

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE LA INTERACCIÓN SUELO - TUBERÍA EN TUBERÍAS ENTERRADAS DEBIDO A UNA FALLA DEL SUELO DE TIPO LATERAL

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

JONATHAN SILVA CUEVA

ASESORES:

Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán

Ing. Herbert Yépez Castillo

Lima, Junio del 2014

RESUMEN

En esta tesis se presenta un procedimiento para el análisis de tuberías enterradas sometidas a un deslizamiento de suelo del tipo lateral, mediante la simulación por software de elementos finitos.

Para desarrollar el mencionado procedimiento, se realizó inicialmente un estudio de los diferentes modelos analíticos y computacionales relacionados con el análisis de tuberías enterradas.

Con el estudio de los métodos analíticos, se seleccionó el método de Kennedy para la realización del análisis de una tubería enterrada que es afectada por un deslizamiento de suelo lateral.

Posteriormente, mediante el estudio de los métodos computacionales, se realizó la simulación del mismo problema tratado en el cálculo analítico utilizando el software de elementos finitos ANSYS Mechanical, el problema estudiado considera los efectos del deslizamiento lateral del suelo sobre la tubería enterrada. Los resultados obtenidos mediante simulación fueron comparados con los obtenidos por medios analíticos para su validación. Por lo que el modelo de elementos finitos desarrollado puede ser implementado para la ubicación de zonas críticas en tuberías de gran longitud afectadas por fallas del suelo.

Luego de realizada la simulación se procede al análisis de resultados, para lo cual se presentan gráficas que muestran el comportamiento de la tubería a lo largo del tramo analizado.

En la simulación se usó un caso real, una tubería enterrada de acero API 5L X70 de diámetro exterior 0,3556m (14") con un espesor de 0.0048m sometida a un deslizamiento lateral del suelo de 0,7m. Los ángulos de falla estudiados son de 0°,45° y 90° con respecto a la posición inicial de la tubería. Al analizar los resultados, se tiene que la zona crítica a lo largo de la tubería se encuentra en el plano de falla del suelo.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE LA INTERACCIÓN SUELO - TUBERÍA EN TUBERÍAS ENTERRADAS DEBIDO A UNA FALLA DEL SUELO DE TIPO LATERAL

ÁREA : Diseño

PROPUESTO POR : Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán

ASESOR : Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán
Ing. Herbert Yépez Castillo

TESISTA : Jonathan Silva Cueva

CÓDIGO : 20084711

FECHA : 18 del diciembre del 2013

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Actualmente se vienen realizando proyectos de extracción, transporte y explotación de gas natural. En el tiempo que lleva de servicio se presentaron fallas en su sistema de ductos, estas básicamente originadas por la: deficiente soldadura, corrosión de los tubos y efecto de la inestabilidad de los suelos.

El objetivo principal es estudiar para un caso específico el comportamiento de grandes longitudes de tuberías enterradas, con el fin de localizar las zonas críticas a partir de la distribución de los esfuerzos y deformaciones en la tubería. En particular se propone desarrollar un procedimiento para el análisis a gran escala de tuberías enterradas sometidas al efecto de inestabilidad del suelo.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO
ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE LA INTERACCIÓN SUELO -
TUBERÍA EN TUBERÍAS ENTERRADAS DEBIDO A UNA FALLA DEL SUELO DE
TIPO LATERAL

INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO

CAPITULO 2: PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE UNA TUBERIA ENTERRADA.

CAPITULO 3: PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES, MEDIANTE CÁLCULO ANALÍTICO Y ELEMENTOS FINITOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

BIBLIOGRAFÍA

ANEXO

Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán

Ing. Herbert Yépez Castillo



Dedico esta tesis a Dios que hizo que sea
posible.

A mi madre por ser mi apoyo incondicional.

Y a mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a mi asesor, el Dr. Quino Valverde por ser un guía en mi camino académico.



INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO	
1.1. Introducción	4
1.2. Recomendación del código ASME B31	4
1.3. Esfuerzos en tuberías	5
1.3.1. Esfuerzo tangencial(S_n)	6
1.3.2. Esfuerzo longitudinal(S_L)	6
1.3.3. Esfuerzo combinado	7
1.4. Deformación de la tubería	7
1.4.1. Deformación unitaria por la presión interna	7
1.4.2. Deformación unitaria longitudinal total	8
1.5. Modelo de análisis de tubería enterrada	8
1.5.1. Introducción	8
1.5.2. Modelo para la representación suelo-tubería	10
1.5.2.1. Resistencia del suelo al movimiento axial	11
1.5.2.2. Resistencia del suelo al movimiento lateral	13
1.5.2.3. Resistencia del suelo al movimiento vertical	15
1.5.2.3.1. Resistencia del suelo al movimiento ascendente(uptift)	15
1.5.2.3.2. Resistencia del suelo al movimiento descendente(bearing)	16
1.5.3. Tipos de suelos	17
1.5.4. Valores de resistencia del suelo bajo distintas condiciones	18
1.6. Cálculo analítico de los esfuerzos y deformaciones generadas en la tubería enterrada debido a una falla de suelo	21

1.6.1.	Introducción	22
1.6.2.	Procedimiento para la determinación de los efectos en tuberías enterradas por fallas de suelo	26
1.6.2.1	Fuerza axial en la tubería debida al efecto de falla de suelo	27
1.6.2.2.	Radio de curvatura originada por la falla de suelo	28
1.6.2.3.	Resistencia de fricción en la sección de curvatura	29
1.6.2.4.	Longitud entre apoyos virtuales	29
1.6.2.5.	Alargamiento total de la tubería, en términos de la geometría	30
1.6.2.6.	Alargamiento total de la tubería, en términos del material	31
1.6.2.7.	Deformación axial	32

CAPITULO 2: PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE UNA TUBERÍA ENTERRADA

2.1.	Introducción	34
2.2.	Parámetros de la tubería	34
2.3.	Parámetros del suelo	35
2.4.	Condiciones de operación	35
2.5.	Cálculo de esfuerzos y deformaciones de la tubería por diseño	35
2.5.1.	Espesor mínimo requerido	35
2.5.2.	Cálculo de esfuerzos	36
2.5.2.1.	Esfuerzo circunferencial	36
2.5.2.2.	Esfuerzo longitudinal	36
2.5.2.3.	Esfuerzo combinado	37
2.5.3.	Cálculo de deformación unitaria axial	37
2.5.4.	Cálculo de la resistencia axial del suelo	38
2.5.5.	Cálculo de la resistencia lateral del suelo	39
2.5.6.	Cálculo de la resistencia del suelo al movimiento ascendente (uplift)	40
2.5.7.	Cálculo de la resistencia del suelo al	40

movimiento descendente (bearing)	
2.6. Parámetros para diseño de la tubería enterrada	41
CAPITULO 3: PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES, MEDIANTE CÁLCULO ANALÍTICO Y ELEMENTOS FINITOS	
3.1. Introducción	42
3.2. Enunciado del problema de análisis	42
3.3. Planteamiento del problema	43
3.4. Resultados del cálculo analítico	43
3.5. Simulación mediante elementos finitos	46
3.5.1. Explicación de la simulación	46
3.5.2. Procedimiento de simulación	48
3.5.2.1. Selección del material	48
3.5.2.2. Definición de la geometría	49
3.5.2.3. Definición de la conexiones	50
3.5.2.4. Elemento tubería-ANSYS	54
3.5.3. Diagrama de flujo	54
3.5.4. Resultados de la simulación	58
3.5.4.1. Simulación para $\Delta h = 0,7m$, $\beta = 0^\circ$	58
3.5.4.2. Simulación para $\Delta h = 0,7m$, $\beta = 90^\circ$	62
3.5.4.3. Simulación para $\Delta h = 0,7m$, $\beta = 45^\circ$	66
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES DE TRABAJOS FUTUROS	77

BIBLIOGRAFÍA	78
Anexos	
ANEXO 1: DATOS	A1
ANEXO 2: CÁLCULO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS LONGITUDINALES SIN VARIACIONES DE PRESIÓN NI TEMPERATURA	A4
ANEXO 3: TABLA - CÁLCULO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS LATERALES SIN VARIACIONES DE PRESIÓN NI TEMPERATURA	A10
ANEXO 4: CÁLCULO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS AXIALES Y LATERALES SIN VARIACIONES DE PRESIÓN NI TEMPERATURA	A17
ANEXO 5: RESORTE AXIAL	A24
ANEXO 6: RESORTE LATERAL	A24
ANEXO 7: RESORTE VERTICAL SUPERIOR	A25
ANEXO 8: RESORTE VERTICAL INFERIOR	A25
ANEXO 9: CÓDIGO IMPLEMENTADO EN APDL MECHANICAL	A26

