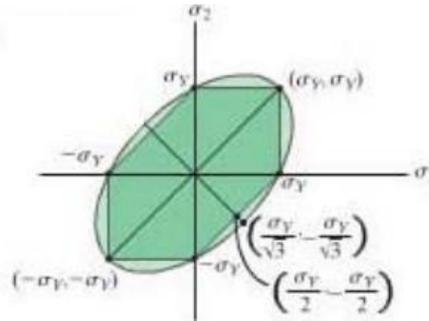


Figura 1.15. Gráfico de esfuerzos de la teoría de Von Mises. (Hibbeler)

La teoría de Von Mises se basa en conceptos de energía de distorsión. Esta estipula que si el valor de la energía de distorsión por unidad de volumen del material tiene el mismo valor que la energía de distorsión por unidad de volumen requerida para causar fluencia en el material entonces se producirá una falla.

Es por esto que mediante tensores de esfuerzo, la ley de Hooke y conceptos de energía se obtienen ecuaciones relacionando las cargas principales con la fluencia del material.

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} = \sigma_{eq} \quad (1.29)$$

La ecuación se puede simplificar más si consideramos un estado plano de esfuerzo y además usamos las ecuaciones de círculo de Mohr para determinar el esfuerzo equivalente mediante las cargas en las direcciones que se tiene de dato.

Se ha demostrado que este criterio de falla es bastante acertado cuando se analiza materiales dúctiles como el acero por lo que se considera que se considera la teoría más usada en casos reales de ingeniería.

1.8. Cálculo en tuberías en forma de L según ASHRAE

Uno de los casos que se va a desarrollar en esta tesis es la configuración de una tubería en forma de L. El manual de ASHRAE indica que además de los efectos de presión, peso u otro tipo de cargas también es importante verificar en una tubería los movimientos ocasionados por dilatación térmica.

Además el manual indica que el análisis real de una configuración del tipo L requiere modelos matemáticos complejos los cuales son realizados mediante programas computacionales, como por ejemplo un programa de simulación numérica. Sin embargo para los casos más usuales ASHRAE da una formula simple para calcular la longitud del tramo crítico de modo que el sistema no falle.

$$L_{BC} = \sqrt{\frac{3\gamma DE}{\sigma_F}} \quad (1.30)$$



CAPÍTULO 2

PROCEDIMIENTO PARA EL ANALISIS ANALÍTICO

2.1. Caso 1: Método de cálculo de la dilatación térmica en una tubería enterrada

En esta parte se procederá a calcular los datos necesarios tanto para la simulación como para el análisis analítico. Para esto consideraremos una tubería cargando gas natural. La temperatura de instalación y la de operación son 20 °C y 50 °C respectivamente. El tubo corresponde a un API X-52 Schedule 20 de 609.6 mm, consideraremos un acero con un coeficiente de expansión térmica de $12 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ y un modulo de elasticidad de $2 \times 10^{11} \text{ Pa}$.

Analizaremos analíticamente al terreno en dos casos, un de arcilla media y otro de arena media, con el fin de comparar los resultados. La distancia desde el suelo hasta el centro del tubo de 1.2 metros.

2.1.1. Esfuerzo térmico:

El estrés térmico longitudinal que se originará será:

$$\begin{aligned}\sigma_T &= \alpha \Delta T E \\ &= 12 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{11} \times (50 - 20) \\ &= 72 \times 10^6 \text{ Pa} = 72 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Sabiendo que la tubería es Schedule 20 tenemos que el diámetro 24" o 609.3 mm y espesor de 3/8" o 9.52 mm se calcula la fuerza axial del apoyo.

$$F_a = \pi D t \alpha \Delta T E$$

$$F_a = \pi \times 0.6096 \times 9.52 \times 10^{-3} \times 12 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{11} \times (60 - 30)$$

$$F_a = 1312696.3 \text{ N} = 1312.7 \text{ kN}$$

2.1.2. Fuerzas generadas por el terreno:

Mediante el método aproximado de los resortes se puede aproximar las cargas del suelo. De las tablas de terrenos obtenemos los datos necesarios para el cálculo en los dos casos:

Suelo arcilloso:

$$f = 0.7 \epsilon = 72 \text{ kPa} \quad \phi = 20^\circ \quad \bar{\gamma} = 1800 \text{ kg/m}^3$$

Suelo arenoso:

$$f = 0.7 \epsilon = 0 \text{ kPa} \quad \phi = 30^\circ \quad \bar{\gamma} = 1800 \text{ kg/m}^3$$

2.1.2.1. Resorte axial:

- **Suelo de arcilla:**

Se calcula el factor de adhesión con ϵ entre 100, es decir 0.72:

$$\alpha = 0.608 - 0.123\epsilon - \frac{0.274}{\epsilon^2 + 1} + \frac{0.695}{\epsilon^3 + 1}$$

$$\alpha = 0.845$$

Como tenemos el ángulo interno de fricción se calcula el coeficiente de presión en reposo:

$$K_0 = 1 - \sin \phi$$

$$K_0 = 1 - \sin 20 = 0.658$$

Entonces:

$$t_u = \pi D \alpha c + \pi D H \bar{y} \frac{(1 + K_0)}{2} \tan \delta$$

$$t_u = \pi \times 0.6096 \times 0.845 \times 72000 + \pi \times 0.6096 \times 1.2 \times 1800 \times 9.81 \times \frac{(1 + 0.658)}{2} \tan(0.7 \times 20)$$

$$t_u = 116515.589 + 8387.71 = 124903.299 \text{ N/m} = 124.9 \text{ kN/m}$$

Acá podemos ver que la componente que corresponde a la cohesión aumenta tremendamente el valor de la carga. En general si esto pasa cuando el terreno es arcilloso.

El desplazamiento Δt_u lo obtenemos de la tabla 1.5, esta es de 8 mm.

- **Suelo de arena:**

Coefficiente de presión en reposo:

$$K_0 = 1 - \sin \phi$$

$$K_0 = 1 - \sin 30 = 0.5$$

Entonces:

$$t_u = \pi D \alpha c + \pi D H \bar{y} \frac{(1 + K_0)}{2} \tan \delta$$

$$t_u = 0 + \pi \times 0.6096 \times 1.2 \times 1800 \times 9.81 \times \frac{(1 + 0.5)}{2} \tan(0.7 \times 30)$$

$$t_u = 11683.05 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 11.68 \text{ kN/m}$$

Podemos comprobar entonces la diferencia entre los dos tipos de suelo, esto va a repercutir tremendamente en la longitud virtual entre apoyos.

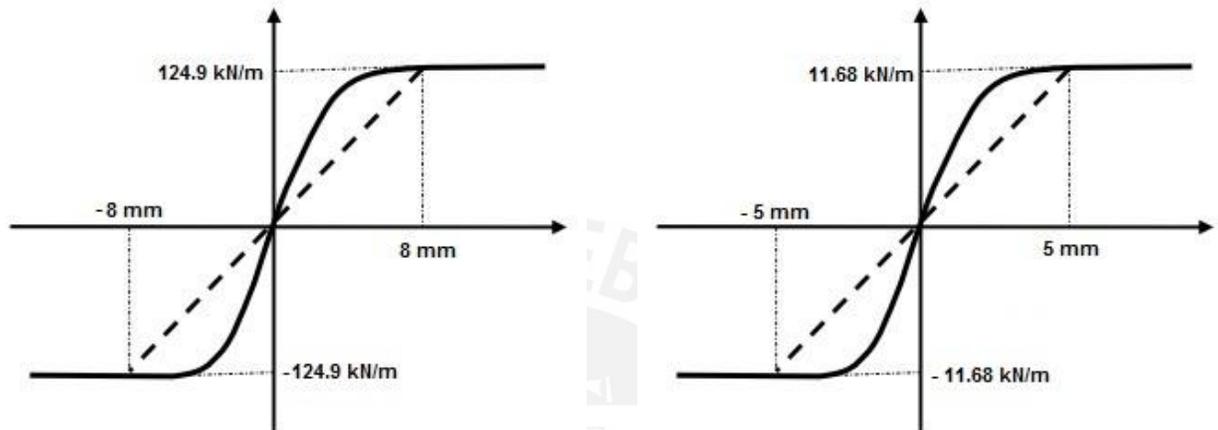


Figura 2.1 y 2.2. Resorte axial en arcilla (izq.) y en arena (der.)

En este caso consideraremos un Δx como 5 mm.

2.1.2.2. Resorte lateral:

Analizaremos esta fuerza para cada tipo de suelo:

- **Suelo de arcilla:**

Para el valor N_{ch} :

$$a = 6.752 \qquad b = 0.065 \qquad c = -11.063 \qquad d = 7.119$$

Con $x = H/D = 1.2/0.6069 = 1.98$ se obtiene:

$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3}$$

$$N_{ch} = 6.752 + 0.065x1.98 - \frac{11.063}{(1+1.98)^2} + \frac{7.119}{(1+1.98)^3}$$

$$N_{ch} = 5.904$$

Para el valor N_{qh} con $\phi = 20^\circ$:

$$a = 2.399 \quad b = 0.439 \quad c = -0.03 \quad d = 1.059 \times 10^{-3}$$

$$e = -1.754 \times 10^{-5}$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$$

$$N_{qh} = 2.399 + 0.439 \times 1.98 - 0.03 \times 1.98^2 + 1.059 \times 10^{-3} \times 1.98^3 - 1.754 \times 10^{-5} \times 1.98^4$$

$$N_{qh} = 3.159$$

Con esto calculamos la fuerza:

$$P_u = N_{ch} \epsilon D + N_{qh} \bar{\gamma} H D$$

$$P_u = 5.904 \times 72000 \times 0.6096 + 3.159 \times 1800 \times 9.81 \times 1.2 \times 0.6096$$

$$P_u = 259133.655 + 40805.372 = 299939.027 = 299.94 \text{ kN/m}$$

El desplazamiento para la fuerza máxima:

$$\Delta p = 0.04 \left(H + \frac{D}{2} \right)$$

$$\Delta p = 0.04 \left(1.2 + \frac{0.6096}{2} \right) = 0.0602 \text{ m} = 60.2 \text{ mm}$$

- **Suelo de arena:**

En este caso solo se calculará el coeficiente N_{qh} debido a que la arena no presenta cohesión.

Con $\phi = 30^\circ$ se obtiene:

$$a = 4.565 \quad b = 1.234 \quad c = -0.089 \quad d = 4.275 \times 10^{-3}$$

$$e = -9.159 \times 10^{-5}$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$$

$$N_{qh} = 4.565 + 1.234x1.98 - 0.089x1.98^2 + 4.275x10^{-3}x1.98^3 - 9.159x10^{-5}x1.98^4$$

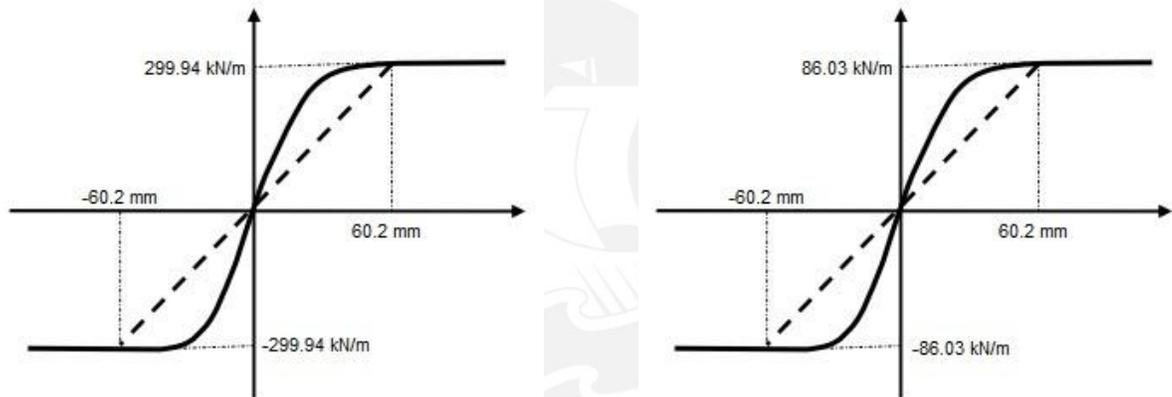
$$N_{qh} = 6.69$$

Entonces la carga:

$$P_u = N_{ch}\epsilon D + N_{qh}\bar{y}HD$$

$$P_u = 0 + 6.69x1800x9.81x1.2x0.6069$$

$$P_u = 86033.187 \text{ N/m} = 86.03 \text{ kN/m}$$



Figuras 2.3 y 2.4. Resorte lateral en arcilla (izq.) y en arena (der.)

El desplazamiento para la carga máxima es igual a de arcilla debida a que está basado en medidas geométricas. Para la arena entonces $\Delta p = 60.2 \text{ mm}$

2.1.2.3. Resorte vertical:

Realizaremos todos los cálculos sabiendo que la relación H/D es igual a 1.98 y es menor a 10 por lo que es posible usar las ecuaciones de este resorte.

- **Suelo de arcilla:**

Primero calcularemos los factores a usar:

$$N_{cv} = 2 \left(\frac{H}{D} \right) = 2x1.98 = 3.96$$

$$N_{qv} = \left(\frac{\phi H}{44D} \right) = \left(\frac{20 \times 1.2}{44 \times 0.6069} \right) = 0.899$$

Entonces:

$$Q_u = N_{cv}\epsilon D + N_{qv}\bar{y}HD$$

$$Q_u = 3.96 \times 72000 \times 0.6096 + 0.899 \times 1800 \times 9.81 \times 1.2 \times 0.6069$$

$$Q_u = 173809.15 + 11612.54 = 185421.695 \frac{N}{m} = 185.42 \text{ kN/m}$$

También el desplazamiento:

$$\Delta u = 0.15H = 0.18 \text{ m}$$

Para la fuerza inferior se obtendrá los coeficientes N_c , N_q y N_y por medio de la gráfica para su rápido uso, entonces para $\phi = 20^\circ$:

$$N_c = 15 \qquad N_q = 7 \qquad N_y = 2.5$$

Entonces considerando el peso total igual al peso específico:

$$Q_d = N_c\epsilon D + N_q\bar{y}HD + N_y y \frac{D^2}{2}$$

$$Q_d = 15 \times 72000 \times 0.6096 + 7 \times 1800 \times 9.81 \times 1.2 \times 0.6096 + 2.5 \times 1800 \times 9.81 \frac{0.6096^2}{2}$$

$$Q_d = 658368 + 90420.26 + 8202.41 = 756990.67 \text{ N/m} = 757 \text{ kN/m}$$

El desplazamiento:

$$\Delta d = 0.2x D = 0.122 \text{ m}$$

- **Suelo de arena:**

Pasaremos a calcular solo los factores a usar:

$$N_{qv} = \left(\frac{\phi H}{44D} \right) = \left(\frac{30 \times 1.2}{44 \times 0.6069} \right) = 1.342$$

$$Q_u = N_{cv} \epsilon D + N_{qv} \bar{\gamma} H D$$

$$Q_u = 0 + 1.342 \times 1800 \times 9.81 \times 1.2 \times 0.6096 = 17334.86 \text{ N/m} = 17.33 \text{ kN/m}$$

También:

$$\Delta u = 0.015H = 0.018 \text{ m}$$

Para la carga inferior se tienen los coeficientes a $\phi = 30^\circ$:

$$N_c = 30$$

$$N_q = 18$$

$$N_y = 18$$

Entonces:

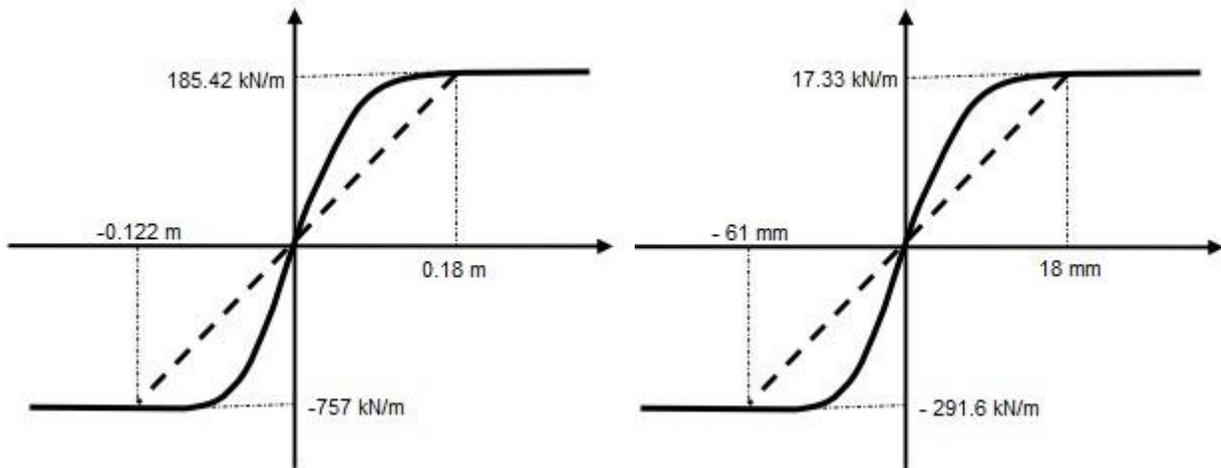
$$Q_d = N_c \epsilon D + N_q \bar{\gamma} H D + N_y \gamma \frac{D^2}{2}$$

$$Q_d = 0 + 18 \times 1800 \times 9.81 \times 1.2 \times 0.6096 + 18 \times 1800 \times 9.81 \times \frac{0.6096^2}{2}$$

$$Q_d = 232509.24 + 59057.35 = 291566.59 \text{ N/m} = 291.6 \text{ kN/m}$$

El desplazamiento:

$$\Delta d = 0.1 \times D = 0.061 \text{ m}$$



Figuras 2.5. y 2.6. Resorte vertical en arcilla (izq.) y en arena (der.)

Se presenta un cuadro resumen de los datos:

Tabla 2.1. Cuadro resumen de los resortes

Suelo	Dirección del resorte		Máxima resistencia del terreno (kN/m)	Desplazamiento para la resistencia máxima (mm)
Arcilla	Axial		$t_u = 124.9$	$\Delta t_u = 8$
	Lateral		$P_u = 299.94$	$\Delta p = 60.2$
	Vertical	Superior	$Q_u = 185.42$	$\Delta u = 180$
		Inferior	$Q_d = 757$	$\Delta d = 122$
Arena	Axial		$t_u = 11.68$	$\Delta t_u = 5$
	Lateral		$P_u = 86.03$	$\Delta p = 60.2$
	Vertical	Superior	$Q_u = 17.33$	$\Delta u = 18$
		Inferior	$Q_d = 291.6$	$\Delta d = 61$

2.1.3. Longitud virtual entre apoyos:

Para proceder a obtener esta longitud asumiremos que la fuerza axial que produce el terreno es a lo largo de toda la distancia de la tubería. Entonces:

$$L_v = \frac{F_a}{t_u}$$

Para arcilla:

$$L_v = \frac{1312.7}{124.9} = 10.51 \text{ m}$$

Para arena:

$$L_v = \frac{1312.7}{11.68} = 112.39 \text{ m}$$

Vemos una gran diferencia entre las dos, el efecto de la cohesión es la que produce este efecto ya que existe mayor fuerza en la tubería por unidad de metro.