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1: Valores de las variables para obtener N_{ch} y N_{qh}	14
Tabla 1.2: Valores referenciales del ángulo de fricción interno y la cohesión para distintos tipos de suelos	17
Tabla 1.3: Valores de las resistencias del suelo con Diámetro y Profundidad constantes	18
Tabla 1.4: Valores de las resistencias del suelo con Diámetro constante y Profundidad variable	19
Tabla 1.5: Valores de las resistencias del suelo con Diámetro variable y Profundidad variable	20
Tabla 2.1: Parámetros de la tubería	34
Tabla 2.2: Parámetros del suelo	35
Tabla 2.3: Condiciones de operación	35
Tabla 2.4: Propiedades de la tubería con especificación API5L y grado X70	35
Tabla 2.5: Parámetros de diseño de la tubería enterrada	41
Tabla 3.1: Resultados del cálculo analítico para $\beta = 0^\circ$	43
Tabla 3.2: Resultados del cálculo analítico para $\beta = 90^\circ$	44
Tabla 3.3: Resultados del cálculo analítico para $\beta = 45^\circ$	45
Tabla 3.4: Tabla resumen de resultados para los tres casos(: $\beta = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$ y $\beta = 45^\circ$)	45
Tabla 3.5: Valores de las propiedades	48
Tabla c1: Tabla comparativa simulación-analítico	76
Tabla a1: Factores de fricción para distintos recubrimientos externos [2]	A1
Tabla a2: Coeficiente de presión lateral de tierras en reposo (K_0) para diferentes tipos de suelo [2]	A1
Tabla a3: Coeficientes de Ramberg Osgood para distintos tipos de acero(O'Rourke y Liu, 1999)	A3

LISTADO DE IMÁGENES

Imagen 1.1: Esfuerzos en un cilindro de pared delgada	5
Imagen 1.2: Esquema del esfuerzo tangencial	6
Imagen 1.3: Esquema de la interacción suelo-tubería	9
Imagen 1.4: Modelo de resortes no lineales	9
Imagen 1.5: Modelo de resortes para movimiento longitudinal	10
Imagen 1.6: Modelo de resortes para movimiento transversal	11
Imagen 1.7: Representación idealizada del comportamiento del resorte axial	11
Imagen 1.8: Representación idealizada del comportamiento del resorte lateral	13
Imagen 1.9: Representación idealizada del comportamiento de los resortes verticales	15
Imagen 1.10: Falla normal.	21
Imagen 1.11: Falla lateral	22
Imagen 1.12: Tubería enterrada de gran longitud (Vista de planta)	23
Imagen 1.13: Tubería de gran longitud enterrada sometida a una falla lateral (Vista de planta)	23
Imagen 1.14: Vista isométrica de una tubería enterrada afectada por un deslizamiento lateral	24
Imagen 1.15: Imagen esquemática del tendido del poliducto (Vista de planta)	24
Imagen 1.16: Esquema del desplazamiento lateral modelado por Kennedy	26
Imagen 1.17: Esquema de la sección de curvatura	29
Imagen 3.1: Muestra gráfica de la ubicación de los desplazamientos	47
Imagen 3.2: Esquema de la ubicación de los desplazamientos que se usa en ANSYS.	48
Imagen 3.3: Curva Esfuerzo – Deformación de API 5L X70	50

Imagen 3.4: Geometría del modelo FEM propuesto para la tubería	50
Imagen 3.5: Modelo de resorte-tubería implementado en ANSYS	51
Imagen 3.6: Geometría del elemento tubería - PIPE288	54
Imagen 3.7: Barra de opciones del APDL Mechanical	55
Imagen 3.8: Opciones para la obtención de resultados	56
Imagen a1: Factores de capacidad lateral [2]	A2
Imagen a2: Factores de capacidad de los suelos para los diferentes valores de fricción del suelo. Gráfica Factor de capacidad vs. Angulo de fricción [2]	A3
Imagen a3: Curva Resistencia axial del suelo vs Desplazamiento	A24
Imagen a4: Curva Resistencia lateral del suelo vs Desplazamiento	A24
Imagen a5: Curva Resistencia vertical superior del suelo vs Desplazamiento	A25
Imagen a6: Curva Resistencia vertical inferior del suelo vs Desplazamiento	A25

LISTADO DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1. Comportamiento de la tubería con respecto al punto de falla	67
Gráfica 3.2.: Variación de la resistencia de fricción axial con respecto al punto de falla	68
Gráfica 3.3.: Variación de la fuerza axial con respecto al punto de falla	69
Gráfica 3.4.: Variación de la elongación axial con respecto al punto de falla	70
Gráfica 3.5. Comportamiento de la tubería con respecto al punto de falla	72
Gráfica 3.6. Variación de la Resistencia del suelo lateral con respecto al punto de falla	73
Gráfica 3.7. Comportamiento de la fuerza cortante con respecto al punto de falla	74
Gráfica 3.8. Variación de la elongación lateral con respecto al punto de falla	75
Gráfica 3.9: Comportamiento axial de la tubería con respecto al punto de falla	77
Gráfica 3.10. Comportamiento lateral de la tubería con respecto al punto de falla	78
Gráfica 3.11. Resistencia de fricción axial del suelo con respecto al punto de falla	79
Gráfica 3.12. Resistencia de fricción lateral del suelo con respecto al punto de falla	80
Gráfica 3.13. Fuerza axial con respecto al punto de falla	81
Gráfica 3.14. Fuerza cortante con respecto al punto de falla	82
Gráfica 3.15. Elongación axial con respecto al punto de falla	83
Gráfica 3.16. Elongación lateral con respecto al punto de falla	84

INTRODUCCIÓN

En la sección de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, específicamente Grupo INACOM, se viene desarrollando un proyecto de investigación que está orientado a evaluar la integridad de ductos de gas natural.

Como se conoce, en el Perú se viene transportando gas natural proveniente de Camisea, en ductos que atraviesan zonas complicadas geográficamente, existiendo evidencias de la susceptibilidad de estos ductos específicamente poliductos, de presentar fallas debido a los esfuerzos que se producen en la interacción con el suelo.

El proyecto Camisea consiste en la extracción, transporte y explotación de gas natural, tanto para consumo interno como para exportación. El yacimiento se encuentra en la zona de San Martín y Cashiari (lote 88). Este gas es inicialmente transportado por un ducto hacia la planta las Malvinas, donde se realiza la separación de gases en seco y líquido.

Luego de la separación, el gas seco es transportado por gasoductos hacia el City Gate en Lurín, a unos 35 Km. al sur de la ciudad de Lima para consumo interno, mientras que el excedente es devuelto a la planta inicial en San Martín y Cashiari.

Por otro lado, los líquidos de gas natural son transportados por poliductos hacia Pisco, donde se encuentra la planta de fraccionamiento que produce butano, propano, nafta y diesel para exportación. El poliducto tiene un recorrido que nace en la planta las Malvinas, atraviesa Ayacucho, luego Huancavelica y, finalmente, llega hasta la Playa de Lobería ubicada en la bahía de Paracas - Ica.

El poliducto de Camisea fue diseñado acorde con la norma ASME B31.4. El material de construcción es la especificación API 5L X70. El poliducto cuenta con revestimiento de acuerdo con su diámetro. El poliducto de 14" de diámetro exterior está recubierto con un revestimiento de polietileno de 2,2 mm y el ducto de 10" de diámetro exterior recubierta con un revestimiento de polietileno de 2 mm. Para la instalación de la tubería se tomó en consideración las características del suelo y la profundidad mínima para enterrar la tubería es de 1 m.

La problemática con respecto a la integridad de los ductos se originó luego de iniciado su funcionamiento (20 de agosto de 2004), debido a que se reportaron seis accidentes en las líneas de gas natural, específicamente en el poliducto.

Según el reporte de Germanischer Lloyd se muestra que ocurrieron seis fallas en los ductos hasta el 2007, de los cuales cinco fueron debido a la inestabilidad del suelo. Este informe realizado por GL (Germanischer Lloyd N° GLP/GLM/MEMP/726-07- Revisión 1) es muy importante para la presente tesis, debido a los datos técnicos que muestra y que servirán como datos de entrada para la simulación por ANSYS Mechanical.

Con la motivación ya descrita, la tesis se enfoca en estudiar el comportamiento de grandes longitudes de tubería enterradas bajo el efecto de un suelo inestable, con la

finalidad de localizar las zonas críticas a partir de la distribución de esfuerzos y deformaciones en la tubería.

A continuación se muestra de forma detallada los objetivos que se alcanzaron en la tesis.

Objetivo general

Estudiar, para un caso específico, el comportamiento de grandes longitudes de tuberías enterradas para localizar las zonas críticas a partir de la distribución de esfuerzos y deformaciones en la tubería.

Objetivos específicos

- Realizar un procedimiento para dimensionar una tubería enterrada.
- Estudiar los modelos disponibles para simular el suelo y la tubería en el software ANSYS Mechanical.
- Definir un procedimiento que permita simular la interacción suelo – tubería en el software ANSYS Mechanical.
- Aplicar el procedimiento definido y simular los casos típicos de interacción suelo – tubería.
- Comparar y validar los resultados de la simulación numérica con el cálculo analítico.
- Aplicar el procedimiento obtenido en la detección de la zona crítica en un caso general.

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Introducción

Este capítulo muestra las recomendaciones que brinda el Código del ASME B31, que da respuesta a los requisitos para sistemas de tuberías a presión, además de recomendaciones en los cálculos de diseño de tuberías tomadas de libros de diseño mostradas en la bibliografía.

1.2. Recomendación del código ASME B31

La norma utilizada para el diseño de la tubería es la ASME B31.4, Tuberías de Transporte de Hidrocarburos Líquidos y otros Líquidos. Las recomendaciones de la norma permiten que el diseño de la tubería, en base a los esfuerzos, se generan por la presión interna.

De la norma se puede desprender lo siguiente:

- El esfuerzo admisible debe ser menor a $0,72 \times T \times SMYS$, donde T es el factor de unión de soldadura (el cual es igual a 1 por tratarse del API 5L) y SMYS es el esfuerzo de fluencia mínimo específico para la tubería.

1.3. Esfuerzos en tuberías

Si la tubería es sometida a una presión interna uniforme se producen esfuerzos. Estos son:

- Esfuerzos tangenciales
- Esfuerzos longitudinales
- Esfuerzos radiales

Sin embargo, para cilindros de pared delgada los esfuerzos radiales pueden ser considerados insignificantes en comparación con los otros dos esfuerzos. Además, al ser considerada como pared delgada la distribución de esfuerzos a través del espesor puede ser considerada constante. En la imagen 1.1 se puede ver la representación gráfica de los esfuerzos en un cilindro de pared delgada.

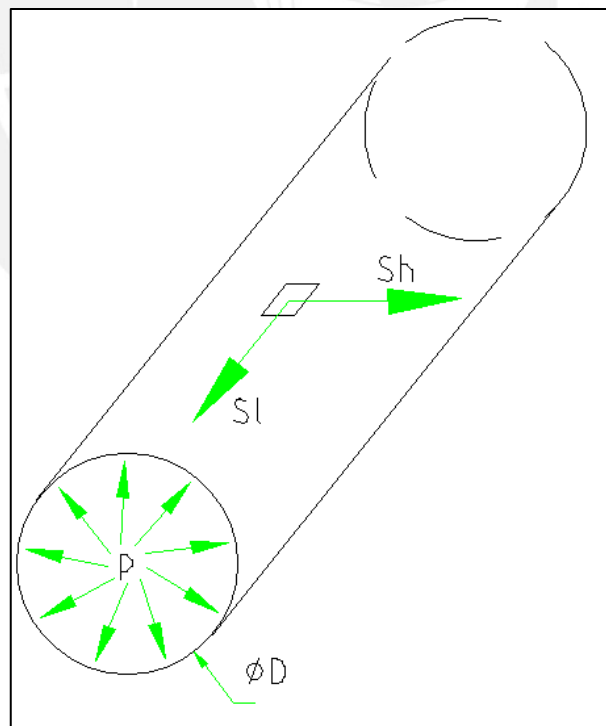


Imagen 1.1: Esfuerzos en un cilindro de pared delgada

1.3.1. Esfuerzo tangencial (S_h)

El esfuerzo tangencial o circunferencial, como se muestra en la imagen 1.2, se origina en oposición a la presión que ejerce el fluido en las paredes internas del cilindro.

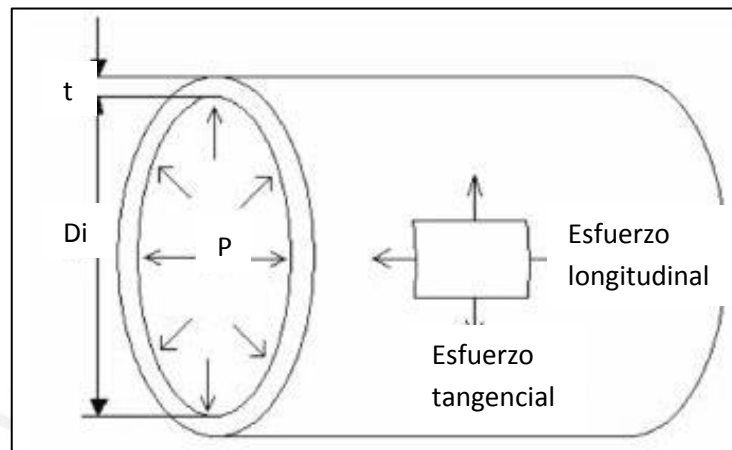


Imagen 1.2: Esquema del esfuerzo tangencial

$$S_h = \frac{P D}{2t} \quad (1.1)$$

Donde:

S_h : Esfuerzo longitudinal (N/m^2).

P : Presión de operación máxima interna (N/m^2).

D : Diámetro externo (m).

t : Espesor de la tubería(m).

1.3.2. Esfuerzo longitudinal (S_L)

Este esfuerzo se debe a la presión interna que actúa generando un efecto longitudinal en la tubería. Ver imagen 1.2.

Se calcula mediante:

$$S_L = \frac{PD}{4t} \quad (1.2)$$

Donde:

P : Presión de operación máxima interna (N/m²).

D : Diámetro interno (m).

t : Espesor de la tubería (m).

1.3.3. Esfuerzo combinado

La norma ASME B31.4, menciona la utilización del esfuerzo combinado de Tresca y de Von Mises.

Esfuerzo de Von Mises:

$$S_E = \sqrt{S_h^2 + S_L^2 - S_h S_L} \quad (1.3)$$

Esfuerzo de Tresca:

$$S_E = |S_L - S_h| \quad (1.4)$$

1.4. Deformación de la tubería

1.4.1. Deformación unitaria por la presión interna

a. Deformación por el efecto de tapa

La expansión unitaria longitudinal debido al efecto de tapa se origina por la presión interna (en dirección longitudinal) en la tubería que causa una deformación axial.

$$\varepsilon_{tapa} = \frac{S_h}{2E} \quad (1.5)$$

Donde:

S_h : Esfuerzo tangencial (N/m²).

E : Módulo de Young de la tubería (N/m^2).

b. Deformación por el efecto de Poisson

Es la contracción longitudinal debida a la expansión circunferencial generada por la presión interna.

$$\varepsilon_{poisson} = -\nu \frac{S_h}{E} \quad (1.6)$$

1.4.2. Deformación unitaria longitudinal total

Para el caso, donde no exista restricción axial de la tubería, la deformación unitaria neta es la suma de:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{tapa} + \varepsilon_{poisson} \quad (1.7)$$

1.5. Modelo de análisis de tubería enterrada

1.5.1. Introducción

La representación de la interacción suelo-tubería, para tuberías enterradas de gran longitud, tiene la dificultad en la representación del suelo por tener un comportamiento elasto-plástico. Debido a ello, en el presente capítulo, se presenta un modelo discreto para el análisis de la interacción suelo-tubería, el cual puede ser modelado por elementos finitos usando ANSYS. Cabe señalar que un modelo continuo para representar al suelo genera gran consumo computacional.

Con el modelo discreto se puede representar la interacción suelo-tubería (Ver imagen 1.3) como un tubo que descansa sobre resortes (representación del suelo) no lineales agrupados en ubicaciones discretas de la tubería (Ver imagen 1.4).

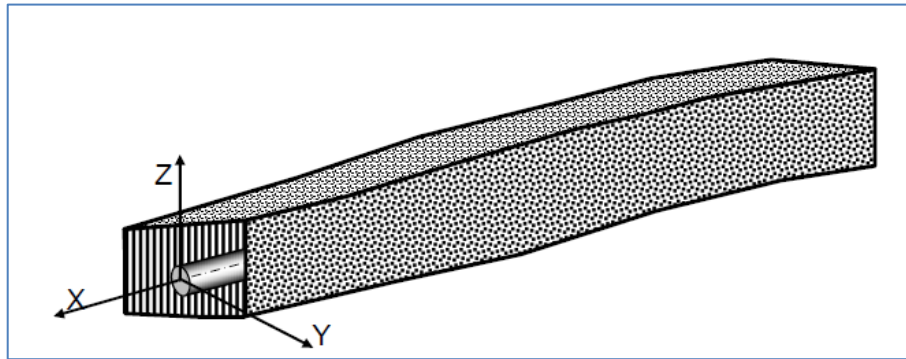


Imagen 1.3. Esquema de la interacción suelo-tubería. (IITK-GDSMA Indian Institute of Technology Kanpur, 2007 pág. 61)

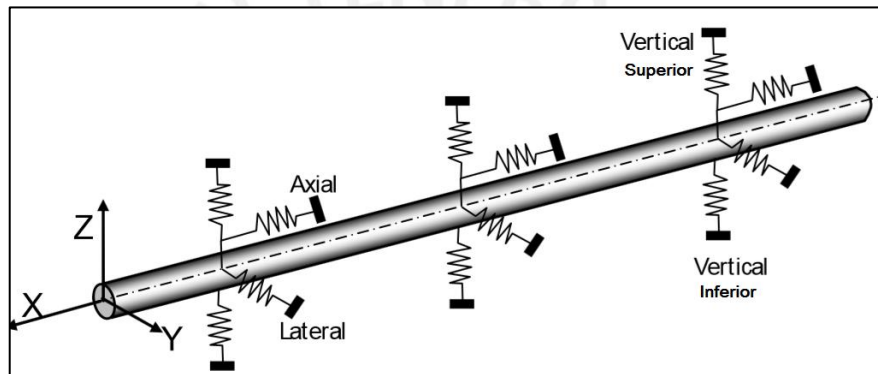


Imagen 1.4: Modelo de resortes no lineales. (IITK-GDSMA Indian Institute of Technology Kanpur, 2007 pág. 61)

Como se ve, en la imagen 1.4, son cuatro resortes los que representan el modelo. Estos son :

- a. Resorte axial. Este representa la resistencia que opone el suelo en la superficie de la tubería, es decir, es la fuerza de fricción por unidad de longitud axial que se genera por la interacción con el suelo, debido a una expansión longitudinal de la tubería.
- b. Resorte lateral. Este resorte representa la resistencia lateral del suelo al movimiento lateral de la tubería.