Es recomendable considerar una longitud mayor a la calculada debido al comportamiento de la fricción del terreno a la tubería como se dice en el capítulo 1, especialmente en el caso de tener un suelo cohesivo. En la simulación se tomó un valor mayor al que se ha calculado.

2.2. Caso 2: Método de cálculo para una tubería con cambio de dirección

Analizando el caso de dos tramos de tuberías con cierta longitud unidas por una curva que cambia la dirección del fluido en 90°, se puede ver que la expansión debido a temperatura puede influir en los tubos mereciendo un análisis.

Considerando una tubería libre, no enterrada, con dos apoyos fijos en sus extremos y con un cambio de dirección de noventa grados se estudiará que sucede cuando el tramo más largo se expande libremente y provoca un desplazamiento en el otro tramo. Además se considerará que el cambio de ángulo en el punto B directo y de 90°, sin un radio de curvatura, esto es debido a que el análisis principal es al tramo BC.

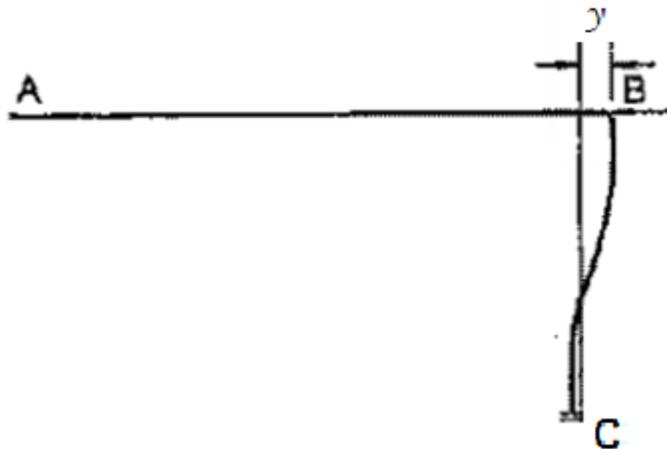


Figura 2.7. Esquema de una tubería AB que se expande una longitud “Y” y provoca desplazamiento en BC.

En este caso se evaluará qué es lo que sucede con el tramo BC al ser el tramo crítico. Debido que en el extremo B se somete a un desplazamiento, se puede suponer que el tramo BC se comporta como una columna que se deforma debido a una fuerza F . El desplazamiento se puede aproximar al que ocurre por dilatación térmica en AB sabiendo su longitud y material. Hay que notar que esta última afirmación es una aproximación, ya que en realidad el desplazamiento “y” siempre va a ser menor que el cálculo debido a que la unión entre los dos tramos genera una fuerza que impide el movimiento libre del nodo B. Esto se acentúa más en cuanto el tramo BC sea de menor longitud, ya que en este caso la tubería se va a comportar como un apoyo fijo por la mayor resistencia a la flexión que tendría.

Entonces, considerando que el extremo BC tiene la suficiente flexibilidad para considerar que el extremo B se dilata libremente se procede a usar las fórmulas ya preestablecidas de la deformación por una fuerza, solo que en el análisis en vez de obtener la deformación con una fuerza se obtendrá la fuerza a partir de una deformación conocida.



Figura 2.8. Modelo de la viga BC.

Entonces se tiene:

$$\gamma = \frac{Pl_{BC}^3}{3E \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4)} \quad (2.1)$$

Con esto y la ecuación de expansión térmica podemos hallar una fuerza si es que la longitud de BC ya está establecida; sin embargo, si lo que se quiere es saber cuánto es la distancia máxima para que el tramo BC no falle, entonces se procede a realizar un análisis más profundo por resistencia de material.

Considerando una fuerza P en función de l_{BC} y el esfuerzo límite entonces se procede al análisis cortando en un punto cualquiera de la longitud para localizar el punto dentro de la tubería donde probablemente ocurra el esfuerzo mayor.

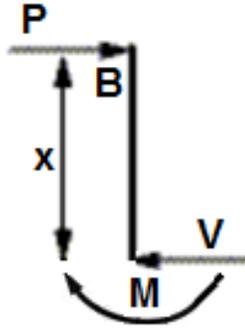


Figura 2.9. Análisis por Resistencia del tubo.

Mediante el análisis de resistencia de material se puede deducir que el punto crítico de la tubería está en el apoyo fijo, en este lugar se desarrolla el máximo momento de flexión debido a la fuerza cortante debido a la expansión. Hay que notar que se ha descartado el momento inicial ubicado en el punto donde esta aplicada la fuerza, esto se ha hecho ya que el valor numérico es mucho menor al momento que se encuentra al final del tubo.

Entonces de sumatoria de momentos en el apoyo se obtiene que:

$$M_c = Pl_{BC} \quad (2.2)$$

Analizando el esfuerzo de flexión y el esfuerzo cortante se obtiene que:

$$\sigma_c = \frac{M_c(D_e/2)}{\frac{\pi}{64}(D_e^4 - D_i^4)} = \frac{Pl_{BC}(D_e/2)}{\frac{\pi}{64}(D_e^4 - D_i^4)} \quad (2.3)$$

$$\tau_c = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(D_e^2 - D_i^2)} \quad (2.4)$$

Según Von Mises el esfuerzo equivalente es:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_f^2} \quad (2.5)$$

Al final este esfuerzo se compara con el fuerza de fluencia considerando un factor de seguridad:

$$\sigma_{eq} \leq \frac{\sigma_F}{FS}$$

Todos los parámetros dados están en función de la longitud del tramo BC, con esto podemos proponer una solución al problema.

Consideremos una tubería API X-52 Schedule 20 de 609.6 mm, de acero con un coeficiente de expansión térmica de $12 \times 10^{-6} 1/^\circ C$ y un modulo de elasticidad de $2 \times 10^{11} Pa$. La temperatura de instalación y la de operación son $20^\circ C$ y $45^\circ C$ respectivamente. La longitud de AB es de 200 metros.

2.2.1. Elongación en el tramo AB:

Para esto usaremos la siguiente ecuación de dilatación térmica.

$$\gamma = \alpha \Delta T l_{AB}$$

$$\gamma = 12 \times 10^{-6} \times 200 \times (45 - 20)$$

$$\gamma = 0.06 \text{ m}$$

2.2.2. Flexión en el tramo BC

Sabiendo el schedule del tubo es posible obtener los parámetros geométricos para proceder con el cálculo de la fuerza P.

$$\gamma = \frac{P l_{BC}^3}{3E \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4)}$$

$$P = \frac{3\gamma E \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4)}{l_{BC}^3}$$

$$P = \frac{3 \times 0.06 \times 2 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} (0.609^4 - 0.59^4)}{l_{BC}^3} = \frac{28.94 \times 10^6}{l_{BC}^3}$$

2.2.3. Estado de esfuerzos y longitud BC

Luego con las ecuaciones obtenidas por resistencia de materiales:

$$\sigma_m = \frac{Pl_{BC}(D_e/2)}{\frac{\pi}{64}(D_e^4 - D_i^4)} = \frac{Pl_{BC}(0.609/2)}{\frac{\pi}{64}(0.609^4 - 0.59^4)} = 378.73xPl_{BC}$$

$$\tau_f = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(D_e^2 - D_i^2)} = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(0.609^2 - 0.59^2)} = 55.89xP$$

Conociendo P en función de l_{BC} reemplazamos en las últimas ecuaciones:

$$\sigma_m = 378.73x \frac{28.94x10^6}{l_{BC}^3} xl_{BC} = \frac{10.96x10^9}{l_{BC}^2}$$

$$\tau_f = 55.89x \frac{28.94x10^6}{l_{BC}^3} = \frac{16.17x10^8}{l_{BC}^3}$$

Luego usando el esfuerzo equivalente, el esfuerzo de fluencia y un factor de seguridad de 2:

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_F}{FS}$$

$$\sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_f^2} = \frac{\sigma_F}{FS}$$

$$\left(\frac{10.96x10^9}{l_{BC}^2}\right)^2 + 3x\left(\frac{16.17x10^8}{l_{BC}^3}\right)^2 = \left(\frac{360x10^6}{2}\right)^2$$

$$\frac{1.201x10^{20}}{l_{BC}^4} + \frac{7.84x10^{18}}{l_{BC}^6} = 3.24x10^{16}$$

Multiplicando por la longitud BC elevado a la sexta toda la ecuación y ordenando:

$$3.24x10^{16}xl_{BC}^6 - 1.201x10^{20}xl_{BC}^2 - 7.84x10^{18} = 0$$

Con esta ecuación encontramos que las posibles respuestas son: 6803.8, 7.65

Se selecciona la respuesta más idónea con lo que se llega a tener que la longitud ideal del tramo de tubería es de 7.65 metros, esta distancia la aproximaremos al siguiente número entero, es decir 8 metros. El esfuerzo equivalente en este caso es igual a 171 MPa y la fuerza P tiene un valor de 56.5 kN.

Como método de validación del procedimiento realizado mediante conocimientos de resistencia de materiales se calculará la distancia del tramo BC mediante el manual de ASHRAE.

$$L_{BC} = \sqrt{\frac{3\gamma DE}{\sigma_F}} = \sqrt{\frac{3 \times 0.06 \times 0.0609 \times 2 \times 10^{11}}{360 \times 10^6}}$$

$$L_{BC} = 7.8 \text{ m}$$

Este valor es muy cercano al obtenido por el método desarrollado lo cual corrobora el cálculo ya que la fórmula usada anteriormente ha sido tomada del manual de ASHRAE que es una organización internacional de ingeniería. También se procede a calcular la fuerza generada en el tramo para la comparación.

2.3. Caso 3: Método de cálculo para una tubería enterrada con cambio de dirección

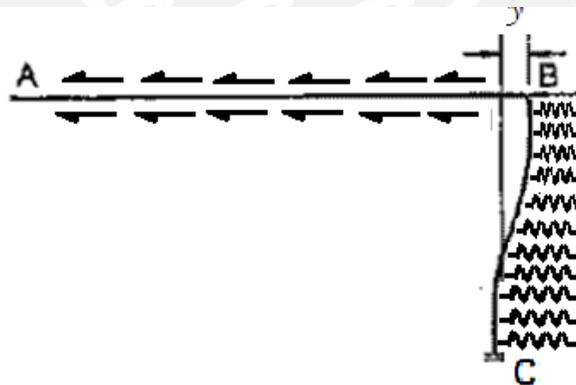


Figura 2.10. Esquema de una tubería AB unida a una tubería BC enterrada en condición de entierro.

Ahora se procederá a analizar un caso que representa una combinación de los dos estudios anteriores, la verificación de falla a un arreglo de tubería en forma de "L"

enterrada. El extremo B se somete a un desplazamiento, sin embargo esta contenido por la fricción en el tramo AB así como por la reacción lateral del terreno en el punto. En el caso anterior se supone que el tramo BC se comporta cómo una columna que se deforma debido a una fuerza F y así aplicar teoría de vigas, sin embargo esto no es posible en este estudio debido a que la tubería está rodeada por el suelo. Las incógnitas principales a analizar serán el desplazamiento en B y la fuerza Q generada en el punto.

Para la dilatación del tramo AB consideramos que se expande el punto B debido al cambio de temperatura y las fuerzas axiales y laterales del terreno (representadas por la fuerza Q y la correspondiente a la fricción y cohesión) resisten esta dilatación. Con esta afirmación podemos decir que la dilatación en el punto B queda de la siguiente manera.

$$\gamma = \alpha \Delta T l_{AB} - \frac{(Q + t_u l_{AB}) l_{AB}}{E \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2)} \quad (2.7)$$

De esta fórmula se puede deducir que existirá un límite para esta dilatación, cierta longitud será lo suficientemente grande para que la fuerza de fricción y cohesión la contrarreste completamente la dilatación térmica. Entonces se establece que para que este procedimiento de cálculo sea realizado, la longitud del tramo AB tiene necesariamente ser menor a la longitud virtual entre apoyos.

Esto último introduce una primera consideración debido al comportamiento de la fuerza axial del terreno y del cálculo de la longitud virtual entre apoyos. Como se explicó en el capítulo 2 el comportamiento de la fricción y cohesión no se presenta en toda la longitud de la tubería, esto significa que se recomendaría que el término $t_u l_{AB}$ se multiplique por un factor menor a 1 para representar en el cálculo el hecho que esta carga no es constante en todo el tramo. En nuestro caso aplicaremos como calculo paralelo un factor de 0.5 obtenido luego de un estudio del comportamiento de la fuerza axial del terreno dentro de la simulación numérica.

Otra consideración a tener en cuenta se ve ya que igual que el caso 2 esta fórmula es una aproximación, debido a que primeramente el nodo B no puede expandirse libremente debido al tramo BC lo contiene debido a su rigidez, el hecho que la fuerzas Q y tú son

obtenidas mediante fórmulas empíricas del terreno también influyen en el cálculo. Estas consideraciones totales pueden inducir a un error sin embargo se verificará estas aproximaciones con la simulación numérica en el siguiente capítulo.

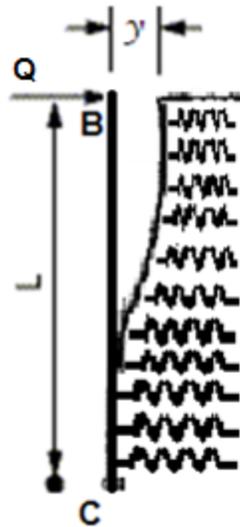


Figura 2.11. Elemento BC enterrado.

Para resolver el sistema necesitamos otra ecuación la cual se obtiene analizando el tramo BC, mediante un análisis de resistencia de materiales se puede deducir la fuerza y momento dentro de una tubería si aproximamos nuestro modelo a el de una viga rodeada de una fundación elástica.

Según Timoshenko al aplicar esta teoría se puede obtener las cargas que actúan en la tubería enterrada, como se explicó capítulos anteriores esto se hace mediante derivadas y constantes ya obtenidas mediante el libro del autor. Con esto enunciamos las formulas 1.22, 1.27 y 1.28 para el cálculo.

$$\gamma = \frac{Q\beta}{K}$$

$$M_0 = \frac{Q}{2\beta}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{K}{4E \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4)}}$$

Hay que notar que para usar estas fórmulas se tiene que cumplir la condición de que el tramo BC se aproxime a una viga semi-infinita. Esto se puede comprobar si es que la siguiente inecuación se cumple:

$$\beta l_{BC} \geq 5$$

Como ya se ha explicado anteriormente el terreno se representa de una manera inelástica debido a que su comportamiento no corresponde a la ley de Hooke, considerando esto no se podría usar la teoría de fundación elástica debido a que este considera al medio que rodea la viga como elástico. Sin embargo para proceder podemos considerar al suelo con el comportamiento requerido debido a que existen rangos donde se ve que el terreno aun cumple con la ley de Hooke, esto es debido a que va haber una dilatación extrema donde el suelo “cede” y ya no puede regresar a su estado anterior. Este efecto es más fácil de comprender viendo la gráfica del comportamiento del terreno.

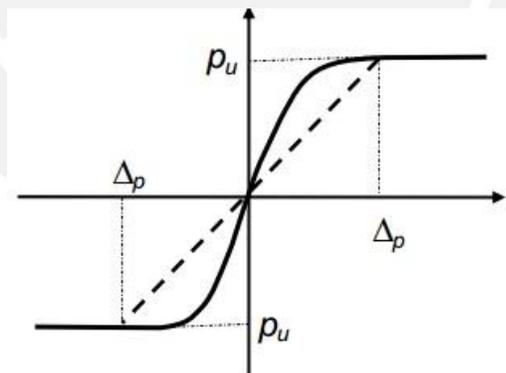


Figura 2.12. Comportamiento del terreno alrededor de una tubería. (ASCE)

Como se ve en la figura el terreno se puede aproximar al comportamiento según Hooke (línea recta que pasa por el origen) si es que la dilatación que sufre el terreno es menor al Δ que corresponde. Considerando esta condición podemos usar la teoría de Timoshenko de fundación elástica, esta aproximación se puede verificar al obtener la dilatación y ver si es menor al Δ según el resorte.

El gráfico también ayuda a explicar el factor K que en nuestro caso se le denomina constante de elasticidad del terreno. Como si fuera la elasticidad de un resorte la constante K es igual a la fuerza por unidad de longitud sobre la lo dilatación. En este análisis se necesita K para la dirección lateral por lo que se le denomina de la siguiente forma:

$$K = \frac{P_u}{\Delta p} \quad (2.8)$$

Los Estos valores del terreno pueden ser calculadas con las ecuaciones 2.8 y 2.11 del capítulo 2.

Según la teoría de Timoshenko el punto crítico de la viga en una fundación elástica es en el extremo donde actúa la fuerza y momento, en la mayoría de casos se puede ignorar el efecto cortante de la fuerza Q y solo tomar el momento para calcular esfuerzos. Como solo tenemos esfuerzos de flexión entonces se puede deducir la condición de falla.

$$\sigma_e = \frac{M_0 c}{I}$$

Con el momento desarrollado y con la distancia de esfuerzo máximo:

$$\frac{M_0(D_e/2)}{\frac{\pi}{64}(D_e^4 - D_i^4)} \leq \frac{\sigma_F}{FS}$$

Sabiendo todo el proceso de cálculo notamos que el proceso de verificación es diferente al caso de la tubería en L libre, en este caso para aliviar la tensión se recomendaría que se disminuya la dilatación incrementando la longitud AB para contrarrestar la expansión por temperatura mediante la fricción y cohesión. Es por esto que en este caso se obtendrá la longitud AB recomendada para que no falle ya que en este caso esta distancia es más crítica para el criterio de falla.

Entonces para el ejemplo de cálculo para la comparación consideremos una tubería API X-52 Schedule 20 de 609.6 mm, de acero con un coeficiente de expansión térmica de $12 \times 10^{-6} 1/^{\circ}C$ y un módulo de elasticidad de $2 \times 10^{11} Pa$. La temperatura de instalación y

la de operación son 20 °C y 45 °C respectivamente. La longitud de BC es de 25 metros. El terreno será de arena media y la distancia desde el suelo hasta el centro del tubo de 1.2 metros.