- c. Resorte vertical superior (uplift). Este resorte representa la resistencia vertical del suelo al movimiento ascendente de la tubería. Un caso de deslizamiento de suelo vertical ascendente significa la presión que ejerce el suelo sobre la tubería.
- d. Resorte vertical inferior (bearing). Este resorte representa la resistencia vertical del suelo al movimiento descendente de la tubería. En un caso de deslizamiento de suelo vertical descendente, significa la presión que ejerce el suelo sobre la tubería.

1.5.2. Modelo para la representación suelo-tubería

El esquema, según el modelo discreto de resortes no lineales, se muestra en las siguientes imágenes. Ver imagen 1.5 y 1.6.

En la presente tesis se usa este tipo de representación, debido a que se analiza un tramo largo de tubería, lo que representa un ahorro en recursos computacionales para la simulación; además de ser aplicada en investigaciones similares.

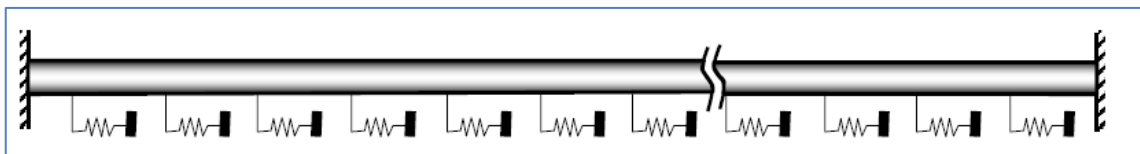


Imagen 1.5: Modelo de resortes para movimiento longitudinal. (IITK-GDSMA Indian Institute of Technology Kanpur, 2007 pág. 61)

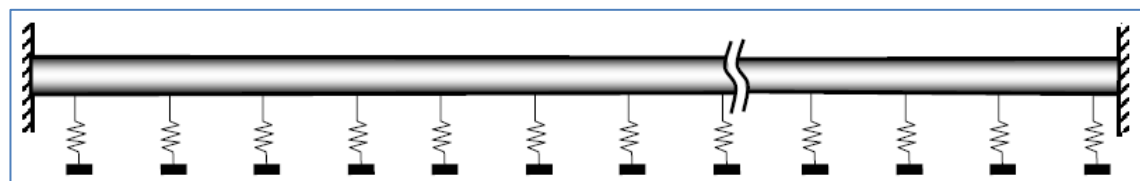


Imagen 1.6: Modelo de resortes para movimiento transversal. (IITK-GDSMA Indian Institute of Technology Kanpur, 2007 pág. 61)

1.5.2.1. Resistencia del suelo al movimiento axial

El resorte axial representa la resistencia del suelo al movimiento axial de la tubería. La imagen 1.7 muestra la curva real (línea fuerte) e idealizada (línea trazo segmentado). La curva idealizada tiene un comportamiento elástico (línea trazo segmentado) y perfectamente plástico (línea recta).

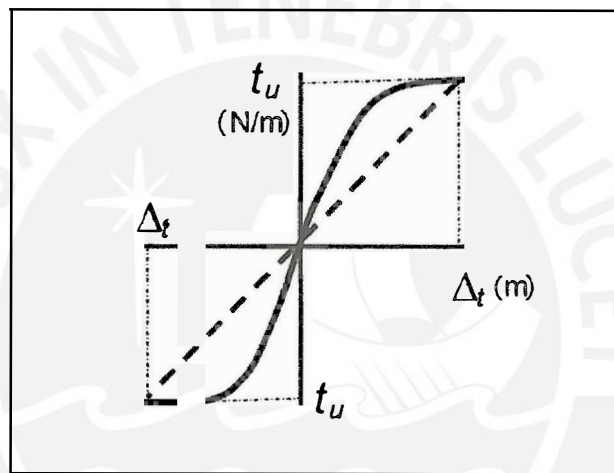


Imagen 1.7: Representación idealizada del comportamiento del resorte axial (IITK-GDSMA Indian Institute of Technology Kanpur, 2007 pág. 63)

El régimen elástico indica que el aumento de la resistencia de fricción es proporcional al deslizamiento de suelo. Para un máximo desplazamiento del suelo Δ_t tiene una máxima resistencia de fricción del suelo t_u , luego del cual el resorte (el suelo) se comporta como un elemento perfectamente plástico.

La resistencia axial máxima del suelo (t_u) por unidad de longitud del tubo se puede calcular como:

$$t_u = \pi D c \alpha + \pi D H \gamma \frac{1+K_0}{2} \tan \delta' \quad (1.8)$$

Dónde:

D : Diámetro externo del tubo (m).

Dónde:

D : Diámetro externo del tubo (m).

c : Cohesión del suelo de relleno, factor que indica cuan unidas se encuentran las partículas del terreno (N/m^2).

α : Factor de adhesión = $0,608 - 0,123c - \frac{c}{2} + \frac{c}{3}$, c en kPa/100

H : Profundidad hasta el centro del tubo (m).

γ : Peso por unidad de volumen del suelo de relleno (N/m^3).

φ : Ángulo de fricción interna del suelo de relleno ($^\circ$).

K_0 : Coeficiente de presión de suelos en reposo. $K_0 = 1 - \text{sen}\varphi$. (Para valores ver tabla a2 - anexo1).

δ' : Ángulo de fricción en la interface tubo - suelo de relleno. = $f \times \varphi$ ($^\circ$)

f : Factor de fricción para varios tipos de tubería. (Ver tabla a1 - anexo1)

El máximo desplazamiento de suelo (Δ_t) en la dirección axial de la tubería es (ALA, July 2001 pág. 69):

Δ_t : 3mm para arena compacta.

Δ_t : 5mm para arena no compacta.

Δ_t : 8mm para arcilla rígida.

Δ_t : 10mm para arcilla blanda.

1.5.2.2. Resistencia del suelo al movimiento lateral

El resorte lateral representa la resistencia del suelo al movimiento lateral del tubo. La imagen 1.8 muestra la curva idealizada del comportamiento del resorte lateral.

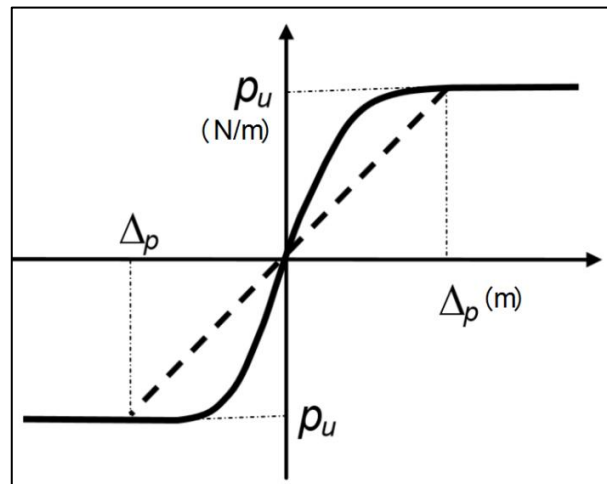


Imagen 1.8: Representación idealizada del comportamiento del resorte lateral (IITK-GDSMA Indian Institute of Technology Kanpur, 2007 pág. 64)

El régimen elástico indica que el aumento de la resistencia lateral es proporcional al deslizamiento lateral de suelo. Para un máximo desplazamiento del suelo Δ_p se tiene una resistencia máxima lateral del suelo P_u , luego del cual el resorte se comporta como un elemento perfectamente plástico.

La resistencia máxima lateral del suelo por unidad de longitud de tubo se puede calcular como:

$$(1.9)$$

Dónde:

N_{ch} y N_{qh} : Factores adimensional de capacidad lateral. Dependen del ángulo de fricción interna del suelo natural. Ver imagen a1-anexo1 para valores de gráfica o tabla 1.1 para un cálculo analítico.

: Cohesión del suelo natural. Factor que indica cuantas unidas encuentran las partículas del terreno (N/m^3).

D : Diámetro externo del tubo (m).

: Peso por unidad de volumen del suelo de relleno (N/m^3).

H : Profundidad hasta el centro del tubo (m).

N_{ch} : Factor adimensional de capacidad de soporte horizontal para arcilla (o para $c=0$).

N_{qh} : Factor adimensional de capacidad de soporte horizontal para arena (o para $\phi=0$).

Tabla 1.1: Valores de las variables para obtener N_{ch} y N_{qh} (IITK-GDSMA Indian Institute of Technology Kanpur, 2007 pág. 65)

Factor	ϕ	x	A	B	c	d	E
	0°	H/D	6,752	0,065	-11,063	7,119	---
	20°	H/D	2,399	0,439	-0,03	$1,059(10)^{-3}$	$-1,754(10)^{-5}$
	25°	H/D	3,332	0,839	-0,090	$5,606(10)^{-3}$	$-1,319(10)^{-4}$
	30°	H/D	4,565	1,234	-0,089	$4,275(10)^{-3}$	$-9,159(10)^{-5}$
	35°	H/D	6,816	2,019	-0,146	$7,651(10)^{-3}$	$-1,683(10)^{-4}$
	40°	H/D	10,959	1,783	0,045	$-5,425(10)^{-3}$	$1,153(10)^{-4}$
	45°	H/D	17,658	3,309	0,048	$-6,443(10)^{-3}$	$1,299(10)^{-4}$

Para valores intermedios de ángulos de fricción N_{qh} puede ser interpolado.

El desplazamiento de suelo debido a la fuerza lateral se calcula como (ALA, July 2001 pág. 70):

$$04(H -)$$

1.5.2.3. Resistencia del suelo al movimiento vertical

El comportamiento de los resortes verticales, que va en la parte superior e inferior del tubo, es distinto; esto debido a las propiedades del suelo de relleno. La imagen 1.9 muestra la curva idealizada del comportamiento de los resortes verticales.

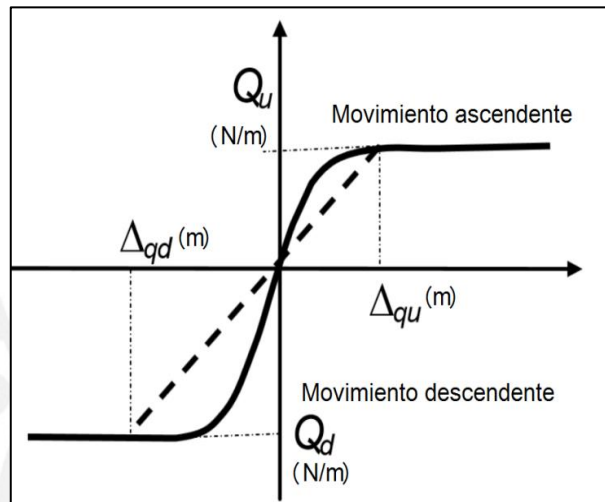


Imagen 1.9: Representación idealizada del comportamiento de los resortes verticales (IITK-GDSMA Indian Institute of Technology Kanpur, 2007 pág. 66)

El régimen elástico indica que el aumento de la resistencia al movimiento vertical es proporcional al deslizamiento vertical del suelo. Para un máximo desplazamiento del suelo , en sentido de abajo hacia arriba, se tiene una resistencia máxima lateral del suelo , luego del cual el resorte se comporta como un elemento perfectamente plástico. Para un máximo desplazamiento del suelo Δ , en sentido de arriba hacia abajo, se tiene una resistencia máxima lateral del suelo , luego del cual el resorte se comporta como un elemento perfectamente plástico.

1.5.2.3.1. Resistencia del suelo al movimiento ascendente (uplift)

La resistencia máxima del suelo por unidad de longitud de la tubería en la parte superior de la tubería puede ser calculada como:

$$\bar{\gamma}HD \tag{1.10}$$

Donde los factores adimensionales son:

- : Factor vertical superior para arcilla (0 para $c=0$).
- : Factor vertical superior para arena (0 para $\Phi=0^\circ$).

— Para —

—

El desplazamiento de suelo debido a la fuerza vertical superior puede ser considerado de (ALA, July 2001 pág. 71) como:

- : 0,01H a 0,02H para un rango entre arena densa y suelta $< 0.1D$, y
- : 0,1H a 0,2H para un rango entre arcilla suave y rígida $< 0.2D$

1.5.2.3.2. Resistencia del suelo al movimiento descendente (bearing)

La resistencia máxima del suelo por unidad de longitud de la tubería en la parte inferior de la tubería, puede ser calculada como:

$$\bar{\gamma}HD \tag{1.11}$$

Donde los factores adimensionales son:

son factores de capacidad (Para valores de gráfica. Ver tabla a2 - anexo1)

$$\left[\frac{c}{\gamma H} \right] \left\{ \frac{45}{\gamma H} \left(\frac{45}{\gamma H} - 1 \right) \right\}$$

El desplazamiento de suelo debido a la fuerza vertical inferior puede ser considerado de (ALA, July 2001 pág. 71) como:

: 0,1D, para suelo granular.

: 0,2D, para suelo cohesivo.

1.5.3. Tipos de suelos

- Arenas

No poseen cohesión. Esta categoría corresponde a las granitos o minerales que tienen la forma angulosa o redondeada en sus cantos. Puede ser clasificada por su tamaño como arena fina, media y gruesa. Su densidad varía entre 1570 N/m³ y 21500 N/m³. Su ángulo de fricción oscila entre 25° y 40°.

- Limos

No poseen cohesión. El limo está compuesto por granos, cuyo tamaño está entre el de la arena fina y la arcilla. El limo está formado por barro, lodo y restos vegetales.

- Arcillas

Poseen cierto nivel de cohesión que depende de la concentración de agua entre sus partículas. Su densidad varía entre 26000 N/m³ y 27400 N/m³. Su ángulo de fricción está cercano a cero.

A continuación se muestra una tabla con valores referenciales del ángulo de fricción interna y de su cohesión.

Tabla 1.2. Valores referenciales del angulo de friccion interno y la cohesion para distintos tipos de suelos

Tipos de Suelos	Ángulos de	Cohesión (N/m ²)
-----------------	------------	------------------------------

		fricción interna (°)	
Granulares o no cohesivos	Arena suelta	30	0
	Arena de compacidad media	32,5	0
	Arena densa	35	0
	Grava	35	0
	Grava arenosa heterogénea	35	0
	Bloques de piedra (sin presencia de arena)	35	0
Suelos cohesivos	Arcilla semidura	15	24500
	Arcilla firme	16	9800
	Arcilla blanda	17	0
	Arcilla arenosa firme	22,5	4900
	Arcilla arenosa blanda	23,5	0
	Limo firme	24,5	1960
	Limo blando	24,5	0
	Arcilla orgánica	10	0
	Turba	15	0

(Navarro Hundiel pág. 2)

1.5.4. Valores de resistencia del suelo bajo distintas condiciones

A continuación muestro tres tablas en función a las expresiones con valores referenciales de la resistencia del suelo expresada en N/m, los cuales están en función del diámetro, cohesión, profundidad, densidad y ángulo de fricción del suelo. El valor del diámetro exterior es de 0.3556m (14"). (ALA, July 2001 págs. 68-71)

Tabla 1.3. Valores de las resistencias del suelo con diámetro y profundidad constantes. Ref: Elaboración propia

Datos	Unidad	Cohesivos	No cohesivos
-------	--------	-----------	--------------

Diámetro	m	0,3556	0,3556	0,3556	0,3556	0,3556	0,3556
Tipo de suelo		Arcilla blanda	Arcilla normal	Arcilla densa	Arena suelta	Arena media	Arena densa
Cohesión (c)	KPa	0	10	25	0	0	0
Profundidad hasta el centro del tubo(H)	m	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
Peso por unidad de volumen del suelo de relleno (Y)	N/m ³	16000	18000	20000	16000	18000	20000
Ángulo de fricción interna del suelo de relleno (φ)	°	0	0	0	25	30	40
Coefficiente de presión de suelos en reposo (Ko)	Adimensional	1	1	1	0,578	0,500	0,357
Factor de fricción para varios tipos de tubería (f)	Adimensional	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Ángulo de fricción en la interface tubo - suelo de relleno (δ')	°	0	0	0	15	18	24
Resultados							
Resistencia axial	N/m	0	6968	68876	4445	5766	7944
Resistencia lateral	N/m	52371	89684	142380	52371	58917	65464
Resistencia vertical superior	N/m	0	23556	58890	12611	17025	25222
Resistencia vertical inferior	N/m	6774	20257	40059	78651	158786	673421

Tabla 1.4. Valores de las resistencias del suelo con diámetro constante y profundidad variable. Ref: Elaboración propia