2.3.1. Elongación del punto B:

Para esto usaremos la siguiente ecuación de dilatación térmica, la fuerza axial de la tubería por longitud ya fue calculada en el capítulo anterior y le corresponde un valor de 11.68 kN/m

$$\gamma = \alpha \Delta T l_{AB} - \frac{(Q + t u l_{AB}) l_{AB}}{EA}$$

$$\gamma = 12 \times 10^{-6} x l_{AB} x (45 - 20) - \frac{(Q + 11.68 x 1000 x l_{AB}) l_{AB}}{2 \times 10^{11} \frac{\pi}{4} (0.609^2 - 0.59^2)}$$

$$\gamma = 3 \times 10^{-4} x l_{AB} - 2.795 \times 10^{-10} x (Q + 11.68 x 1000 x l_{AB}) l_{AB}$$

Como necesitamos a l_{AB} en función de γ procedemos a separar incógnitas sabiendo que la fuerza Q depende de γ .

$$\gamma = \frac{3 \times 10^{-4} x l_{AB} - 2.795 \times 10^{-10} x 11.68 x 1000 x l_{AB}^2}{1 + \frac{2.795 \times 10^{-10} x K x l_{AB}}{\beta}}$$

Los valores de K y β se calcularán a continuación y luego se presentará la ecuación completa

2.3.2. Constante de elasticidad del terreno y factor β

De la misma forma que el caso anterior se toma la fuerza lateral ya calculada anteriormente así como la dilatación máxima para la constante, sus valores son 86 kN/m y 60.2 mm respectivamente.

$$K = \frac{P_u}{\Delta p}$$

$$K = \frac{86 \times 1000}{60.2} = 1428.6 \text{ kN/m}^2$$

Entonces:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4E \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4)}}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{1428.6 \times 1000}{4 \times 2 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} (0.609^4 - 0.59^4)}} = 0.217 \text{ m}^{-1}$$

2.3.3. Fuerza Q, momento crítico y dilatación

Con los factores se puede obtener la siguiente ecuación de la elongación en función de la longitud AB.

$$\gamma = \frac{3 \times 10^{-4} \times l_{AB} - 2.795 \times 10^{-10} \times 11.68 \times 1000 \times l_{AB}^2}{1 + \frac{2.795 \times 10^{-10} \times 1428.6 \times 1000 \times l_{AB}}{0.217}}$$

$$\gamma = \frac{3 \times 10^{-4} \times l_{AB} - 3.264 \times 10^{-9} \times l_{AB}^2}{1 + 1.84 \times 10^{-3} \times l_{AB}}$$

De las ecuaciones podemos deducir el momento en función de los parámetros necesarios

$$M_0 = \frac{Q}{2\beta} = \frac{\gamma K}{2\beta^2}$$

$$M_0 = \frac{\gamma \times 1428.6 \times 1000}{2 \times 0.217^2} = 15.17 \times 10^6 \gamma$$

También se puede presentar:

$$M_0 = \frac{4550.7l_{AB} - 49.52xl_{AB}^2}{1 + 1.84x10^{-3}xl_{AB}}$$

Finalmente comparamos el esfuerzo de flexión con la fluencia para obtener un factor de seguridad

$$\frac{M_0(D_e/2)}{\frac{\pi}{64}(D_e^4 - D_i^4)} = \frac{\sigma_F}{FS}$$

$$\frac{M_0(0.609/2)}{\frac{\pi}{64}(0.609^4 - 0.59^4)} = \frac{360x10^6}{FS}$$

$$FS = \frac{9.51x10^5}{M_0}$$

Luego:

$$FS = \frac{9.51x10^5(1 + 1.84x10^{-3}xl_{AB})}{4550.7l_{AB} - 49.52xl_{AB}^2}$$

Con esto se puede obtener un resultado considerando un factor de seguridad. Para el caso de una tubería en L libre se toma el valor de 2 como FS por recomendación de ASHRAE, sin embargo para este caso no se tiene referencia directa para un valor determinado. Por esta razón recomienda trabajar con un valor mayor de 2 por las consideraciones tomadas anteriormente y a que las normas dejan al lector realizar los valores

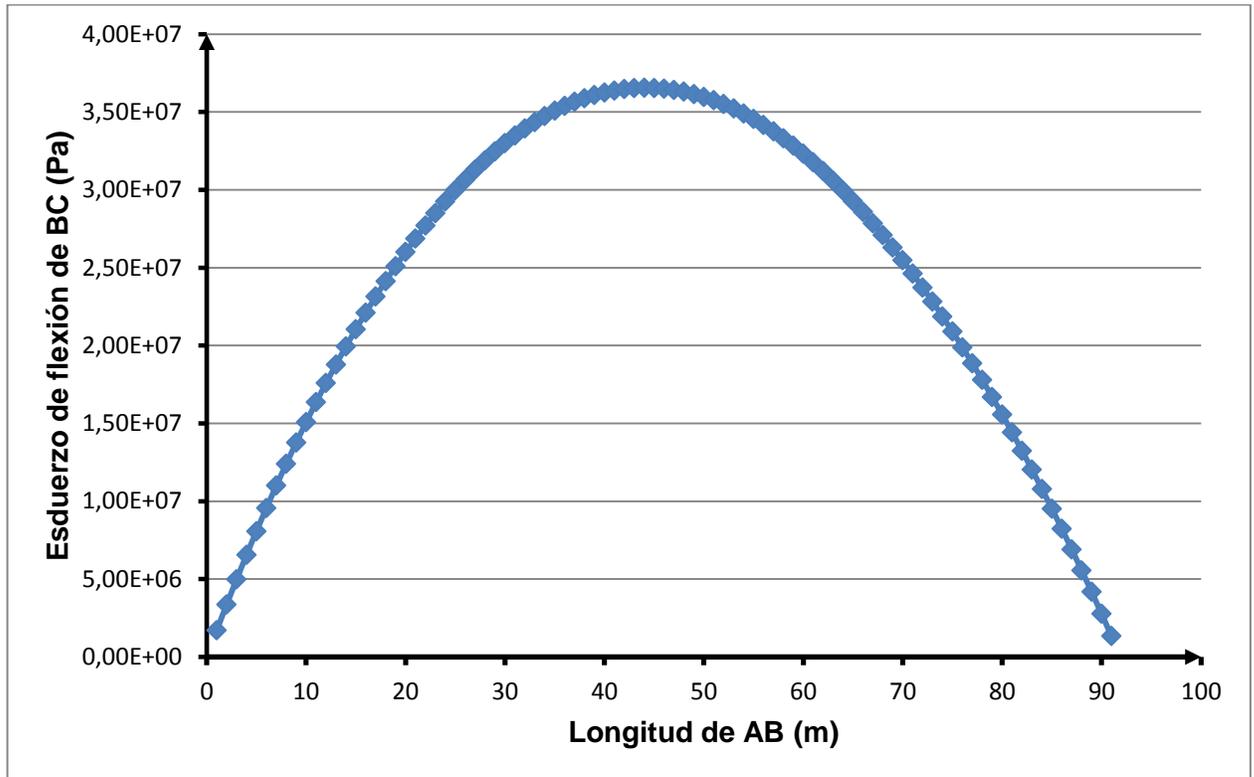
Al analizar la función de FS para diferentes longitudes de AB vemos que el factor de seguridad mínimo es 9.9, es decir que con las condiciones tomadas no fallaría la tubería. Sin embargo este cálculo se ha realizado tomando toda la fuerza de fricción del terreno, condición que no se adecua al caso real debido a que la fricción se presenta principalmente en el extremo que hay mayor dilatación de la tubería, es decir cuan más lejos se está del apoyo fijo. Esto es un efecto también explicado en el subcapítulo de la longitud virtual entre apoyos y en los resultados del caso 1.

Considerando que solo actúa la fricción en el 50% de la longitud de la tubería se tiene que el factor de seguridad de 5.3, con la simulación numérica realizada en el siguiente capítulo se verificará si considerar esta condición es correcto.

Debido a este comportamiento se procederá a analizar 3 longitudes de 35, 70 y 100 metros. En el caso de considerar el 100% de dicha fuerza se obtiene 35.1 MPa para 35 metros, 25.5 MPa para 70 metros y para los 100 metros no se obtiene ningún resultado ya que para este caso teóricamente no hay dilatación en B y por consecuencia no hay esfuerzo en BC. A estos casos les corresponde 45.9, 66.1, 66.3 MPa cuando se considera el 50% de la fricción respectivamente, notar que en los 100 metros existe esfuerzo y es debido a que la longitud virtual entre apoyos se incrementó.

Otro aspecto a explicar es que debido a que la fórmula de la dilatación corresponde a una cuadrática debido a la longitud en AB. Esto genera que el comportamiento de " γ " y por consecuencia del esfuerzo sea igual debido a estar relacionados directamente. Es decir que desde una dilatación nula a más se incrementa el esfuerzo a medida que incrementa la longitud hasta un máximo para luego disminuir. Esto es importante de considerar ya que cuando se analice en que longitudes fallaría una tubería se verá que se obtendrá dos valores de longitud los cuales indica los límites para que no falle el sistema.

Por ejemplo para el caso a analizar con 50% de la fricción actuante se ve el comportamiento del esfuerzo en BC.



Gráfica 2.1. Comportamiento del esfuerzo en BC respecto a la longitud de AB.

Acá se puede ver fácilmente cómo evoluciona el esfuerzo en comparación de la longitud AB, este comportamiento debe ser tomado en cuenta para los casos que se obtengan dos respuestas.

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Conceptos para el análisis

En el pasado, se ha analizado por simulación las tuberías enterradas lo cual ofrece un alcance de lo que se puede lograr con el método de elementos finitos. Los métodos para lograr resultados varían según los tipos de análisis a realizar y las condiciones que tienen los casos estudiados.

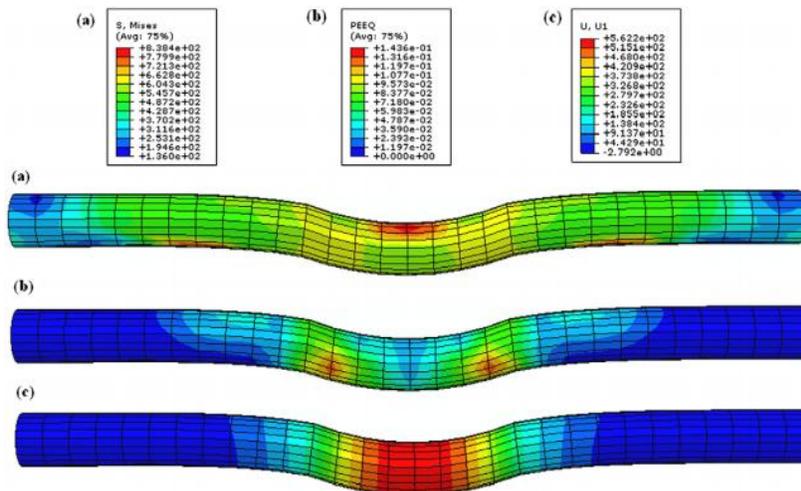


Figura 3.1. Análisis de la deflexión en tuberías
Fuente: Zheng y otros (2009).

Zheng y otros (2009) analizaron cómo afecta y hasta qué punto puede producirse una deformación transversal en las tuberías, teniendo en cuenta las restricciones que ofrecen un terreno seco y otro húmedo para que falle la tubería. En dicho estudio también se compararon dos métodos de análisis de falla por elementos finitos: una versión modificada del método iterativo de Newton-Raphson y el método modificado de Rikis.

En el presente caso, como el análisis fue en una porción relativamente pequeña de la tubería, era recomendable utilizar una simulación de terreno diseñado en 3D que envolviese al tubo (véase la Figura 3.2). El terreno fue un tetraedro de 10 nodos formado por una malla de suelo. En esta malla los elementos finitos interactúan entre sí permitiendo observar cómo el terreno se deforma por el desplazamiento de la tubería. La cantidad de cálculos requeridos por cada elemento que interactúa hace que este modelo solo sea recomendable si se tiene un programa computacional con capacidad de procesamiento y obtención de resultados. Conociendo cuál es la zona crítica se pueden obtener datos exactos de la parte donde la tubería falla, al ser este modelo una representación más fina del suelo.

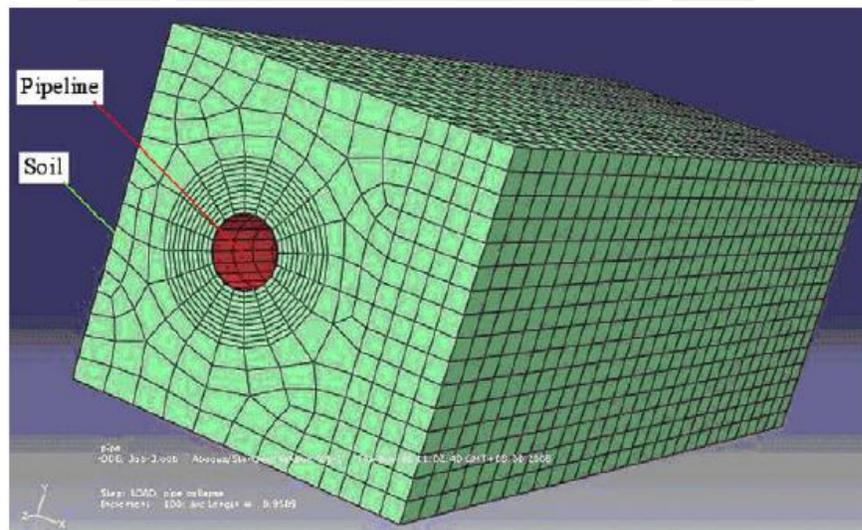


Figura 3.2. Modelo del terreno mediante tetraedros.
Fuente: Zheng y otros (2009).

De acuerdo con Gantes, Bouckovalas y Koumousis (2008) y la ASCE (2005), un análisis de entierro de tuberías solo se realiza cuando se quiera estudiar un tramo de tubería muy largo. Este modelo se hace representando las fuerzas de resistencia en el terreno en tres ejes, mediante resortes elástico-plásticos no lineales (véase la Figura 3.3).

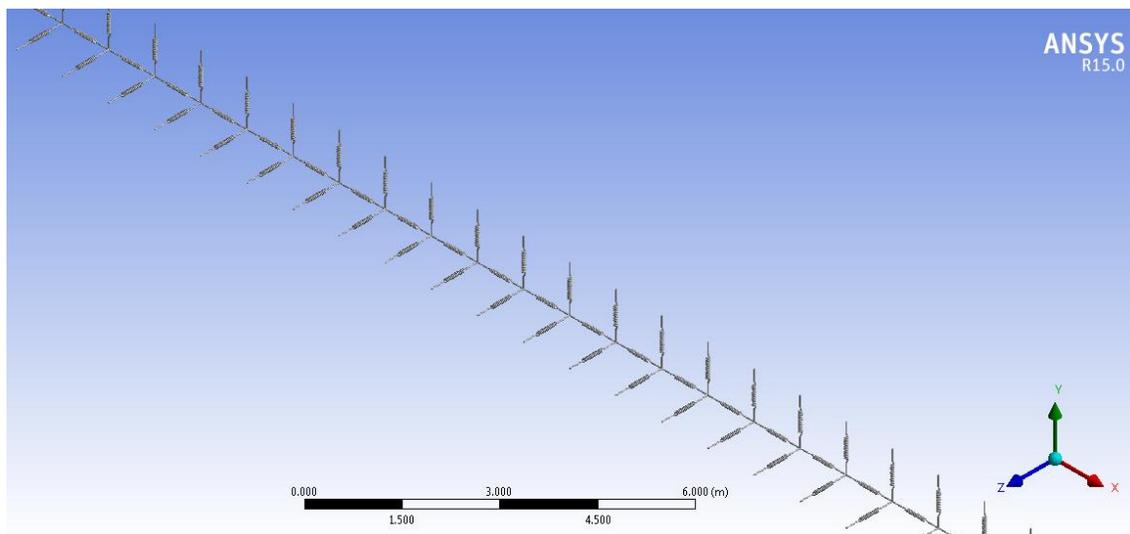


Figura 3.3. Modelamiento del terreno por resortes.

La máxima fuerza requerida para cada resorte es determinada por fórmulas empíricas que fueron explicadas en el Capítulo 1 y están asociadas al desplazamiento relativo de la tubería dentro del terreno. Este modelo es usado bajo ciertas consideraciones, como por ejemplo cuando la fuerza ejercida en cada eje sea constante una vez se llegue al valor máximo, lo cual no ocurre en el caso real, ya que la fuerza disminuye cuando se alcanzan valores muy grandes de desplazamiento relativo.

Debido al problema analizado en esta tesis, se utilizará el método de resortes inelásticos unidos en los nodos y puestos en la tubería. Para el modelado, se utilizará el programa ANSYS, el cual contiene los módulos y elementos de simulación necesarios para estudiar el caso.

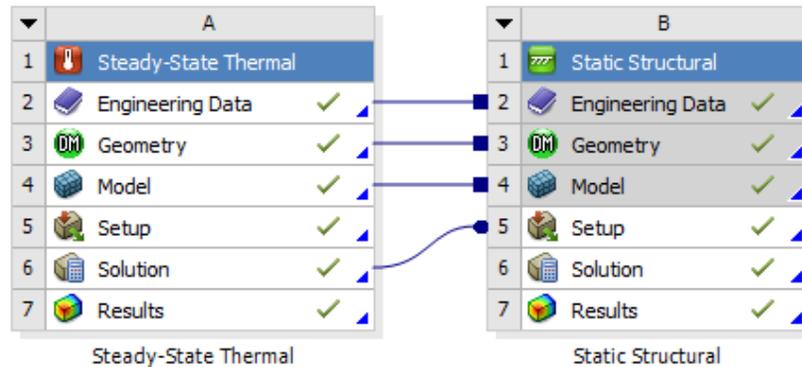


Figura 3.4. Módulos a utilizar en la simulación.

3.2. Procedimiento para la simulación mediante ANSYS

3.2.1. Caso 1: Simulación de una tubería enterrada

En el caso de la simulación se tiene como enfoque ver el efecto que tiene el terreno en la tubería cuando trata de expandirse debido al cambio de temperatura. Debido al caso específico que se modelará.

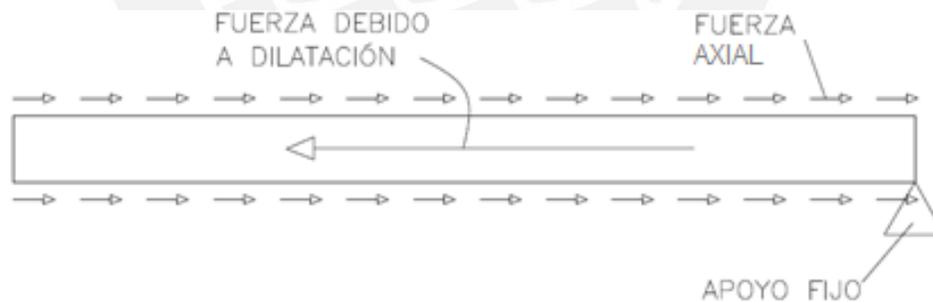


Figura 3.5. Modelo del problema.

3.2.1.1. Enunciado del problema

En este caso se analizará a la tubería de transporte de gas natural enterrada a 1.2 metros de profundidad con una longitud de 70 metros entre extremos. El tubo de acero corresponde a un API X-52 de 609.6 mm de diámetro y 9.52 mm de espesor. El terreno será modelado con los resortes calculados en capítulo 3 correspondiendo a un suelo cohesivo, con un ángulo de fricción de 30°. El salto de temperatura será de 30 grados centígrados.

3.2.1.2. Resultados del cálculo analítico

Usando el procedimiento explicado en capítulos anteriores se obtiene los siguientes datos los cuales se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Cuadro de parámetros calculados.

Tubería de 70 metros			
	Símbolo	Unidad	
Fuerza máxima en el resorte axial	t_u	kN	124.9
Desplazamiento limite axial	Δt_u	mm	8
Fuerza máxima en el resorte lateral	P_u	kN	299.94
Desplazamiento limite lateral	Δp	mm	60.2
Fuerza máxima superior en el resorte vertical	Q_u	kN	185.4
Desplazamiento limite vertical superior	Δd	mm	180
Fuerza máxima superior en el resorte inferior	Q_d	kN	757
Desplazamiento limite vertical inferior	Δd	mm	122
Longitud virtual entre apoyos	L_v	m	50
Fuerza axial en el apoyo	F_a	kN	1312.7
Esfuerzo térmico axial	σ_t	Mpa	72

3.2.1.3. Modelación de la tubería

Tomando los datos anteriores se modela la tubería de acuerdo a los parámetros geométricos dados, especialmente la longitud virtual entre apoyos ya que es la base para realizar el cálculo de cargas y esfuerzos realizados por la dilatación. La tubería a modelar corresponde a un tubo de acero con los parámetros en la tabla 3.2, los datos deben ser

corroborados en la pestaña “Engineering Data” dentro del módulo donde se trabaja para que se obtenga un resultado correcto.