Datos	Unidad	Cohesivos			No cohesivos		
Diámetro	M	0,3556	0,3556	0,3556	0,3556	0,3556	0,3556
Tipo de suelo		Arcilla blanda	Arcilla normal	Arcilla densa	Arena suelta	Arena media	Arena densa
Cohesión (c)	KPa	0	10	25	0	0	0
Factor de adhesión (α)	Adimensional	1,029	-0,624	-2,47	1,029	1,029	1,029
Profundidad hasta el centro del tubo (H)	M	1,18	1,68	2,18	2,68	3,18	3,68
Peso por unidad de volumen del	N/m ³	16000	18000	20000	16000	18000	20000

suelo de relleno (Y)							
Ángulo de fricción interna del suelo de relleno (ϕ)	°	0	0	0	25	30	40
Coefficiente de presión de suelos en reposo (K_0)	Adimensional	1	1	1	0,578	0,500	0,357
Factor de fricción para varios tipos de tubería (f)	Adimensional	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Ángulo de fricción en la interface tubo - suelo de relleno (δ')	°	0	0	0	15	18	24
Resultados							
Resistencia axial	N/m	0	6968	68876	10106	15558	24806
Resistencia lateral	N/m	52371	131484	256931	157484	222663	300383
Resistencia vertical superior	N/m	0	33556	108890	65187	123935	245931
Resistencia vertical inferior	N/m	6774	23452	47160	169298	393297	180772 2

Tabla 1.5. Valores de las resistencias del suelo con diámetro variable y profundidad variable. Ref: Elaboración propia

Datos	Unidad	Cohesivos			No cohesivos		
		0,3556	0,8556	1,3556	1,8556	2,3556	2,8556
Diámetro	M	0,3556	0,8556	1,3556	1,8556	2,3556	2,8556
Tipo de suelo		Arcilla blanda	Arcilla normal	Arcilla densa	Arena suelta	Arena media	Arena densa
Cohesión (c)	KPa	0	10	25	0	0	0
Profundidad hasta el centro del tubo (H)	M	1,18	1,68	2,18	2,68	3,18	3,68
Peso por unidad de volumen del suelo de relleno (Y)	N/m ³	16000	18000	20000	16000	18000	20000
Ángulo de fricción interna del suelo de relleno (ϕ)	°	0	0	0	25	30	40
Coefficiente de presión de suelos en reposo (K_0)	Adimensional	1	1	1	0,578	0,500	0,357

Factor de fricción para varios tipos de tubería (f)	Adimensional	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Ángulo de fricción en la interface tubo - suelo de relleno (δ')	°	0	0	0	15	18	24
Resultados							
Resistencia axial	N/m	0	16765	262567	52735	103062	199198
Resistencia lateral	N/m	52371	232117	595919	490364	818275	1262495
Resistencia vertical superior	N/m	0	33556	108890	65187	123935	245931
Resistencia vertical inferior	N/m	6774	56744	180892	1047966	3375913	22365807

1.6. Cálculo analítico de los esfuerzos y deformaciones generadas en la tubería enterrada debido a una falla de suelo

1.6.1. Introducción

Una región de posible falla se define como una zona en la que existe una gran posibilidad de ocurrir un deslizamiento de suelo por efectos geológicos. Un plano de falla se ubica en el deslizamiento relativo entre dos porciones de suelo.

Existen varios tipos de fallas que pueden ser normales, laterales, inversas u oblicuas.

Una falla normal es un deslizamiento en dirección vertical del suelo. (Ver imagen 1.10.)

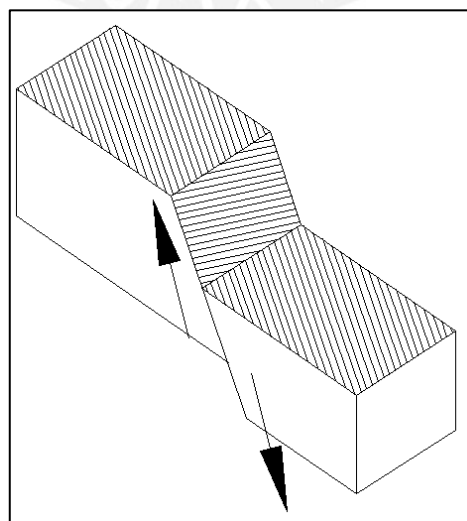


Imagen 1.10: Falla normal.

Una falla lateral es un deslizamiento en dirección horizontal del suelo. (Ver imagen 1.11.)

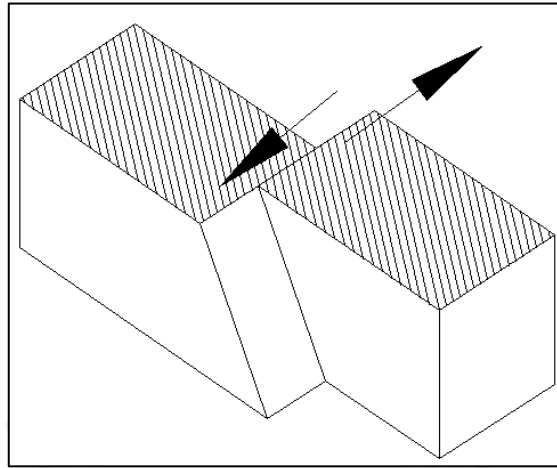


Imagen 1.11: Falla lateral

El cálculo analítico sirve para la obtención de los valores de esfuerzos y deformaciones ocurridos por una falla lateral del suelo.

En esta tesis se usa el procedimiento elaborado por Kennedy (Kennedy RP, 1977 págs. 618-633) para la determinación de los efectos en tuberías debido a la falla de suelo en tuberías enterradas que se encuentra en su artículo. Cabe indicar que este procedimiento de análisis fue adoptado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.

Se realiza un procedimiento de cálculo analítico es con la finalidad de poder comparar y validar los resultados provenientes de la simulación por elementos finitos.

En la siguiente imagen 1.12 se muestra un esquema en vista de planta de una tubería enterrada de gran longitud. La flecha que cruza la tubería es el plano de falla del suelo y la zona marcada con círculos indican la ubicación del tramo de tubería que se analiza.

En la imagen 1.13 se muestra la vista de planta de la tubería enterrada de gran longitud afectada por el deslizamiento lateral de suelo.

En la imagen 1.14 se muestra una vista isométrica de la tubería enterrada que es afectada por un deslizamiento lateral del suelo.

En la imagen 1.15 se muestra la tubería que sufre una falla lateral. La falla se da en un ángulo β con respecto a la posición que tenía la tubería inicialmente. La longitud L_1 y L_2 son las distancias entre el punto de falla y los puntos de anclaje. (La suma de L_1 y L_2 es conocido como longitud entre apoyos virtuales). La suma de estas longitudes indican el tramo mínimo que una tubería enterrada debe tener para un análisis de falla de suelo determinado.

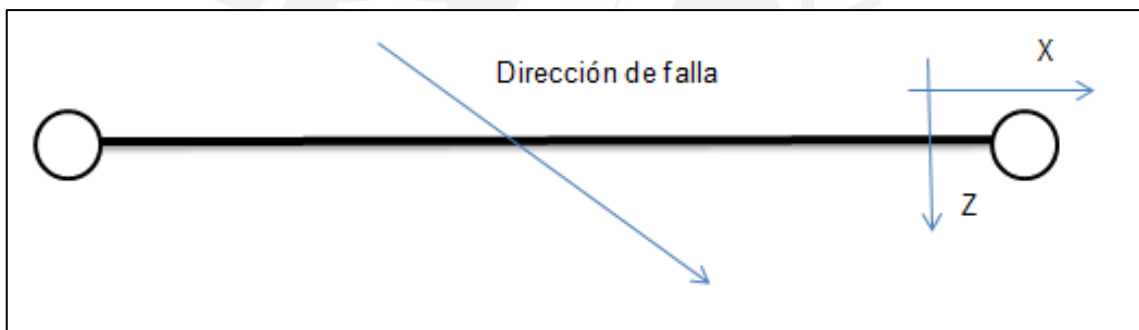


Imagen 1.12: Tubería enterrada de gran longitud (Vista de planta). (D.K. Karamitros, 2011 pág. 1457)

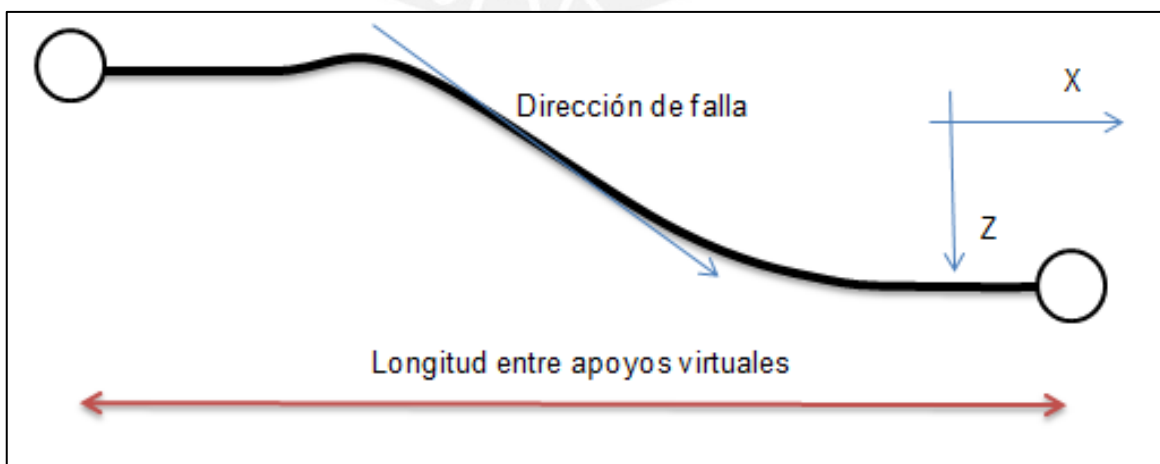


Imagen 1.13: Tubería de gran longitud enterrada sometida a una falla lateral (Vista de planta). (D.K. Karamitros, 2011 pág. 1457)