Tabla 3.2. Propiedades de la tubería

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	kg/m ³	7850
Módulo de elasticidad	Pa	2.00E+11
Esfuerzo de fluencia	MPa	360
Coefficiente de dilatación térmica	1/C°	1.20E-05

Debido a que los resortes a utilizar son posicionados a cada metro de tubería se crea como sketch una serie de líneas con la longitud de un metro unido entre sí, esto es para obtener los nodos necesarios en la simulación y colocar los resortes en la posición correcta. Es necesario dibujar manualmente cada metro del tubo pero es posible agilizar esto si es que se copia un tramo y se pega de forma seguida. Este proceso se va a hacer hasta obtener como distancia total la longitud virtual entre apoyos calculada, sin embargo es probable que se incremente esta longitud debido a las limitaciones del método de simulación. El procedimiento para saber si la longitud es la correcta es la de probar con cierta distancia mayor a la de cálculo e ir analizando la fuerza axial en el apoyo, cuando se obtenga cierta convergencia entonces se puede tomar esa longitud como la longitud a usar.

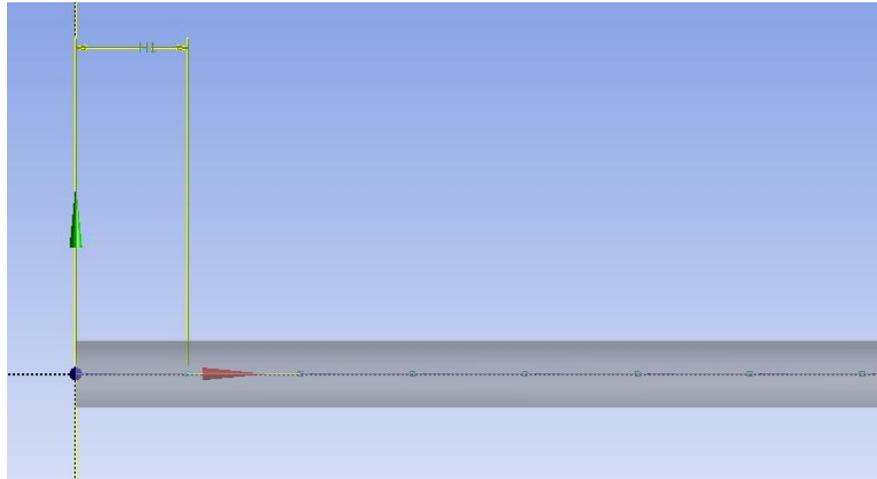


Figura 3.6. Ejemplo visual de las líneas de un metro unidas entre sí.

El siguiente paso es tomar los datos de diámetro y generar una sección tubular para generar a lo largo de la línea una tubería con los parámetros geométricos que se requiere. Con esto ya se puede generar todo el tubo para realizar la simulación numérica.

Details View	
Details of CircularTube2	
Sketch	CircularTube2
Show Constraints?	No
Dimensions: 2	
<input type="checkbox"/> Ri	0.30074 m
<input type="checkbox"/> Ro	0.30465 m
Edges: 2	
Full Circle	Cr193
Full Circle	Cr194
Physical Properties: 10	
A	0.0074364 m ²
Ixx	0.00033574 m ⁴
Ixy	0 m ⁴
Iyy	0.00033574 m ⁴
Iw	2.8528e-012 m ⁶
J	0.00066963 m ⁴

Figura 3.7. Parámetros geométricos del tubo en Ansys.

Este tubo fue modelado usando el elemento PIPE288 que se usa principalmente para modelar tuberías de espesor delgado. Se está usando como un elemento lineal y posee seis grados de libertad en cada nodo, es recomendado usarlo en aplicaciones donde se tienen grandes longitudes sometidas a esfuerzos lineales como en este caso.

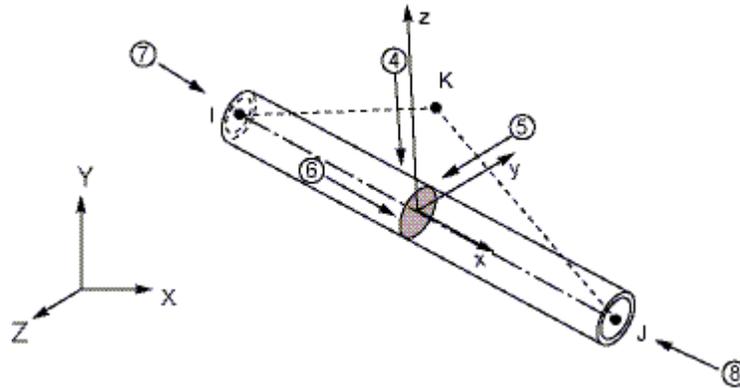


Figura 3.8. Elemento PIPE288. (Ansys manual)

Para asegurarse que se está usando el elemento PIPE288 es necesario verificar que el tipo de modelo usado en la pestaña Geometry – Line Body. Esto está en la ventana del modelo y no en la ventana anterior donde se ingresan los parámetros geométricos del tubo.

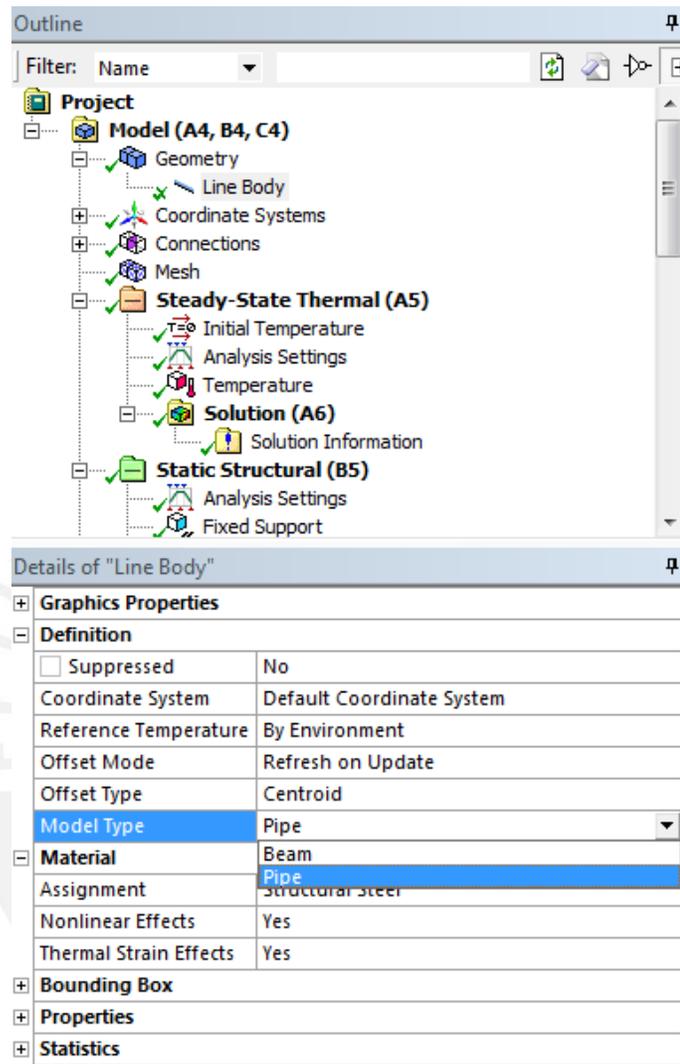


Figura 3.9. Cambio al elemento pipe en ANSYS workbench.

El último detalle a realizar para la preparación de la simulación de lo que concierne el tubo es agregar el apoyo fijo en un extremo. Dentro del módulo de análisis estructural estático se añade una conexión fija que representa el único apoyo dentro del caso de estudio.

3.2.1.4. Modelación del terreno:

El programa Ansys contiene una lista de elementos los cuales ayudan para la rápida configuración del problema. Como se ha explicado antes se necesita configurar el efecto del suelo alrededor de la tubería mediante resortes en los tres sentidos del espacio. En

este caso se necesita de resortes con la propiedad de ser plásticos e inelásticos, es decir que su comportamiento no se lineal si no que variable debido a que el terreno no regresa a su posición inicial cuando se deforma como lo haría un resorte normal. Ansys proporciona el elemento COMBIN39 el cual tiene el comportamiento de un resorte pero con la propiedad de poder ser inelástico.

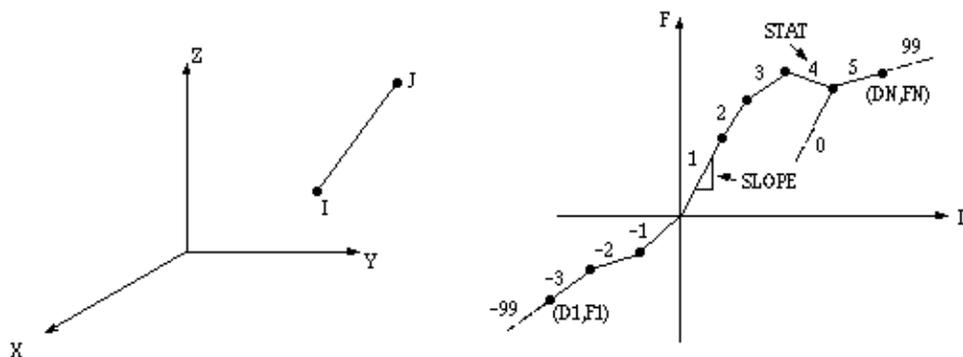


Figura 3.10. Comportamiento y posición del elemento COMBIN39. (Ansys manual)

El elemento COMBIN39 tiene la capacidad de combinar efectos de inelasticidad y amortiguamiento, por eso el nombre contiene una variación de la palabra combinación. Es además un elemento unidireccional con la capacidad de tener cargas en cualquiera de los tres sentidos. Además tiene la capacidad de soportar grandes desplazamiento si es que el modelo lo requiere.

Para programar dicho elemento es necesario tener los parámetros de todos los resortes que se requieran simular. Debido a las facilidades que las nuevas versiones del programa Ansys es posible configurar el elemento mediante la interfaz gráfica.

Details of "Longitudinal - Ground To Line Body"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
Type	Longitudinal
Spring Behavior	Both
Longitudinal Stiffness	Tabular Data
<input type="checkbox"/> Longitudinal Damping	0. N·s/m
Preload	None
Suppressed	No
Spring Length	1. m
- Scope	
Scope	Body-Ground
- Reference	
Coordinate System	Global Coordinate System
Reference X Coordinate	1. m
Reference Y Coordinate	0. m
Reference Z Coordinate	0. m
Reference Location	Click to Change
Behavior	Deformable
Pinball Region	All
- Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Direct Attachment
Scope	1 Vertex
Body	Line Body

Figura 3.11. Parámetros del resorte inelástico.

Para la referencia geométrica del resorte se usa el modo "Body-Ground" el cual permite conectar un extremo del resorte a otro elemento (en este caso en un nodo de la tubería) y el otro extremo a un punto fijo cuyas coordenadas se deben dar. Este último punto también define la longitud del resorte el cual solo debe cumplir la condición de ser las largo que la condición de desplazamiento del terreno y la deflexión máxima del tubo.

Lo más importante del elemento de resorte es su gráfica de fuerza versus desplazamiento. En el capítulo anterior se obtuvo una gráfica con las curvas que teóricamente acercan el comportamiento del terreno. Los datos de desplazamiento máximo tanto en compresión como tracción así como las fuerzas máximas en los dos sentidos en los que se mueven los resortes son la información necesaria para la

configuración. En el apartado llamado “Stiffness” o rigidez en español se elige ingresar la data por medio de tabla.

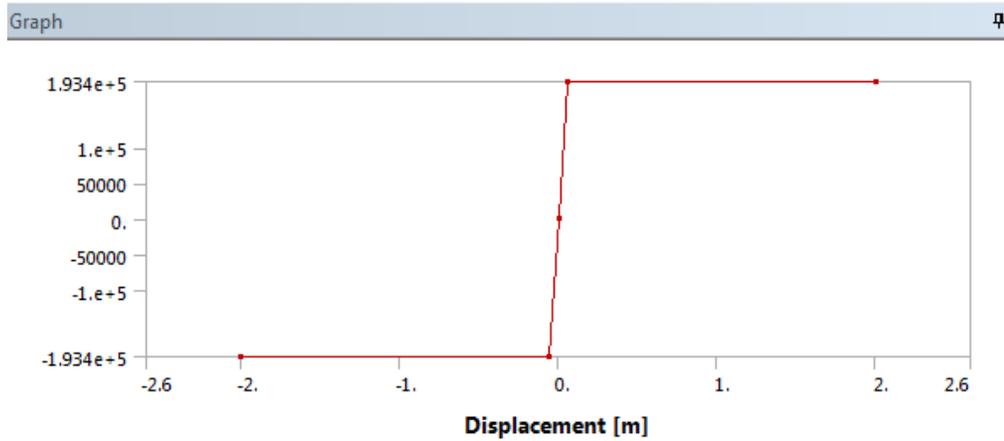


Figura 3.12. Curva desplazamiento vs fuerza del resorte lateral.

Tabular Data		
	Displacement [m]	<input checked="" type="checkbox"/> Force [N]
1	-2.	-1.934e+005
2	-6.e-002	-1.934e+005
3	0.	0.
4	6.e-002	1.934e+005
5	2.	1.934e+005
*		

Figura 3.13. Tabla con la información del resorte.

Luego de realizar todos este procedimiento es necesario realizar copias de un resorte y conectarlos a cada nodo que existe en la longitud del tubo. Hay que notar el sentido del resorte mediante la interfaz donde se muestran los parámetros geométricos ya que se requiere posicionar el elemento de resorte a lo largo del eje que le corresponde y en el sentido correcto.

3.2.1.5. Condiciones térmicas:

Para simular las condiciones de temperatura del caso a estudiar se va a usar el módulo de “Steady-State Thermal” o análisis térmico en estado estacionario. Este paquete es capaz de determinar temperaturas, gradientes de temperaturas, flujos de calor, etc.

En el caso de la tubería se propondrá analizar el caso en dos instantes, inicialmente cuando la temperatura corresponde a los grados cuando se realiza la instalación del tendido y otro instante cuando se llega a cierto valor de temperatura ya en una operación normal.

Para esto ingresara un parámetro de entorno de temperatura la cual diferirá de la temperatura inicial programada. Esta temperatura debe ser aplicada en toda la longitud de la tubería por lo que es necesario seleccionar cada porción de tubo.

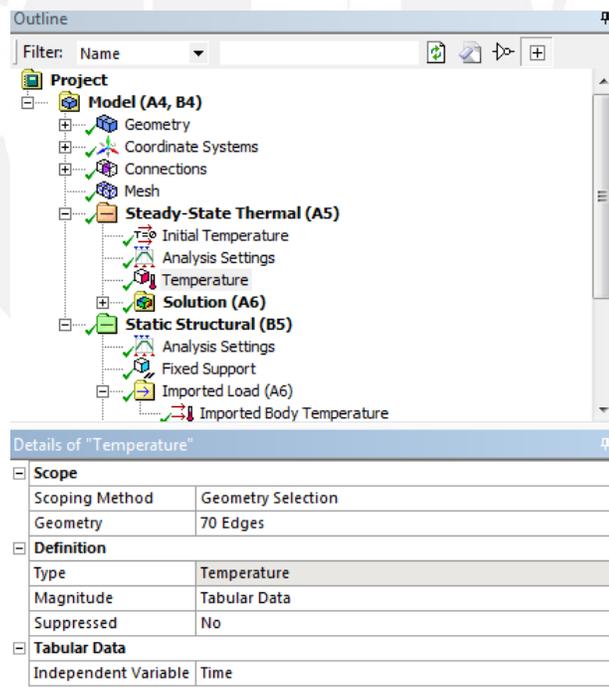


Figura 3.14. Detalle del parámetro de temperatura.

	Steps	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Temperature [°C]
1	1	0.	25.
2	1	1.	55.
*			

Figura 3.15. Tabla con las temperaturas programadas.

3.2.2. Caso 2: Modelación de una tubería con cambio de dirección

En este caso, el objetivo es modelar una tubería en forma de L, verificando que la longitud del tramo BC no falle en el sistema, comparando los datos de cargas y esfuerzos con los datos obtenidos mediante el método analítico explicado anteriormente.

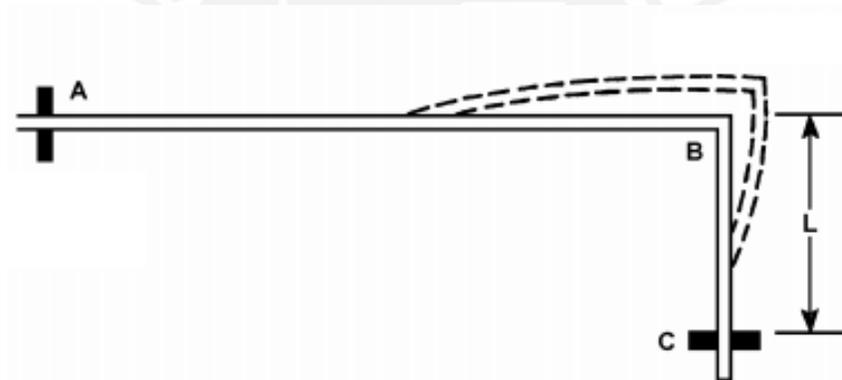


Figura 3.16. Modelo del problema.
Fuente: ASHRAE (2000).

3.2.2.1. Enunciado del problema

Al aire libre, se analizará una tubería de transporte de gas natural cuyo tramo AB de 200 metros está a profundidad. El tubo es de acero API X-52, de 609.6 mm de diámetro y 9.52 mm de espesor. El salto de temperatura será de 25 grados centígrados.

3.2.2.2. Resultados del cálculo analítico

De la misma manera que el caso anterior, se muestran en la Tabla 3.3 algunos valores importantes para la simulación o comparación obtenidos mediante cálculo.

Tabla 3.3. Cuadro de parámetros calculados para el caso 2

Tubería en forma de L			
	Símbolo	Unidad	
Dilatación térmica del tramo AB	γ	m	0.06
Longitud BC	L_{bc}	m	8
Esfuerzo en el tramo BC	σ_{eq}	MPa	171
Fuerza máxima transversal en el tramo BC	P	kN	56.5

3.2.2.3. Modelación de la tubería y las condiciones térmicas

Los parámetros de la tubería van a ser los mismos que se utilizaron en el caso anterior, y se presentan resumidos en la Tabla 3.2.

La modelación de este caso se realiza dibujando una línea con las medidas geométricas del tubo a estudiar; es necesario que se asigne a la sección correcta con las dimensiones necesarias y aplicarlas en toda la longitud. El elemento utilizado es el PIPE 288, el mismo que se usó en el caso de una tubería enterrada, por lo que tiene las mismas propiedades ya explicadas en subcapítulos anteriores.



Figura 3.17. Esquema del caso a estudiar.

Para usar el elemento PIPE 288 se tiene que cambiar el tipo de modelo en la pestaña Geometry dentro de la ventana del Solver mecánico. Este proceso puede verse en la Figura 3.9 mostrada anteriormente.

De la misma manera que en el caso anterior de tubería enterrada, se configuran a través del módulo Steady State Thermal las temperaturas necesarias al tramo de tubería requerido (véase la Figura 3.18). Mediante el módulo de Static Structural se colocan los apoyos fijos en los extremos A y C, como en la Figura 3.19.

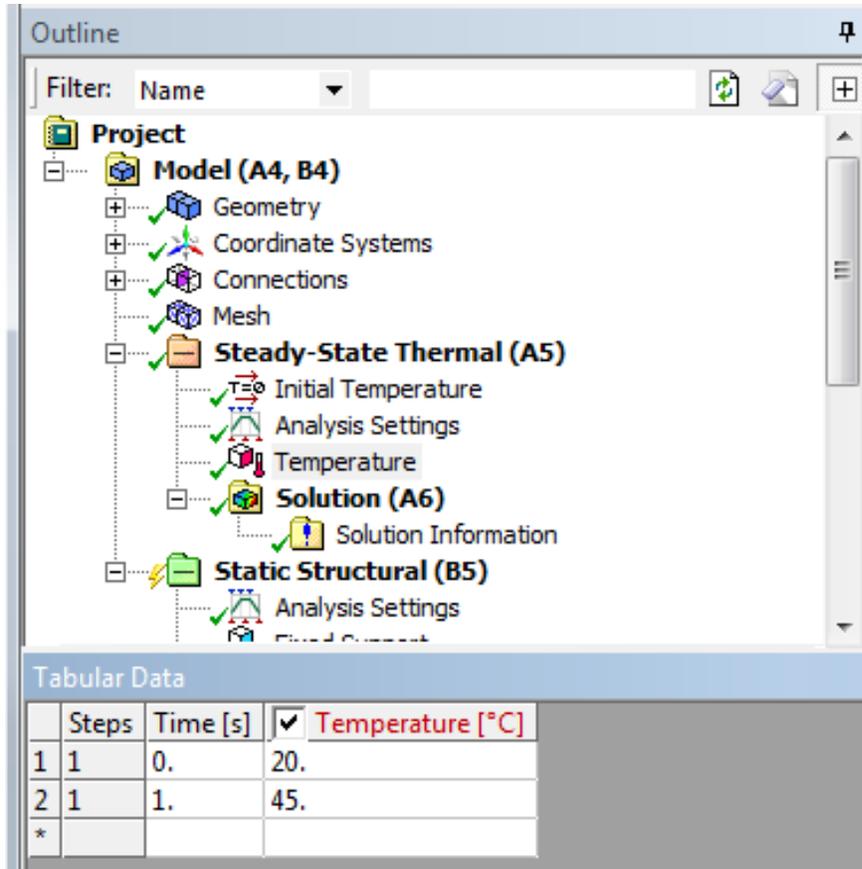


Figura 3.18. Configuración de la temperatura.

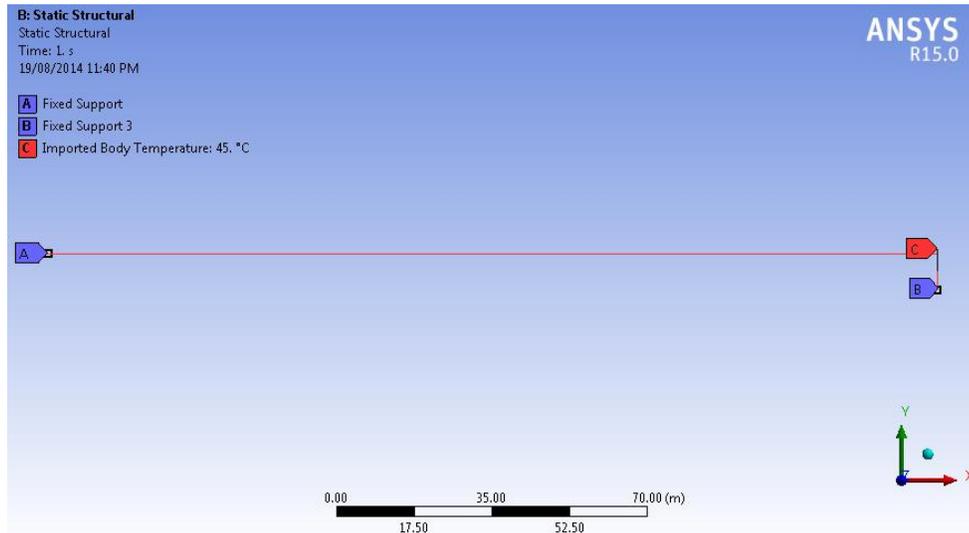


Figura 3.19. Esquema con apoyos de la tubería.

Es necesario configurar el programa para que dé las soluciones necesarias en el cuadro de solución del programa ANSYS. Para obtener los datos necesarios, es recomendable cargar el programa con los parámetros mostrados en la Figura 3.20.

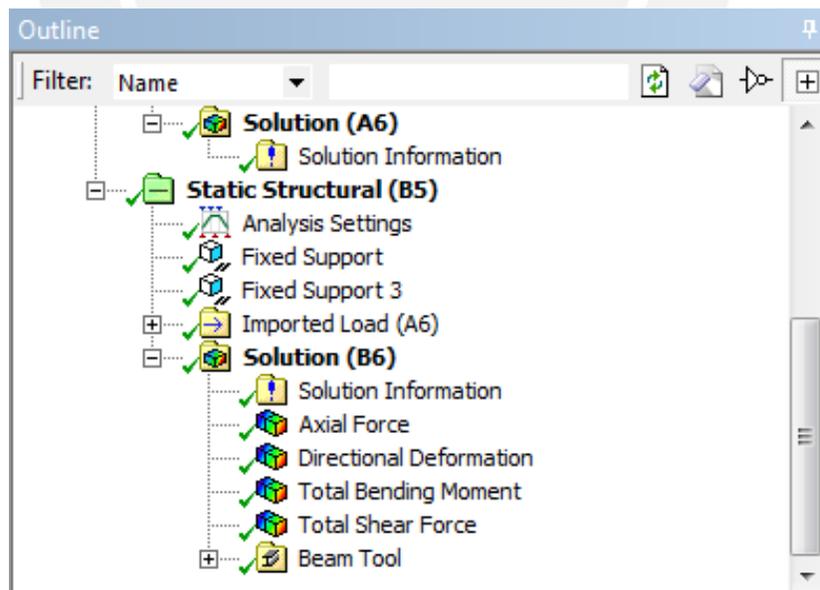


Figura 3.20. Cuadro de solución.

3.2.3. Caso 3: Modelación de una tubería enterrada con cambio de dirección

Ahora se procederá con el caso de una tubería en forma de L enterrada. El objetivo es verificar las fuerzas que actúan en el tramo BC, comparando los datos de cargas y esfuerzos con los datos obtenidos mediante el método analítico (véase la Figura 3.21), desarrollado en el capítulo anterior.

3.2.3.1. Enunciado del problema

En este caso se analizarán tres arreglos de la tubería de transporte de gas natural enterradas a una profundidad de 1.2 m con arena. Lo que se variará en cada simulación será longitud del tramo AB, y se analizará una distancia de 35, 70 y 100 metros. El tramo BC será de 25 metros. El tubo es de acero API X-52, de 609.6 mm de diámetro y 9.52 mm de espesor. El salto de temperatura será de 25 °C.

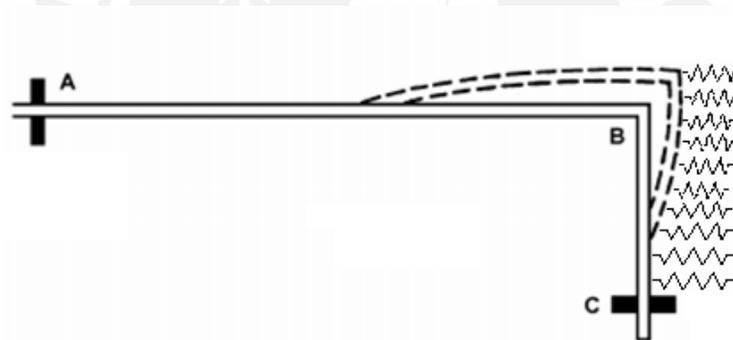


Figura 3.21. Modelo del problema.
Fuente: ASHRAE (2000).

3.2.3.2. Resultados del cálculo analítico

Como en el caso anterior, se muestran en la Tabla 3.4 algunos valores importantes para la simulación o comparación obtenidos mediante cálculo. Hay que notar que se muestran dos condiciones para cada longitud de tubería relacionados con las fuerza del terreno: primero se considerará que la fuerza axial de fricción actúa en toda la longitud de la tubería, y luego que actúa solo en el 50% de la longitud. La explicación de esta corrección se ofrece en el capítulo anterior.

3.2.3.3. Modelación de la tubería y resortes, y de las condiciones térmicas

La modelación del tubo en forma de L se realiza con las medidas geométricas; la sección es la misma que se usó anteriormente. El proceso se hace dibujando línea por línea de un metro y luego se asigna una sección de tubo; esto para crear los nodos necesarios para ubicar los resortes necesarios. El elemento usado es el PIPE 288, ya utilizado por su comportamiento parecido al real (para más información, revisar el modelamiento de la tubería en el caso 1 y 2).

Tabla 3.4. Cuadro de parámetros calculados para el caso 3

Tubería enterrada en L				
	Longitud AB (m)	Dilatación en B (m)	Momento en B (kNm)	Esfuerzo en BC (Mpa)
Sin corrección	35	0.0061	92.6	35.1
	70	0.0044	67.2	25.5
	100	0	0	0
Corrección de 50%	35	0.008	121.1	45.9
	70	0.0115	174.6	66.1
	100	0.0116	175.2	66.3

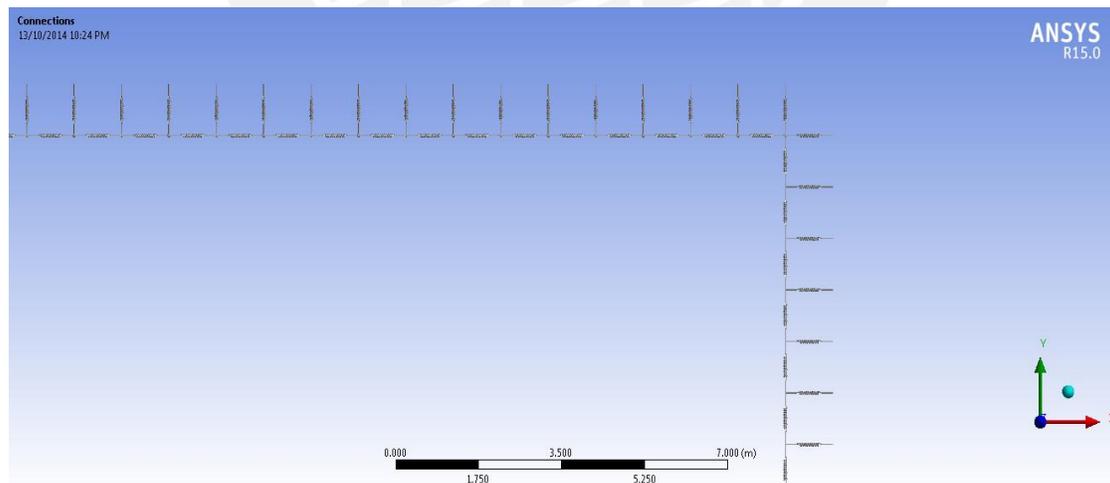


Figura 3.22. Esquema del caso con los resortes.

Los resortes utilizados usan los datos de la Tabla 3.5. En la programación de su comportamiento se utilizará el elemento COMBIN 39, considerando sus propiedades de

fuerza y dilatación (se pide leer el subcapítulo donde se da el procedimiento para modelar este elemento).

Tabla 3.5. Parámetros del suelo para el caso 3

Suelo	Dirección del resorte	Máxima resistencia del terreno (kN/m)	Desplazamiento para la resistencia máxima (mm)
Arena	Axial	$t_u = 11.68$	$\Delta t_u = 5$
	Lateral	$P_u = 86.03$	$\Delta p = 60.2$

Lo que sí se tiene que tener en cuenta es la posición de los resortes en el tramo BC. En el caso anterior, en la dirección x del programa ANSYS, se posicionaban los resortes axiales debido al cambio de dirección en dicho tramo; ahora se tiene que poner en esa dirección los resortes laterales. Este paso es crítico para obtener un correcto comportamiento.

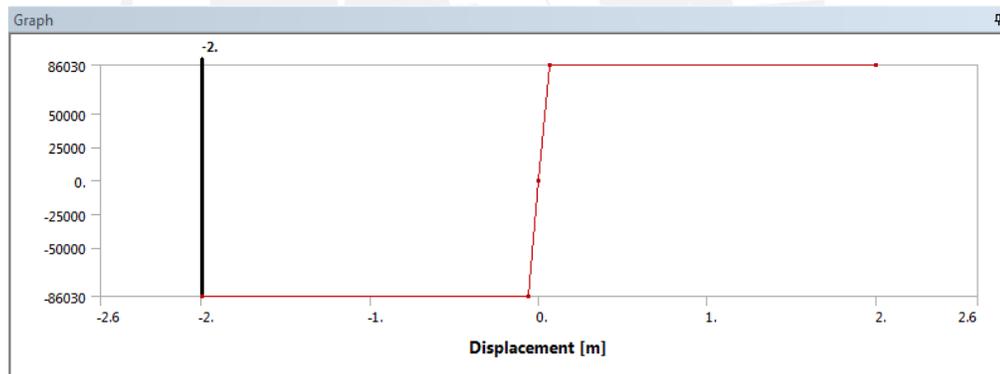


Figura 3.23. Programación del resorte lateral en ANSYS.

Tabular Data		
	Displacement [m]	Force [N]
1	-2.	-86030
2	-6.e-002	-86030
3	0.	0.
4	6.e-002	86030
5	2.	86030

Figure 3.24. Tabla de datos de los resortes en ANSYS.

Ahora se hará uso del módulo Steady State Thermal para programar las temperaturas necesarias, insertando las condiciones del problema; es decir, el salto de temperatura. El módulo de Static Structural se usará para programar los resortes y colocar los apoyos fijos en los extremo A y C (véase la Figura 3.25). Estos últimos pasos están explicados con mayor profundidad en los subcapítulos anteriores.

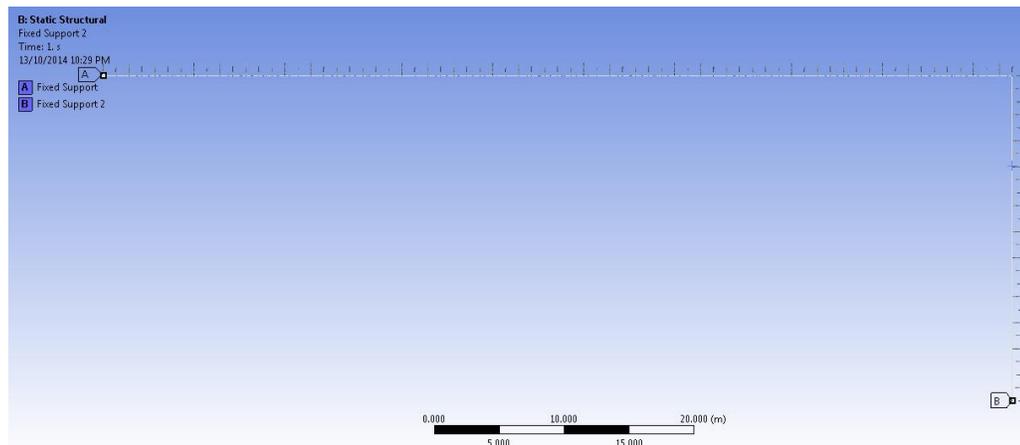


Figura 3.25. Configuración de los apoyos fijos.

Finalmente se procede a configurar las soluciones que se requieran en el recuadro de solución del programa Ansys. En este caso se quiere ver más que todo la dilatación en x del tubo, momento y esfuerzo en tramo BC.

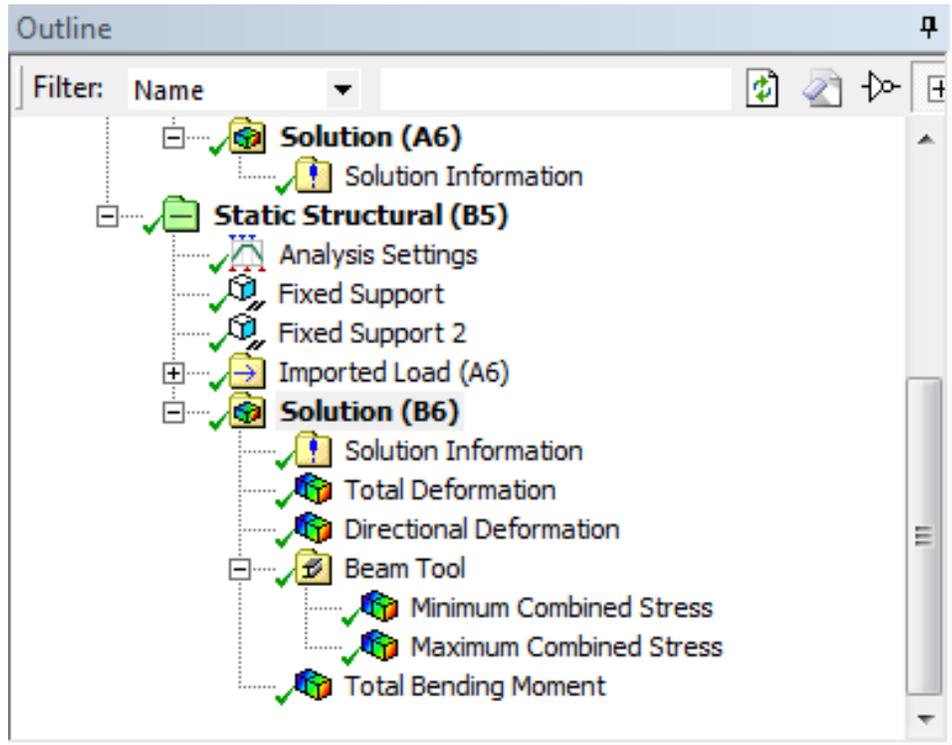


Figura 3.26. Cuadro de solución.

3.3. Comparación de resultados

Luego de dejar correr correctamente las simulaciones se procede a ver en la pestaña de solución cada parámetro, interpretar los valores y así comparar con los diferentes métodos existentes.

3.3.1. Caso 1: Dilatación térmica en tubería enterrada

Luego de haber realizado la simulación se obtiene los resultados numéricos necesarios para hacer la comparación con los datos obtenidos por métodos analíticos y para observar fenómenos de comportamiento del terreno en el caso de la dilatación de la tubería enterrada.

En la siguiente figura se ve la distribución de las fuerzas axiales generadas en la dilatación. Teóricamente la tubería no debería presentar ningún tipo de elongación debido a que la fuerza de fricción equivale a la fuerza generada por el cambio de temperatura sin embargo para que el terreno presente alguna resistencia al movimiento es necesario que exista una pequeña dilatación. Esta última idea se muestra en los resultados al ver que las fuerzas máximas generadas por los resortes ocurren en el extremo donde no existe un apoyo fijo y donde ocurriría la máxima dilatación debido a la temperatura.