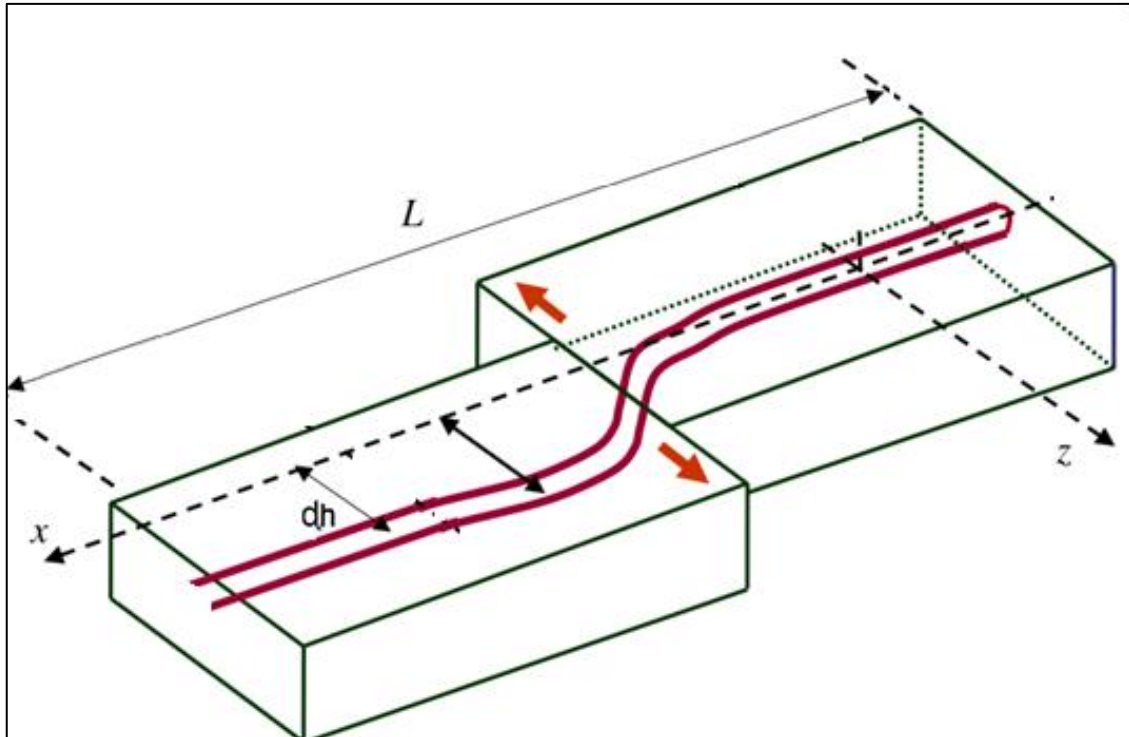


Imagen 1.14: Vista isométrica de una tubería enterrada afectada por un deslizamiento lateral. (Adaptado de Polynikis Vazouras, 2010 pág. 1374)

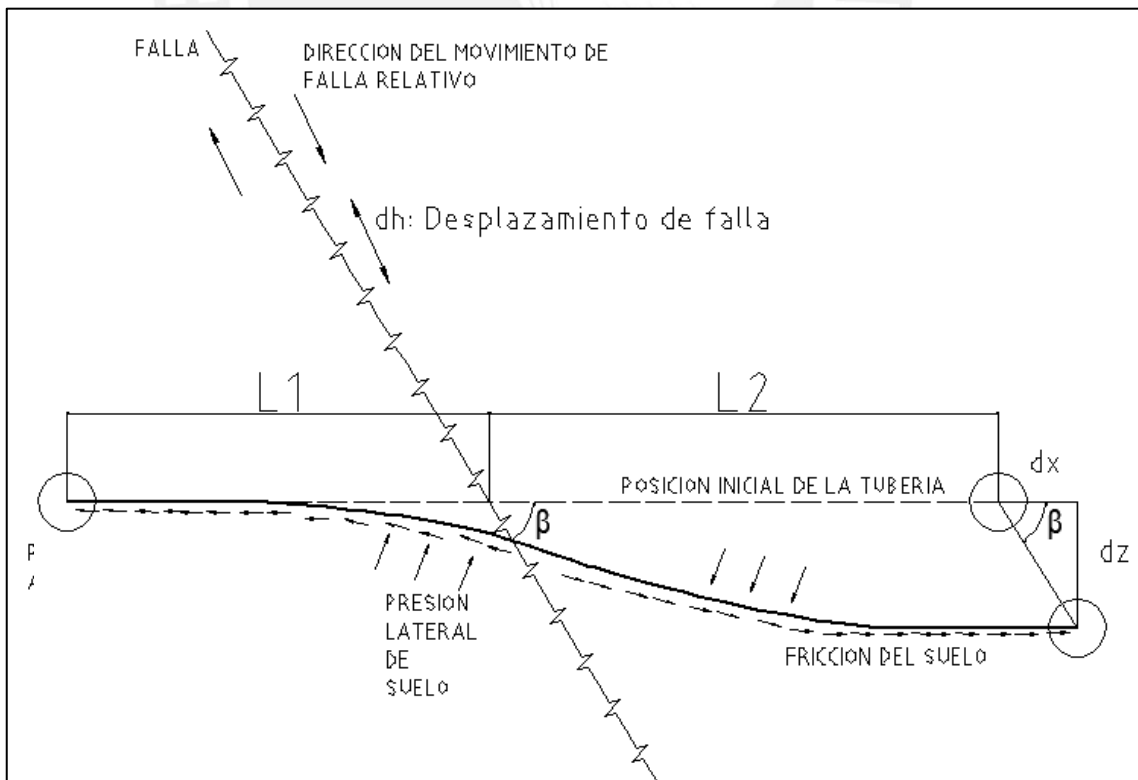


Imagen 1.15: Esquema vista de planta de una tubería enterrada sometida a un efecto de falla lateral (Vista de planta) (Kennedy RP, 1977 pág. 618)

La imagen 1.15 esquematiza un desplazamiento dh lateral del suelo, además de los efectos que el deslizamiento genera en la tubería (como la presión y la fricción lateral del suelo).

El desplazamiento dh genera un desplazamiento dx (paralelo a la dirección axial inicial) y dz (perpendicular al eje inicial de la tubería).

Al descomponer el desplazamiento lateral en ejes “x” y “z” se obtiene:

$$dx = dh \cos\beta \quad (1.12)$$

$$dz = dh \sin\beta \quad (1.13)$$

Las consideraciones para utilizar el procedimiento de Kennedy son:

- El ángulo de falla β se da entre 0 a 95°.
- Debido a la falla la tubería se alarga.
- La deformación debida a la flexión dada por el modelo de Kennedy ofrece mejor aproximación, si se analiza grandes desplazamientos de suelos, aproximadamente mayores a 1,5 veces el diámetro de la tubería.
- La velocidad relativa de desplazamiento del suelo es pequeña, por lo que los efectos son analizados en régimen estático.
- Como se ve en la imagen 1.16 el análisis propuesto por Kennedy, R.P. (1977b) implica que la tubería se desplazó lateralmente una distancia dz . Sin

embargo, para el cálculo del radio de curvatura se considera solo la mitad de la falla $dz/2$, ver imagen 1.17.

- El modelo de Kennedy, R.P. (Kennedy RP, 1977 pág. 625) no considera la deflexión en la intersección de la falla con la tubería, sino una deformación plástica como se ve en la siguiente imagen 1.16, por lo que la deformación debida a la flexión en la zona anterior a la falla es ignorada.