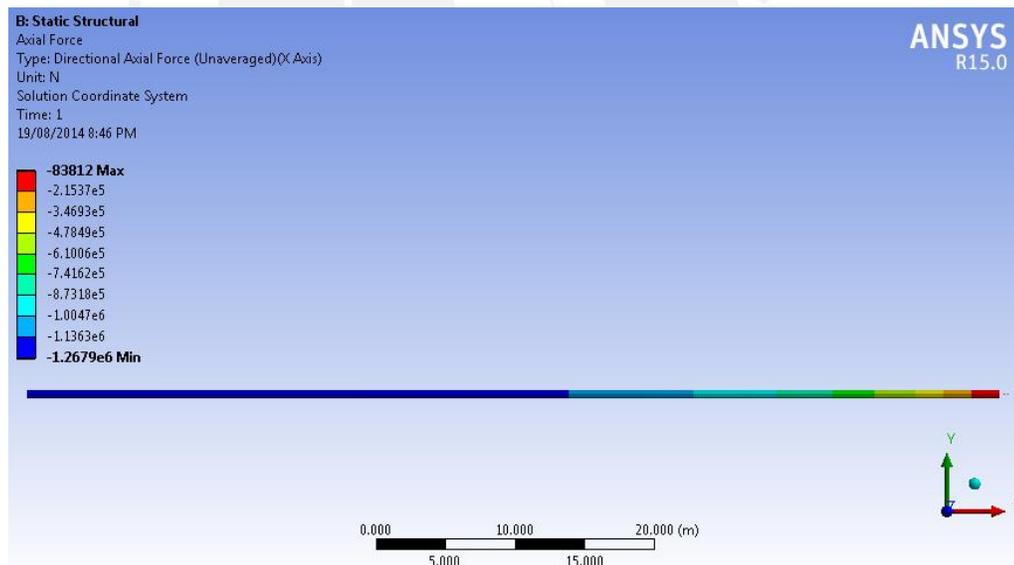


Figura 3.27. Campo de fuerzas en la tubería.

De la misma manera se puede ver que la distribución de esfuerzos a lo largo de la tubería no es constante y se acentúa más a medida que se acerca al extremo fijo. El valor que se obtiene mediante la simulación es 98.24 % del valor calculado lo cual demuestra que la aproximación mediante cálculo es muy buena y válida para usar. Las pequeñas

diferencias que existen cuando se comparan de manera minuciosa cada valor puede ser debido al pequeño desplazamiento que ocurre en la tubería enterrada para que se accione los resortes. Sin embargo se ve que la aproximación es muy cercana por lo que las condiciones asumidas son las correctas.

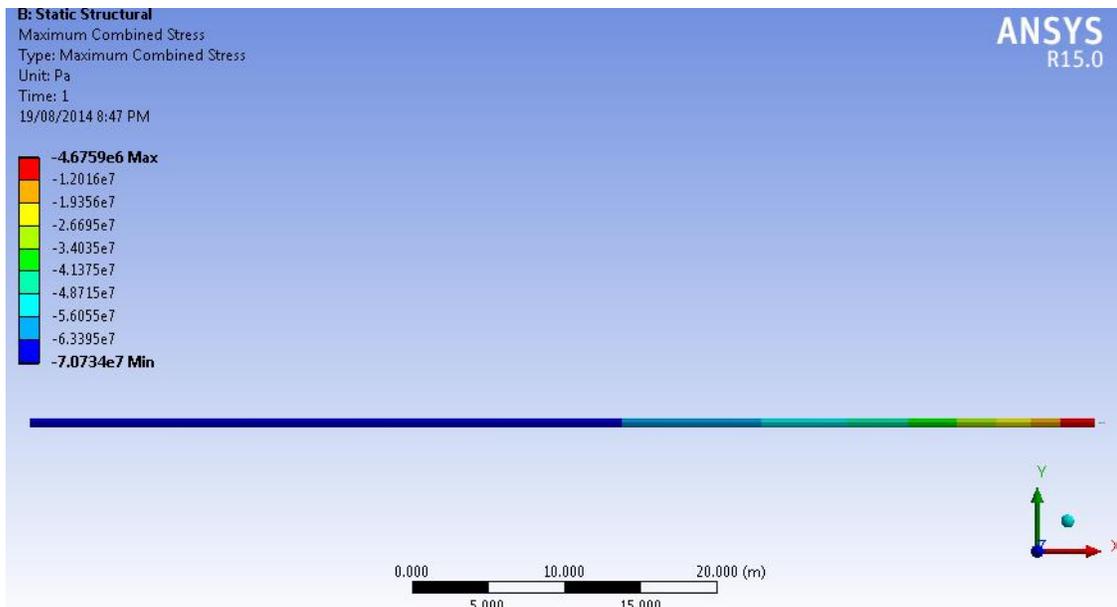


Figura 3.28. Campo de esfuerzos en la tubería.

Finalmente a medida de comparación se revisa el valor de la fuerza de reacción que ocurre en el apoyo fijo ubicado en un extremo de la tubería, el valor de este parámetro debería corresponder a la fuerza de expansión F_a . El valor obtenido por el programa Ansys es aproximadamente el 96.6 % al calculado, valor que corrobora de nuevo el cálculo analítico es bueno. La diferencia que se presenta es probablemente sea debido a las mismas razones a la diferencia en el esfuerzo equivalente en el tubo.

Details of "Force Reaction"	
Definition	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No
Options	
Results	
Maximum Value Over Time	
<input type="checkbox"/> X Axis	1.2679e+006 N
<input type="checkbox"/> Y Axis	0. N
<input type="checkbox"/> Z Axis	0. N
<input type="checkbox"/> Total	1.2679e+006 N

Figura 3.29. Detalle de la fuerza de reacción en el apoyo fijo.

Para visualizar mejor el comportamiento de la fuerza axial generada por el terreno se puede ver el diagrama de fuerzas axiales. En la figura se ve como la carga no es constante a lo largo de la longitud de la tubería por lo que justifica la razón de incrementar la longitud virtual entre apoyos obtenida mediante cálculo directo.

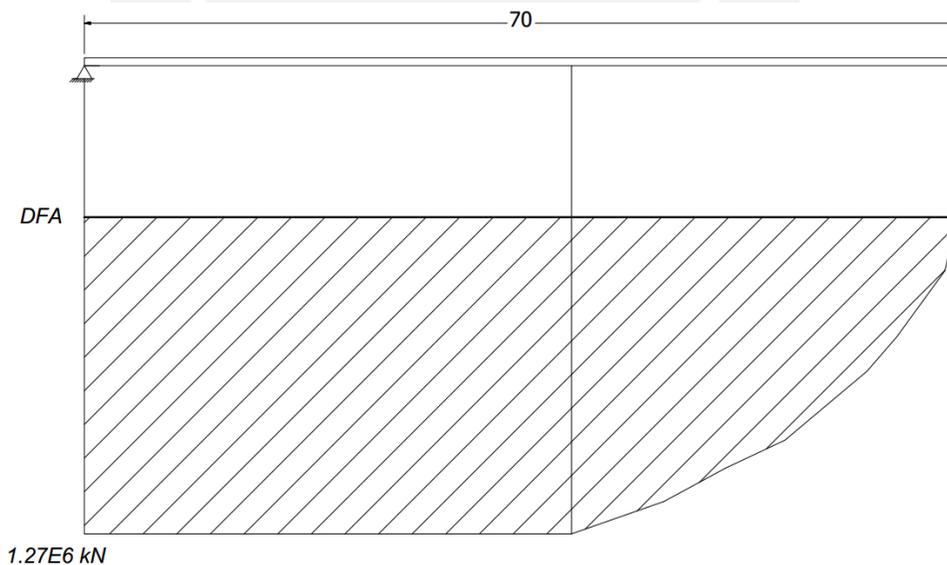


Figura 3.30. Diagrama de fuerzas axiales en una tubería enterrada.

De la misma manera se puede apreciar la dilatación dentro de la tubería para ver cómo se comporta. En el extremo sin apoyo fijo no se tiene mucha resistencia del terreno a comparación del tramo donde se tiene mayor área de fricción. La figura confirma esta afirmación ya que vemos que la máxima dilatación se ve en un extremo y a medida que se tiene mayor área para para la fuerza axial esta dilatación decrece en valor. Esto justifica que se haya trabado con una longitud mayor a la calculada anteriormente.

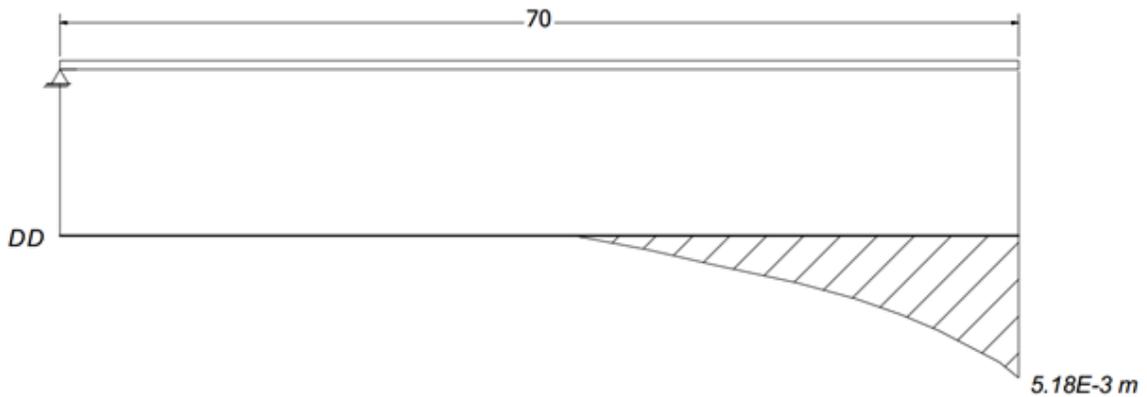


Figura 3.31. Diagrama de dilatación axial en una tubería enterrada.

3.3.2. Caso 2: Dilatación térmica en tuberías con cambio de dirección

En la solución se debe comparar los valores de dilatación, fuerza y esfuerzo obtenido entre la simulación y el método analítico por medio de resistencia de materiales. Se verificará que los resultados por diferentes medios sean aproximadamente iguales para validar los métodos.

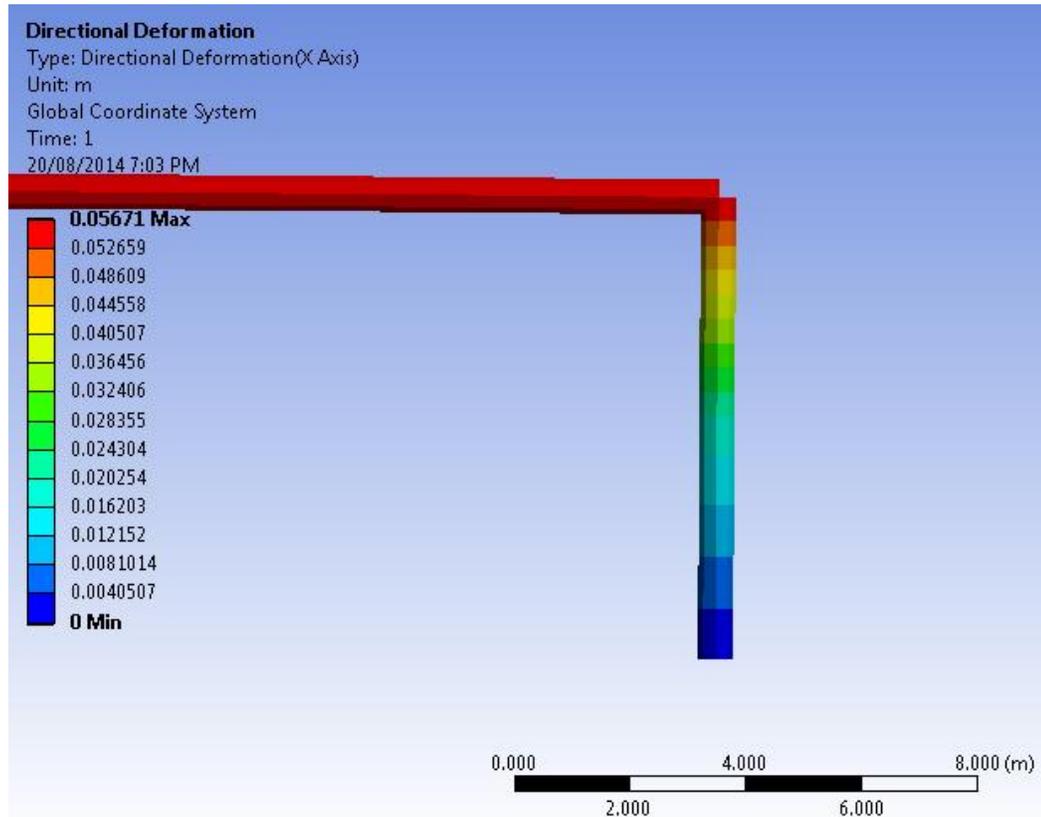


Figura 3.32. Deformación en la dirección axial del tramo AB.

En la figura 3.31, se aprecia una elongación del punto B debido al cambio de temperatura en el ambiente es de unos 0.0567 metros. Este valor corresponde al 94.5% del valor teórico lo cual valida el hecho de asumir que ese extremo se dilata debido a la temperatura como si fuera libre debido a ciertas condiciones del tramo BC. En el caso de que no se tenga valores de dilatación en B aproximadamente iguales entonces es probable que los demás cálculos se invaliden debido ciertos fenómenos que se pueden explicar.

Una de las diferencias puede ser debido a la existencia de un momento en el punto B, esta carga es originada por la forma de la unión de los tramos AB y BC y otras fuerzas originadas en la deformación de la tubería AB. Este momento si lo comparamos con el momento generado en por la fuerza P es muy pequeño por lo es posible no considerarlo en el cálculo.

Segundo puede ser por la flexibilidad que tiene el tramo BC, a medida que la longitud de esta parte de la tubería se acorta aumenta el valor de rigidez del tubo y es más difícil de que se realice una flecha al extremo del tubo. Por esta razón hay que tener consideración en el caso que la longitud BC sea muy corta ya que en ese caso el cálculo analítico pierde exactitud.

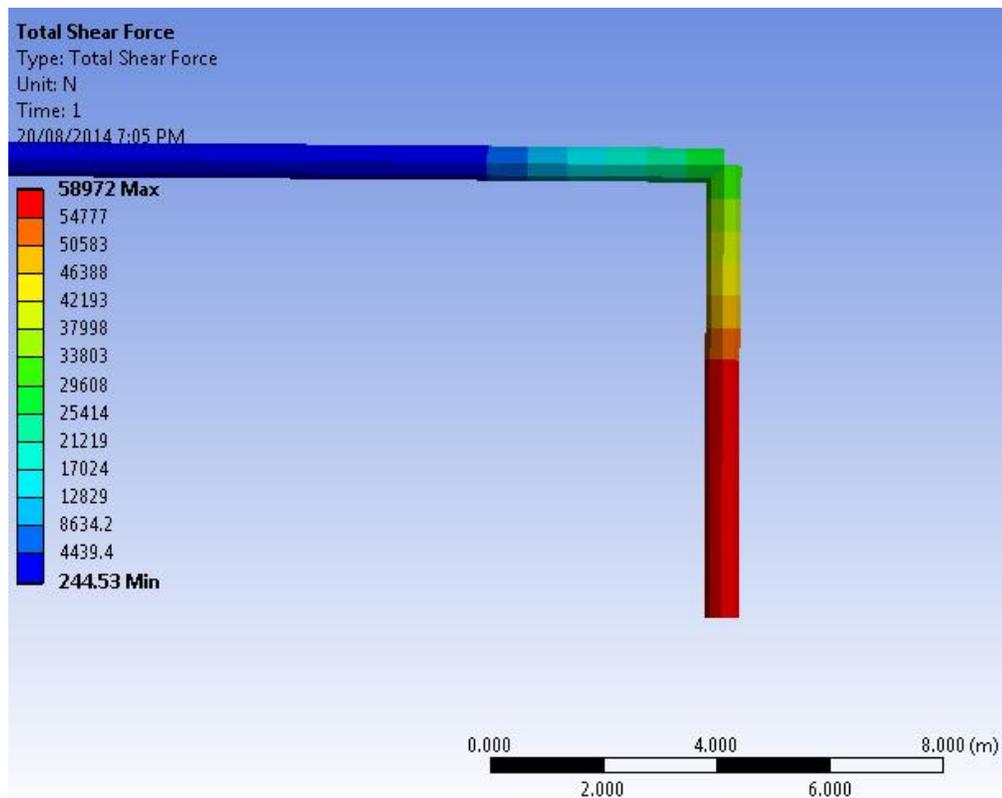


Figura 3.33. Fuerza P en la tubería.

La fuerza transversal en el tramo BC en la simulación es mayor a la calculada, esta última corresponde al 95.9% del valor que se ve en la figura 3.33. Este es el primer índice indica que el cálculo realizado mediante resistencia de materiales es bastante exacto. La pequeña variación en magnitud se debe probablemente a que la fuerza calculada por el programa es obtenida considerando una dilatación menor a la que se tiene mediante calculo analítico, esta última elongación es diferente a cálculo por lo que hay una pequeña

discrepancia que se arrastra desde que se asumió que el desplazamiento en el punto B es igual al que se obtiene en un punto libre.

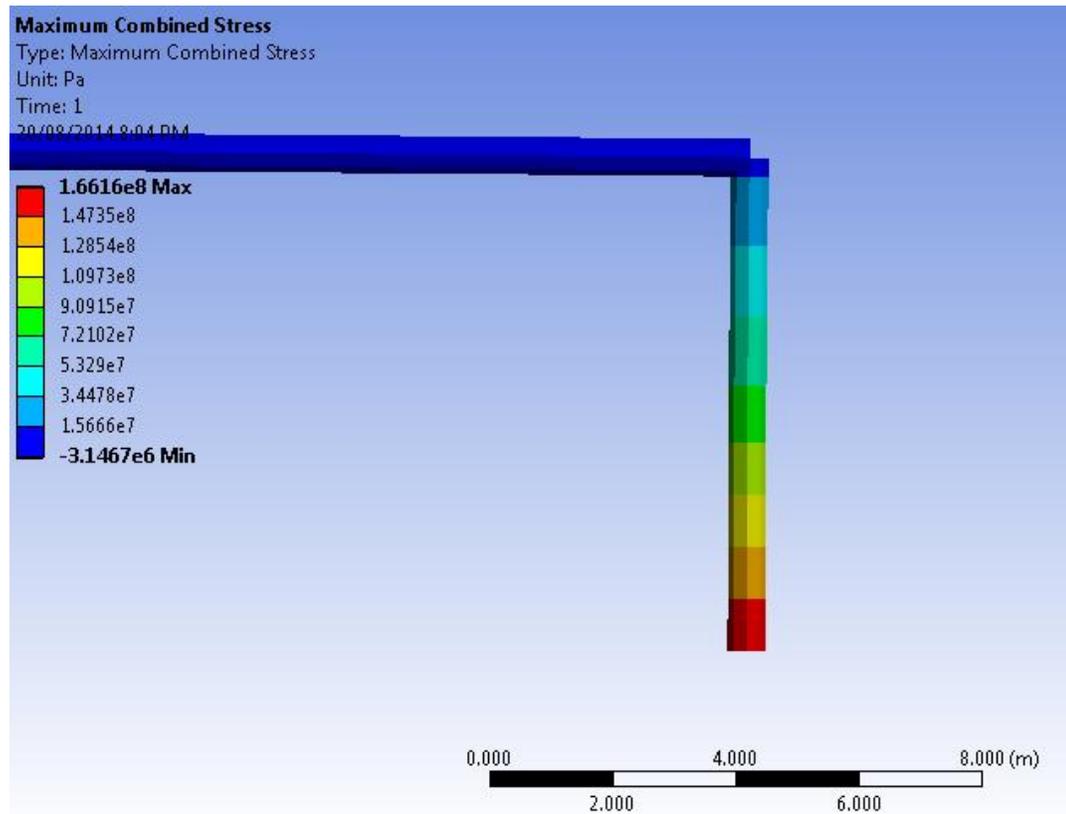


Figura 3.34. Esfuerzo actuante en el tramo BC.

Finalmente se analiza el esfuerzo combinado, en la simulación se ve que en el punto C ocurre el máximo esfuerzo justo como se predijo. En ese punto el valor máximo es de 166 MPa mientras mediante cálculo analítico se obtuvo 171 MPa. El valor de la simulación corresponde al 97% del valor calculado. Esta última afirmación confirma las condiciones asumidas del momento inicial y del desplazamiento del punto B ya que la aproximación obtenida es excelente por ser muy cercana entre sí. La diferencia es probablemente por la combinación de efectos que hacen que los valores antes calculados varíen numéricamente.

3.3.3. Caso 3: Dilatación térmica en tuberías enterradas con cambio de dirección

En este caso se procede a comparar los valores de dilatación, fuerza y esfuerzo obtenido entre la simulación y el método analítico por medio de resistencia de materiales. Se verificara de esta forma lo obtenido. Debido a que se está analizando tres longitudes de AB diferentes se procederá a revisar caso por caso para al final comentar lo nos deja los resultados en conjunto.

3.3.3.1. Longitud de 35 metros

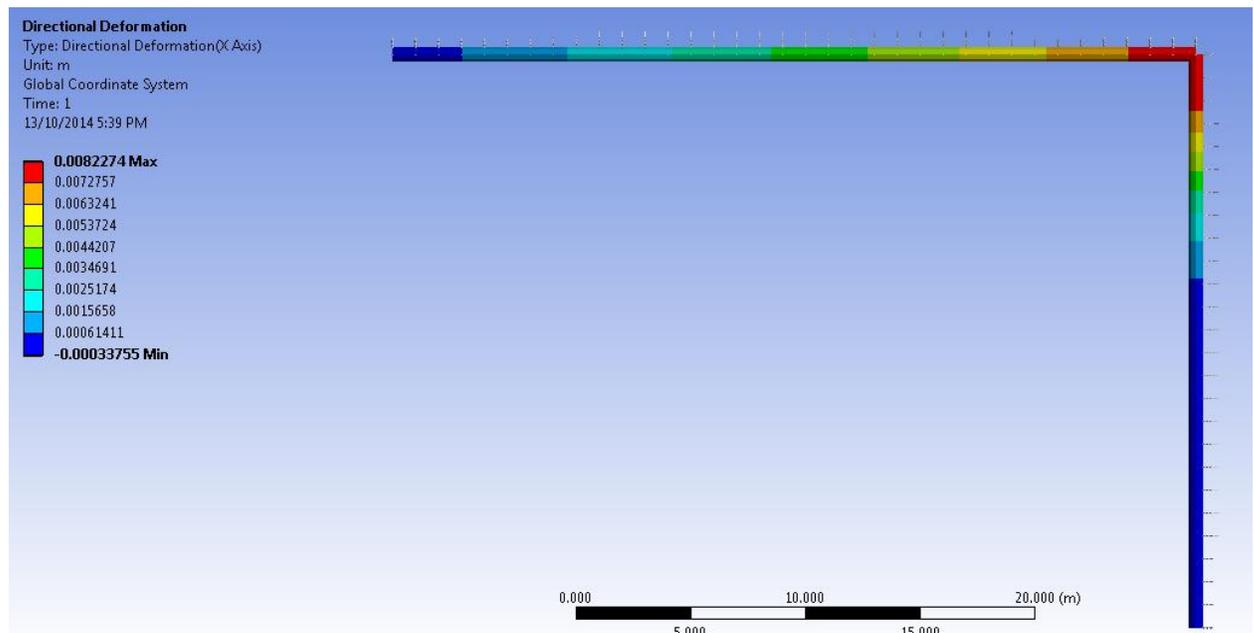


Figura 3.35. Deformación en la dirección axial del tramo AB de 35 m.

Se aprecia en la figura 3.35 una elongación del punto B de 0.00823 metros. Comparándolo con lo obtenido analítico se ve que el cálculo es 74.1% del valor de la simulación con la condición de que la fuerza de fricción actúa en toda la longitud AB, en el caso de considerar que solo actúa la mitad de la fuerza axial de terreno la diferencia es 97.2%. Lo primero que se puede comentar es que cuando se considera una menor fuerza axial el error se acorta, sin embargo esto podría ser solo en este caso por lo que se verificará esta afirmación con las siguientes longitudes. Se ve también que aun así existe un error en el cálculo el cual se puede explicar por la cantidad de condiciones asumidas para estudiar el caso, no se sabe a ciencia cierta la cantidad de error que introduce al

cálculo asumir que el terreno se comporta como un medio elástico o que la representación del terreno sea mediante resortes por lo que siempre hay que esperar que exista una diferencia entre resultados. Sin embargo con lo asumido se ve que lo obtenido no difiere de una gran manera por lo que no se puede descartar el resultado realizado anteriormente.

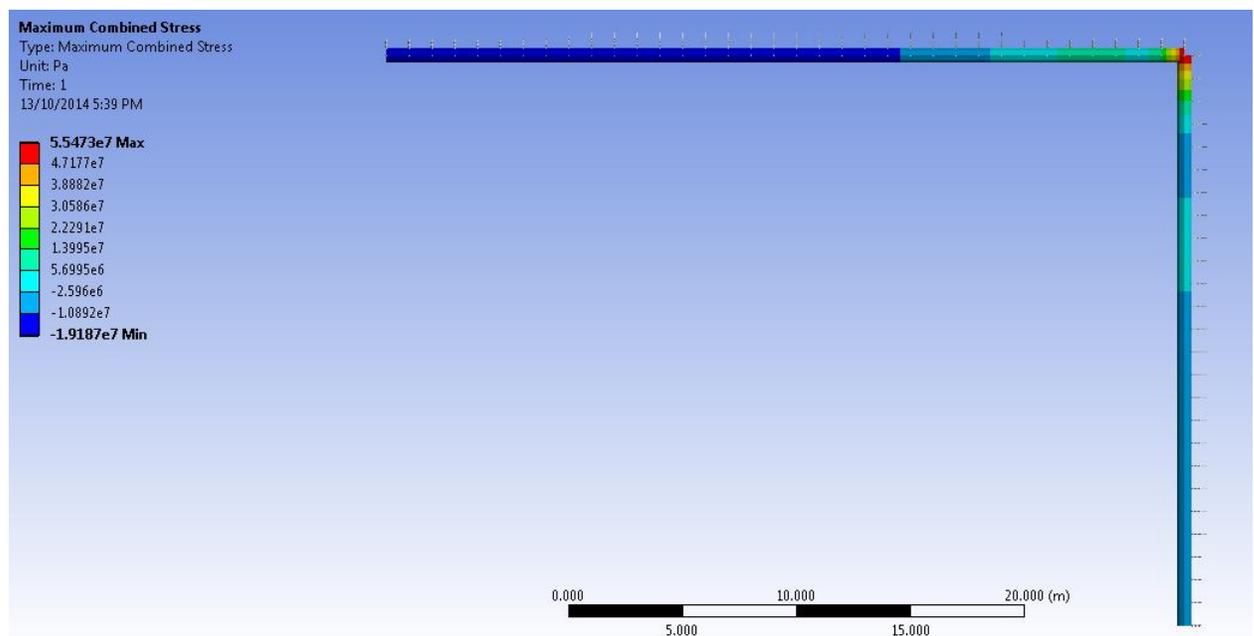


Figura 3.36. Esfuerzo actuante en el tramo BC con la longitud AB de 35 m.

El esfuerzo combinado en la simulación se ve que en el punto B ocurre el máximo esfuerzo como predijo el autor Timoshenko indica que pasa en elementos rodeados por un medio elástico. En el punto el valor máximo es de 55.5 según la simulación, mediante cálculo se obtiene 35.1 para la fuerza axial sin modificar y 45.9 MPa con la modificación. Esto significa que el cálculo de esfuerzos para el primer caso corresponde al 63.2% de la simulación y 82.7% en el segundo caso. Esto indica que el momento actuante en el punto es mayor lo cual es debido a que, como se vio en la gráfica anterior, que la dilatación por simulación es mayor. Esto es una consecuencia de las condiciones nuevamente sin embargo vemos de nuevo que agregar el factor a la fuerza de fricción disminuye la discrepancia, considerando que este factor es un valor asumido mediante lo visto en la

simulación de la tubería enterrada se puede considerar que asumir esta condición por el momento es correcto, sin embargo queda por analizar el valor exacto del factor.

3.3.3.2. Longitud de 70 metros

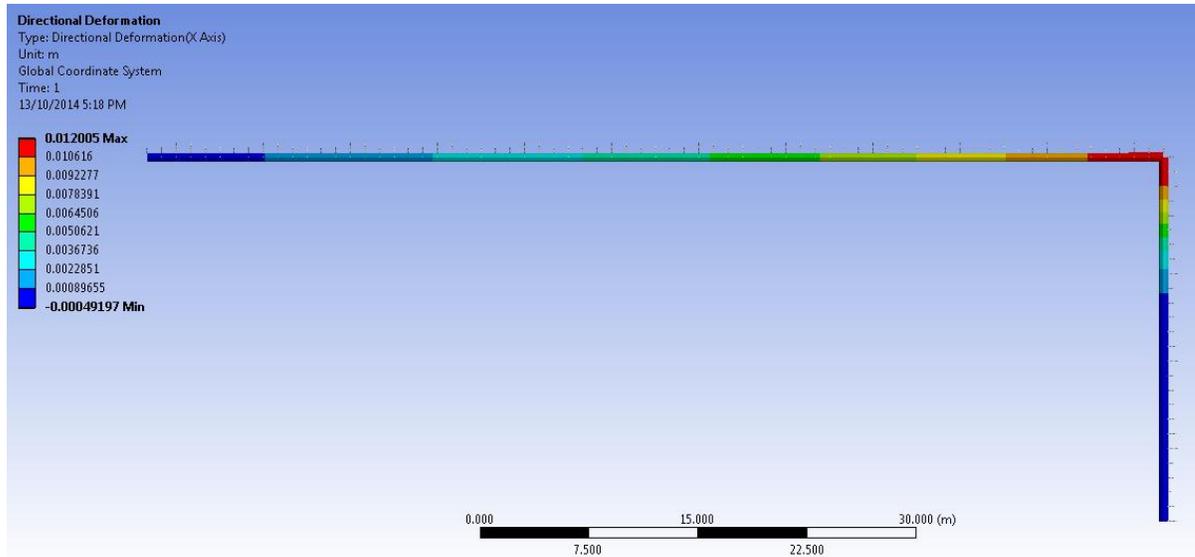


Figura 3.37. Deformación en la dirección axial del tramo AB de 70 m.

Según la simulación la dilatación máxima ocurre donde se predijo y tiene un valor de 0.012 metros. En el cálculo para las dos condiciones explicadas es de 0.0044 metros considerando toda la fricción y 0.0115 metros para el 50% de la fricción. Esto nos da que en el primero la respuesta por Ansys es mayor de doble para el primer caso y en el segundo caso que la dilatación por cálculo es el 95.83% del de Ansys. Esto nos da de nuevo un indicador de que la fuerza de fricción no se puede considerar como constante en toda la longitud, el error con la mitad de dicha fuerza es mucho menor y bastante aceptable para las condiciones dadas.

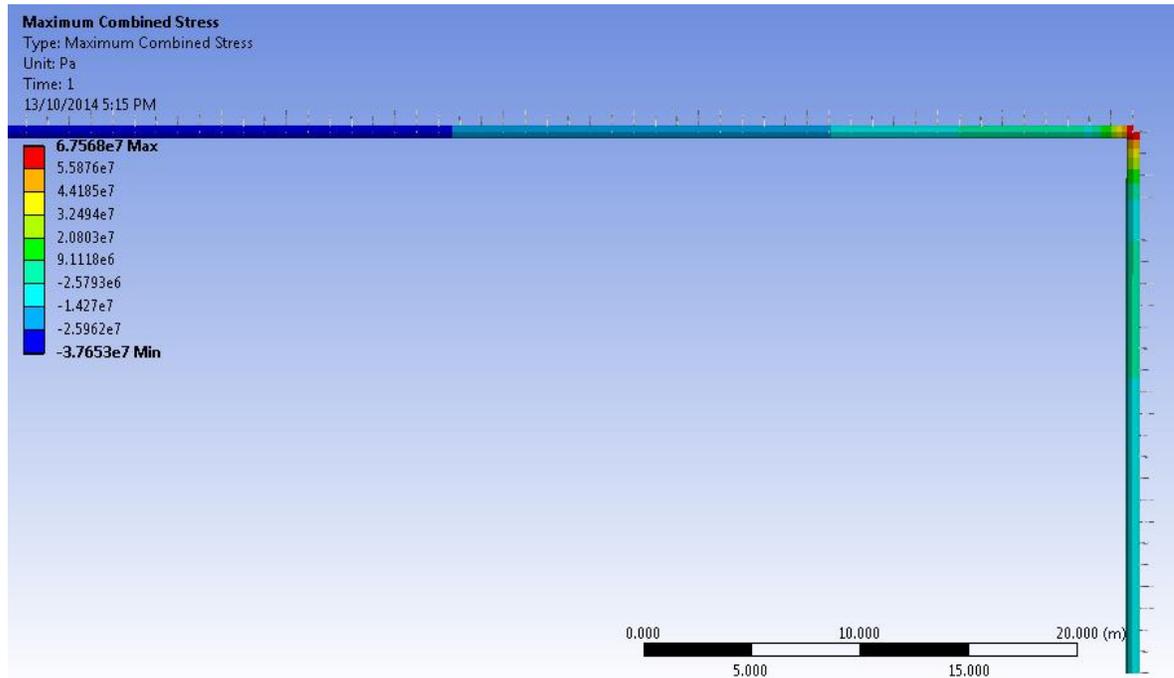


Figura 3.38. Esfuerzo actuante en el tramo BC con la longitud AB de 70 m.

En cuanto el esfuerzo se obtiene mediante Ansys que el valor es de 67.6 MPa, por medio analítico para toda la fuerza axial es de 25.5 MPa siendo 37.7% del valor de la simulación y para la mitad de la fuerza axial se tiene 66.1 MPa siendo 97.8% del valor de Ansys. De nuevo se comprueba que la consideración de la fuerza de fricción tiene menor error al tener una diferencia no tan considerable.

3.3.3.3. Longitud de 100 metros

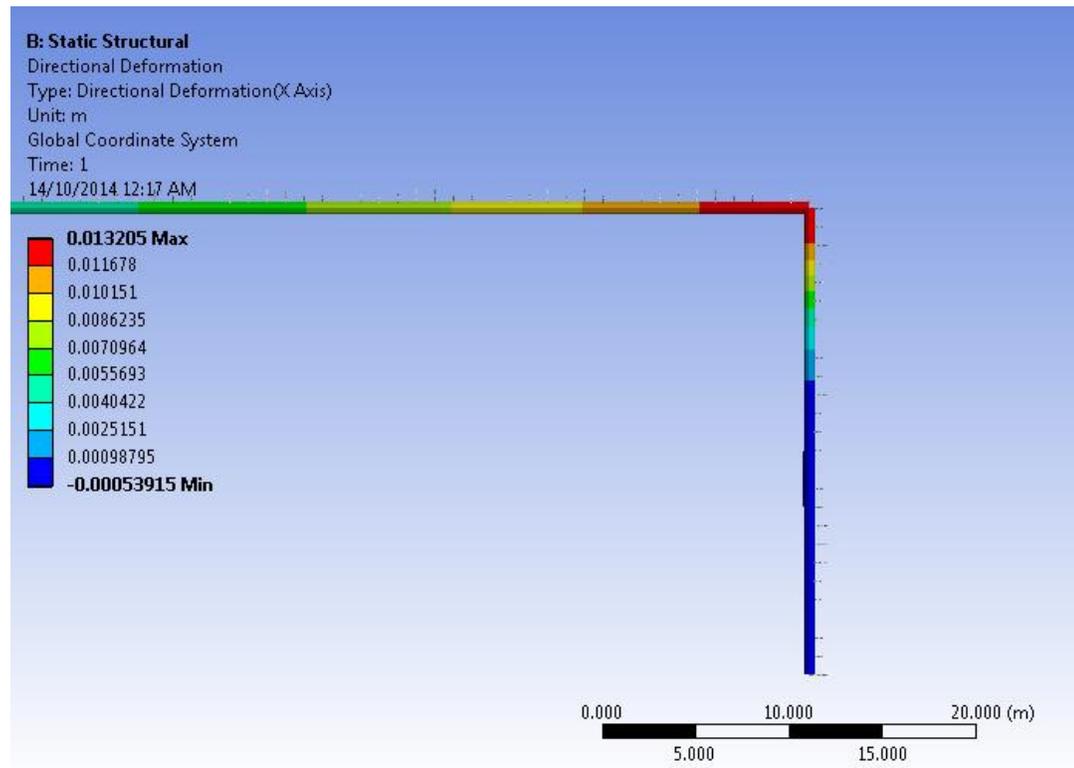


Figura 3.39. Deformación en la dirección axial del tramo AB de 100 m.

Finalmente se obtiene el resultado para la longitud de 100 metros, en este caso la dilatación máxima ocurre en el punto B y es de 0.0132 metros. Lo que sucede a continuación sería comparar los resultados con el resultado analítico considerando toda la fuerza axial, sin embargo teóricamente a los 100 metros la fuerza de fricción es la suficiente para contrarrestar totalmente la dilatación por temperatura por lo que en el tramo BC no tiene ningún esfuerzo, sin embargo eso no es lo que se ve en la simulación. En cambio con el factor de corrección de la fricción se obtiene que la dilatación es de 0.012 metros, esto es 90.9% del valor de Ansys valor bueno para las consideraciones tomadas.

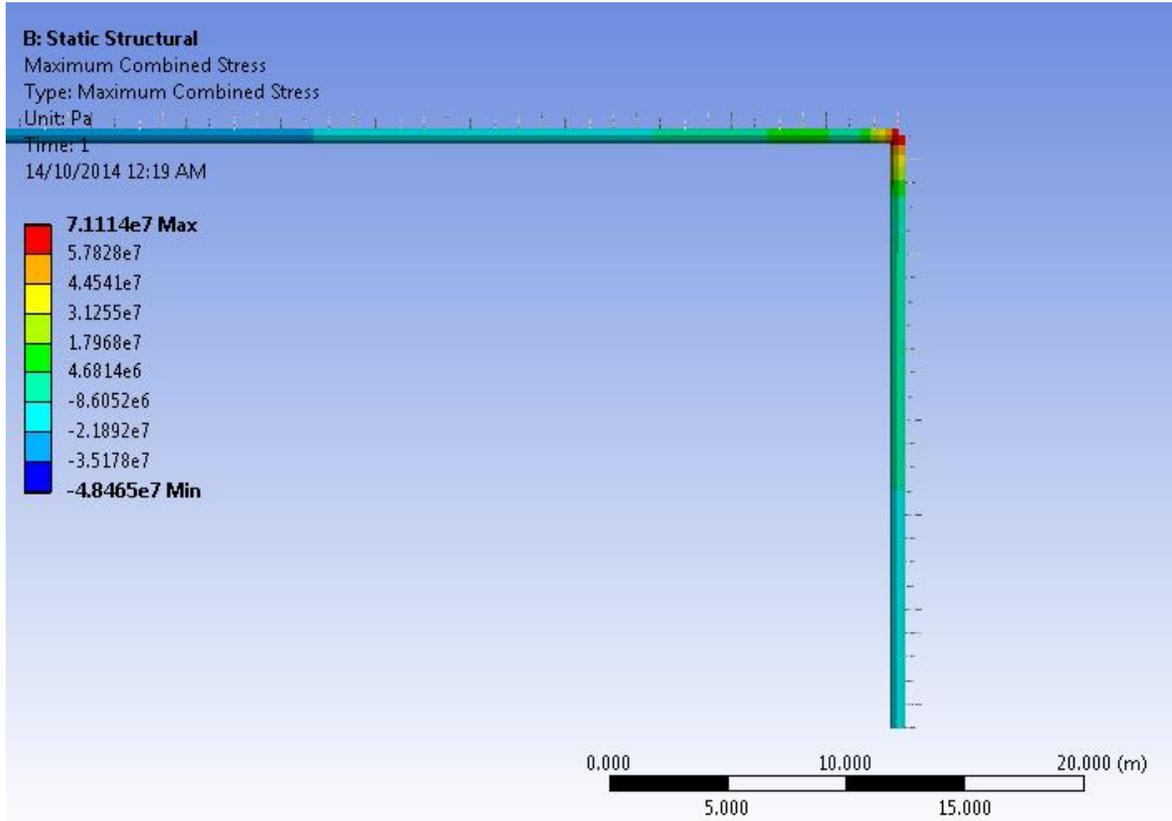


Figura 3.40. Esfuerzo actuante en el tramo BC con la longitud AB de 100 m.

Igual que con la dilatación se ve el esfuerzo obtenido por simulación y este le corresponde un valor de 71.1 MPa, comparando con el valor obtenido por cálculo analítico considerando la mitad de la fuerza de fricción es de 66.3 MPa. Esto significa que el valor de Ansys es 93.2% del obtenido por cálculo. Esto es un muy buen resultado por lo que se puede considerar el procedimiento analítico como correcto.

3.3.3.4. Factor de corrección de las tres longitudes

Vemos que considerando el factor de corrección en la fricción se obtiene muy buenos resultados, en primera instancia se puede decir que considerar este factor es correcto. Sin embargo el valor tomado ha sido elegido por el comportamiento visto en la simulación y sin mucha rigurosidad por lo que se recomendaría hacer un análisis con mayor profundidad para saber el real comportamiento de la fricción en una tubería enterrada.

Es por esto que se realizó un estudio de las deformaciones para saber cuál es la influencia de la fricción y verificar que el factor elegido es una buena aproximación al caso. Para esto se utilizaron los resultados de la dilatación en el tramo AB para cada caso, con estos datos se realizaron los diagramas de dilatación en la longitud.

Con los diagramas se obtiene el área por medio de aproximación rectangular y esto se compara con el modelo ideal que se considera que actúa la fricción en toda la longitud. Es decir, se pone el área de las figuras 3.41, 3.42 y 3.43 sobre el área bajo la curva del caso ideal según sea la longitud como se ve en la figura 4.41.

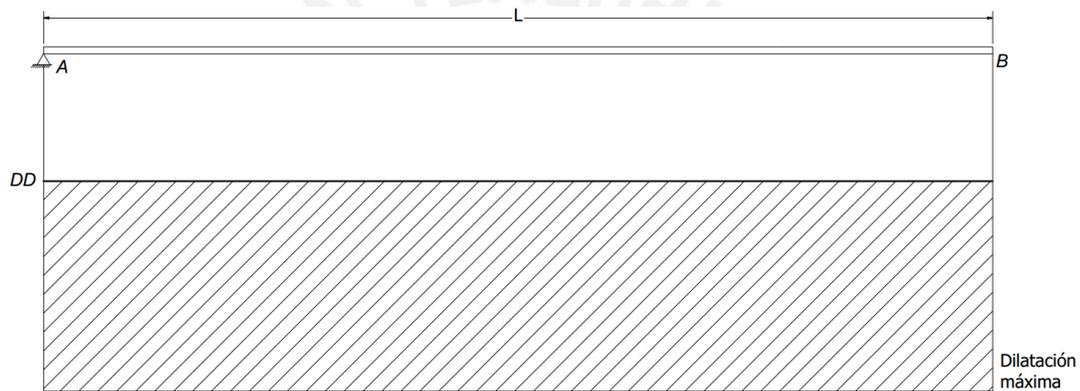


Figura 3.41. Caso ideal del efecto de fricción en una tubería enterrada.

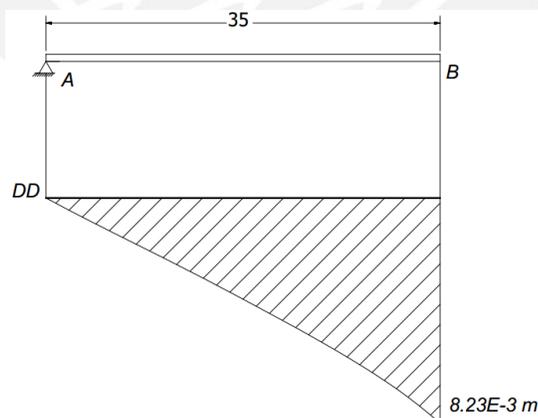


Figura 3.42. Comportamiento de la dilatación en el tramo AB de 35 metros.

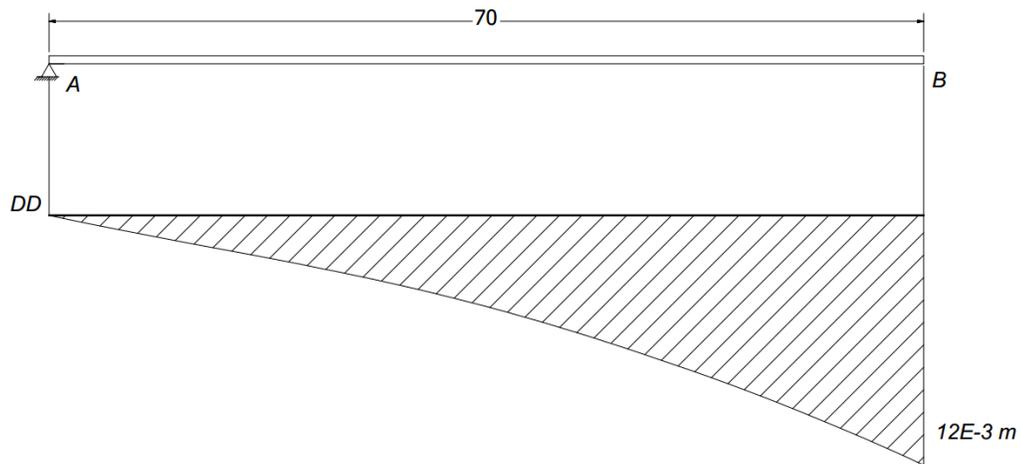


Figura 3.43. Comportamiento de la dilatación en el tramo AB de 70 metros.

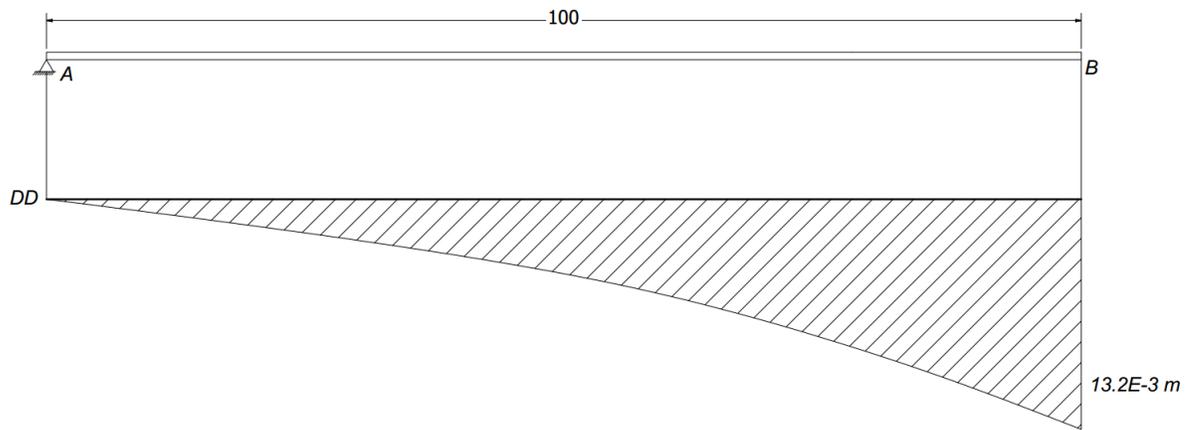


Figura 3.44. Comportamiento de la dilatación en el tramo AB de 100 metros

Los cocientes obtenidos para los casos de la tubería AB con una longitud de 35, 70 y 100 metros son 0.5, 0.45 y 0.55 respectivamente. Vemos que en promedio se obtiene el cociente de 0.5 que se usó en los cálculos, esto comprueba que los buenos resultados obtenidos al aplicar la corrección se deben principalmente al efecto de la fuerza de fricción en el terreno.

Hay que notar que este factor de corrección aún carece de mayor análisis ya que la verificación de dicho valor ha sido obtenida de un análisis por simulación realizada mediante aproximaciones al caso real, es posible que en el caso real el comportamiento de la fricción sea distinto por lo que se recomienda hacer un análisis con medidas reales del caso en tuberías enterradas. Por este factor se también se sugiere considerar un factor de seguridad mayor al recomendado hasta que se obtenga un estudio de todos los aspectos que están involucrados en el caso.



OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Los estudios realizados en esta tesis podrían ayudar a detectar fallas en los tres arreglos de tuberías desarrollados; sin embargo, es importante mencionar que para corroborar los resultados es necesario realizar un estudio con tuberías reales y complementar el análisis ofrecido en esta investigación.
- Se recomienda especialmente realizar un análisis del efecto de la fricción y cohesión en tuberías enterradas, ya que este tiene un comportamiento no lineal y variable según sea el caso. Esto serviría para predecir correctamente la falla en las tuberías que estén en el subsuelo.
- En otro trabajo podrían estudiarse métodos para aliviar tensiones en cada uno de los casos, especialmente en arreglos en L de una tubería. Esto involucra analizar el comportamiento de los aliviadores mediante el cálculo de las tensiones, y también plasmar este estudio mediante la simulación numérica para corroborar cada caso.
- En el caso de la tubería enterrada, se recomienda para un trabajo futuro analizar el pandeo realizado por la fuerza de fricción. Este es un caso especial y complejo, ya que el tubo está rodeado de un medio inelástico. Esta falla ha sido reportada en tuberías de acero y de plástico, por lo que su análisis a profundidad es justificado.
- Aparte del arreglo en L de tuberías, también existen distintos arreglos como en Z o U, en los cuales que pueden analizarse a profundidad para obtener más medios de cálculo de falla, como se ha hecho en esta investigación
- Para un análisis más profundo del efecto de las tensiones en la locación de falla, se recomienda realizar una simulación con el suelo modelado en 3D y no mediante resortes. El método mencionado se recomienda para observar el comportamiento del tubo y suelo, y cómo varía la circunferencia del tubo, así como conocer los puntos críticos del sistema.

- El Grupo Inacom ha impulsado la realización de esta tesis, junto con otras desarrolladas sobre el tema de tuberías de gas. Estos documentos pueden ser analizados en conjunto para estudiar un caso de tubería en su totalidad, incluyendo los efectos combinados que interactúan.
- Para el caso 3, se deben colocar resortes laterales en el tramo AB para contener el desplazamiento en el eje y . Se comprobó que si no se realiza esto, se obtienen resultados variables con un efecto de pandeo en el tramo AB.



CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos es posible plantear la siguiente conclusión para todos los casos de estudio.

- El método de análisis por elementos finitos en cada uno de los tres casos da muy buenos resultados. En efecto, se planteó modelos cercanos a la realidad mediante la simulación numérica y se pudo confirmar la validez de estos al contrastar valores con el planteamiento analítico y obtener porcentajes de similitud del grado de 83-98%.

Tras ello se pueden plantear las siguientes conclusiones específicas sobre cada caso:

- Después de haber analizado el primer caso mediante dos procedimientos completamente diferentes: analítico y por simulación, se concluye que los métodos usados son válidos por la cercana aproximación entre las tensiones obtenidas. Mediante el cálculo analítico se logra un esfuerzo crítico de 72 MPa con un salto de temperatura de 30 °C; en la simulación se obtiene un esfuerzo bastante semejante a lo calculado, al tener una similitud de 98.24%.
- En el segundo caso se confirmó la exactitud de los métodos de análisis desarrollados al obtener una semejanza del 97% entre los esfuerzos obtenidos mediante cálculo y por simulación. Para el cálculo, se compatibilizaron teorías de flexibilidad y de dilatación térmica con la finalidad de obtener la longitud del tubo mínima para que no falle el sistema. Con un cambio de temperatura de 25 °C se obtuvo de cálculo una longitud del tramo crítico de 7.64 metros; al redondear este valor a 8 metros se obtuvo un esfuerzo de 171 MPa. Considerando el valor redondeado de la longitud, se obtuvo un esfuerzo de 166 MPa en la simulación.
- De la misma manera que en los casos anteriores, se verificaron los procedimientos desarrollados en el caso 3, por la similitud entre el esfuerzo visto por simulación y el calculado por resistencia de materiales. Para analizar el complejo caso de una tubería

en L enterrada se usó la teoría de fundación elástica en la parte analítica; y elementos de los dos casos anteriores, para la simulación numérica. Con un cambio de temperatura de 25 °C se analizaron tres longitudes de tubería distintas con esfuerzos dentro de un rango de 35 MPa a 66.3 MPa. De la simulación numérica, se obtuvo tensiones similares en un rango de 82.7% a 97.8%.

- De la cercanía de los resultados entre los cálculos teóricos y de la simulación presentada, es posible concluir que la calidad y tipo de malla usado en el modelo de la tubería es el correcto para la simulación. La malla o *mesh* utilizada corresponde a un elemento lineal ya que se está analizando casos donde se tienen longitudes de tuberías muy larga, la simplicidad del modelo permite obtener valores convergentes con facilidad.
- Como resultado del análisis del diagrama de dilatación axial del tubo enterrado (véase la Figura 3.39), se puede concluir que a pesar de que se puede pensar que el terreno contiene toda la dilatación de la tubería en realidad siempre existirá una pequeña elongación del tubo. Esto se debe a que, según los códigos de ASCE, el terreno se comporta como un resorte, dicho elemento necesita un desplazamiento para generar fuerza.
- De un análisis profundo del método de cálculo para el caso 2 se puede obtener la conclusión de que la exactitud al caso real de los resultados dependen de gran manera de los parámetros geométricos de la tubería. Este efecto es por la flexibilidad del tramo analizado: entre más corto sea este tramo, mayor diferencia habrá en el cálculo al ser más rígido. El planteamiento que se usa en este documento asume que dicho tramo es completamente flexible por lo que limita el cálculo para ciertos casos. Si se tiene un arreglo de tubería en L corto se recomienda tomar los valores de la simulación numérica, ya que brinda una mejor aproximación.
- Al realizar el cálculo brindado por la norma ASHRAE para dilatación en tuberías en L se puede corroborar el procedimiento de cálculo realizado al obtener resultados

cercanos entre sí. Al comparar la longitud crítica del tubo obtenida de la norma con la calculada mediante el método analítico, se observa una similitud del 98%.

- En el análisis del caso de la tubería en L se puede considerar como nulo el momento inicial del cambio de dirección por su bajo valor numérico a comparación del momento crítico. Esta aproximación es válida debido a que el momento en el cambio de dirección es muy pequeño en comparación con el momento desarrollado en el apoyo fijo del segundo tramo. Mediante la simulación es posible poner valores a este efecto, determinándose que el momento inicial es 7.2% del momento máximo.
- Se observa que la fuerza axial de fricción del terreno tiene un comportamiento difícil de predecir; sin embargo, es posible obtener buenos resultados aproximados con el análisis realizado en esta tesis. Basándose en la hipótesis de que la fricción actúa en toda la longitud de la tubería, se obtiene, al comparar la tensión crítica por el medio analítico con el de la simulación, una semejanza de 50% en promedio. Si se aplica la corrección a la fuerza axial desarrollada en esta tesis, se obtiene una mayor similitud: 85.97%.
- Se concluye que si la fricción actúa en el 50% de la longitud de la tubería, se obtendrán mejores resultados en circunstancias similares al caso 3. Para corroborar esta afirmación, se analizaron los diagramas de dilatación versus la longitud del tubo para obtener un cociente que represente el porcentaje de la longitud de la tubería donde actúa la fricción. De esto se obtiene que en tuberías con una longitud de 35 m, 70 m y 100 m en el primer tramo tienen un factor de 50%, 45% y 55%, respectivamente, cuyo valor promedio es 50%.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE)

2005 *Guidelines for the design of buried steel pipe*. Consulta: 28 de abril de 2015.
<<http://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Update061305.pdf>>

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME)

2003 *Gas transmission and distribution piping systems: ASME code for pressure piping, B31 an American Nation Standard*. Nueva York: American Society of Mechanical Engineers (ASME).

ASHRAE

2000. *ASHRAE HVAC systems and equipment handbook*. Atlanta: ASHRAE.

BEER, FERNINAND

2009 *Mecánica de materiales*. Quinta edición. México.

GANTES, Charis, Georges BOUCKOVALAS y Vlasis KOUMOUSIS

2008 *Slope failure verification of buried steel pipelines*. Consulta: 28 de abril de 2015.
<http://users.ntua.gr/chgantes/files/Slope_Failure_Verification_of_Buried_Steel_Pipeline.pdf>

HIBBELER, Russell

2009 *Mecánica de materiales*. Octava edición. México.

NAVAL FACILITIES ENGINEERING COMAND (NAVFAC)

1986 *Foundations and earth structures*. Alexandria: Naval Facilities Engineering Comand (NAVFAC). Consulta: 28 de abril de 2015.
<http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i2210/files/eng_geol/NAVFAC_DM7_02.pdf>

PENG, Liang-Chuan

1978 *Stress analysis methods for underground pipelines*. Houston: Peng Engineering. Consulta: 28 de abril de 2015.
<<http://www.pipestress.com/papers/UnderGrd-1.pdf>>

TIMOSHENKO, Stephen

1961 *Resistencia de materiales*. Tomo II. Madrid: Espasa Calpe.

ZHENG, J.Y. y otros

2009 Failure analysis of natural gas buried X65 steel pipeline under deflection load using finite element method. *Materials & Design*, 31(2010), pp. 1384-1391. Consulta: 28 de abril de 2015.

<<http://www.paper.edu.cn/selfs/downpaper/liupengfei104683-self-201203-7.html>>