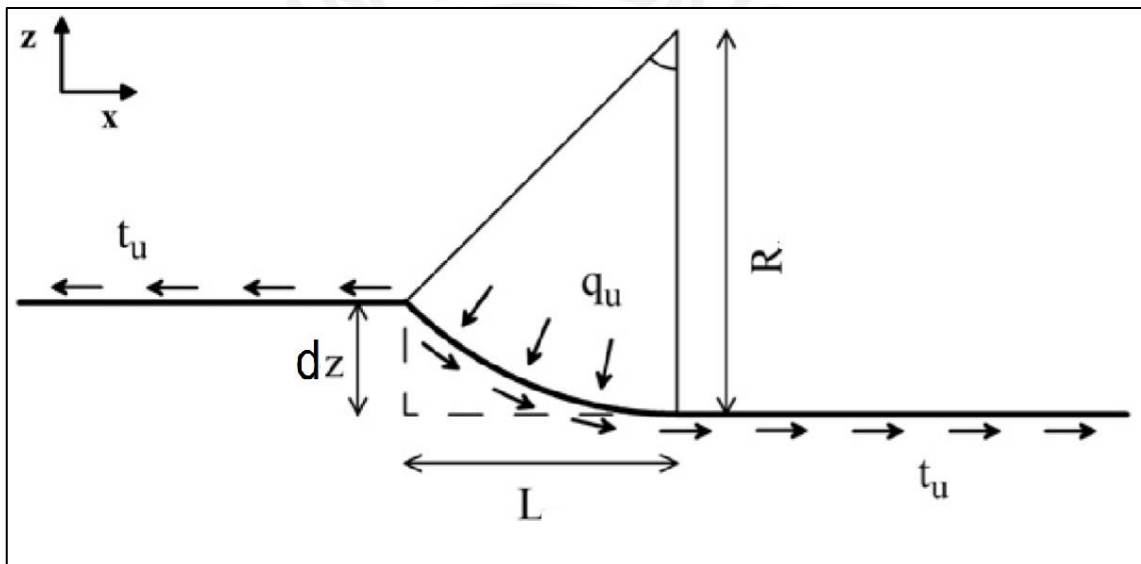


Imagen 1.16: Esquema del desplazamiento lateral modelado por Kennedy (Vista de planta) (Kennedy RP, 1977 pág. 625)

1.6.2. Procedimiento para la determinación de los efectos en tuberías enterradas por fallas de suelo

Con el procedimiento propuesto por Kennedy (Kennedy RP, 1977 págs. 617-633), se puede obtener la deformación axial y el esfuerzo axial que ocurre en la tubería por efecto de falla de suelo de tipo lateral.

El procedimiento es un proceso iterativo que comienza con la suposición del esfuerzo axial. Luego se procede a calcular la fuerza axial que es sometida la tubería debido la falla del suelo. Con el valor de la fuerza axial se calcula el radio de curvatura, que se origina en la tubería por el movimiento geológico. Con lo anterior se calcula el alargamiento total dado por la geometría y el alargamiento total dado por el material de la tubería. El proceso iterativo termina cuando el valor del alargamiento total, dado por la geometría, es igual o muy cercano al alargamiento total dado por el material de la tubería. Luego de esto se obtiene el valor de la deformación unitaria máxima y mínima originada en la tubería por la falla de suelo y se comprueba que las deformaciones unitarias de la tubería cumplan con los límites de diseño permitido.

1.6.2.1 Fuerza axial en la tubería debida al efecto de falla de suelo

La fuerza axial de tracción en la tubería, que se origina por la falla de suelo, es dada por:

$$F \quad (1.14)$$

En donde:

: Esfuerzo axial (N/m^2).

As : Área de la sección transversal de la tubería(m^2): –

Una falla de suelo origina en la tubería deformada un arco de curvatura como el que se muestra en la imagen 1.17. Es necesario determinar el valor de este radio de curvatura para obtener la longitud entre los apoyos virtuales.

1.6.2.2. Radio de curvatura originada por la falla del suelo

Para el cálculo, la curvatura en la zona de deslizamiento se considera constante. El valor de esta se obtiene dividiendo la fuerza axial entre la resistencia lateral.

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (1.15)$$

En donde:

R_{cl} : Radio de curvatura lateral (m).

P_u : Resistencia lateral del suelo por unidad de longitud de tubería (N/m).

k_h : Curvatura horizontal (1/m).

F_{axial} : Es la fuerza axial a una distancia x , donde x es la distancia que comienza en el punto de intersección del plano de falla y la tubería a cualquier sección en la zona de curvatura(N).Ver imagen 1.17.

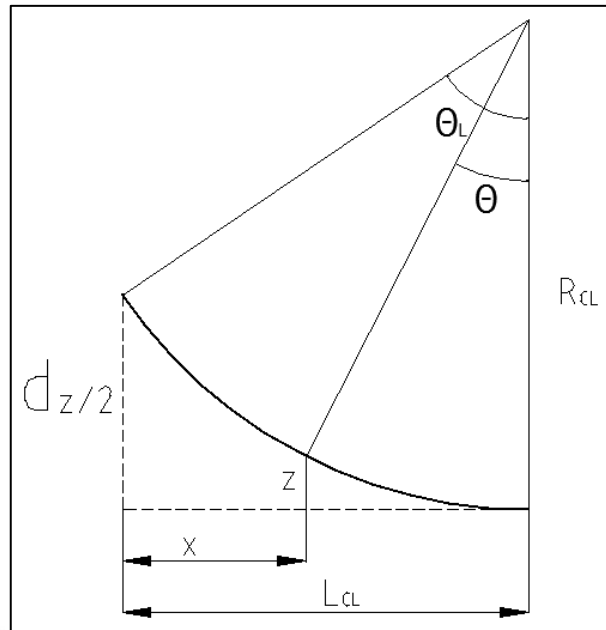


Imagen 1.17: Esquema de la sección de curvatura (Vista de planta) (Kennedy RP, 1977 pág. 625)

1.6.2.3. Resistencia de fricción en la sección de curvatura

La resistencia axial en la sección curvada se obtiene con la multiplicación de la resistencia axial sobre la tubería en la sección recta, por un factor empírico K . Este factor se obtiene de Kennedy (Kennedy RP, 1977 pág. 624) el cual se calcula de la siguiente forma:

$$45(-) \quad (1.17)$$

Entonces el valor de la resistencia de fricción en la sección de curvatura es:

$$(1.18)$$

1.6.2.4. Longitud entre apoyos virtuales

Para el cálculo analítico es la longitud mínima que debe tener la tubería para que se pueda dar una correcta transmisión de la resistencia de fricción a lo largo de la tubería.

Para la simulación indica la longitud analizada en el procedimiento.

$$\text{-----} \quad (1.19)$$

La suma de L_1 y L_2 es conocida como longitud entre puntos de anclaje virtual (L_e).

$$(1.20)$$

En donde:

L_1 y L_2 : Longitudes lateral mínimas para transmisión de la resistencia de fricción axial (m).

L_{cl} : Proyección del arco de curvatura en el plano horizontal (m). Ver imagen 1.17.

t_u : Resistencia axial sobre la tubería en la sección recta (N/m).

t_{uc} : Resistencia axial sobre la tubería en la sección curvada (N/m).

1.6.2.5. Alargamiento total de la tubería en términos de la geometría

La deformación total axial que sufre la tubería puede ser obtenida por relaciones geométricas. Esta se muestra a continuación.

$$\text{-----} \quad (1.21)$$

Un reacomodo de la expresión anterior se muestra en la siguiente expresión:

$$\text{---} \quad (1.22)$$

Donde:

: $\delta_n \cos \beta$

$\delta_n \sin \beta$

$$L_{CL} : \tag{1.23}$$

1.6.2.6. Alargamiento total de la tubería en términos del material

El alargamiento total de la tubería puede ser definido en función al material en términos de la deformación unitaria expresada por la ecuación de Ramberg y Osgood (Ramberg, 1943 pág. 400). Con esto se obtiene la deformación axial máxima que el material de la tubería le permite.

Se obtiene sumando las deformaciones axiales los tramos rectos a ambos lados de la tubería como las deformaciones axiales en la sección curvada.

De allí que la deformación disponible es:

$$\tag{1.24}$$

Cada término se expresará de la siguiente manera:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right) - \left[\frac{\sigma}{\sigma_y} \right] \tag{1.25}$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right) - \left[\frac{\sigma}{\sigma_y} \right] \tag{1.26}$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right) - \left[\frac{\sigma}{\sigma_y} \right] \tag{1.27}$$

$$- \tag{1.28}$$

$$- \tag{1.29}$$

$$- \tag{1.30}$$

$$\tag{1.31}$$

(1.32)

(1.33)

(1.34)

(1.35)

(1.36)

Donde:

n y r : Coeficientes de Ramberg-Osgood. En la tabla a3 se encuentran los valores de los coeficientes n y r .

t_u : Resistencia axial sobre la tubería en la sección recta.

t_{uc} : Resistencia axial sobre la tubería en la sección curvada.

1.6.2.7. Deformación axial

La deformación unitaria en la sección de curvatura se obtiene por:

(1.37)

Donde:

D : Diámetro exterior de la tubería(m).

R_{cl} : Radio de curvatura lateral(m).

La deformación unitaria axial en el tramo recto se obtiene por la expresión Ramberg y Osgood (1943) [7] (Kennedy RP, 1977 pág. 626).

(1.38)

En donde:

: Esfuerzo axial (N/m^2). Supuesto inicialmente.

: Esfuerzo de fluencia (N/m^2).

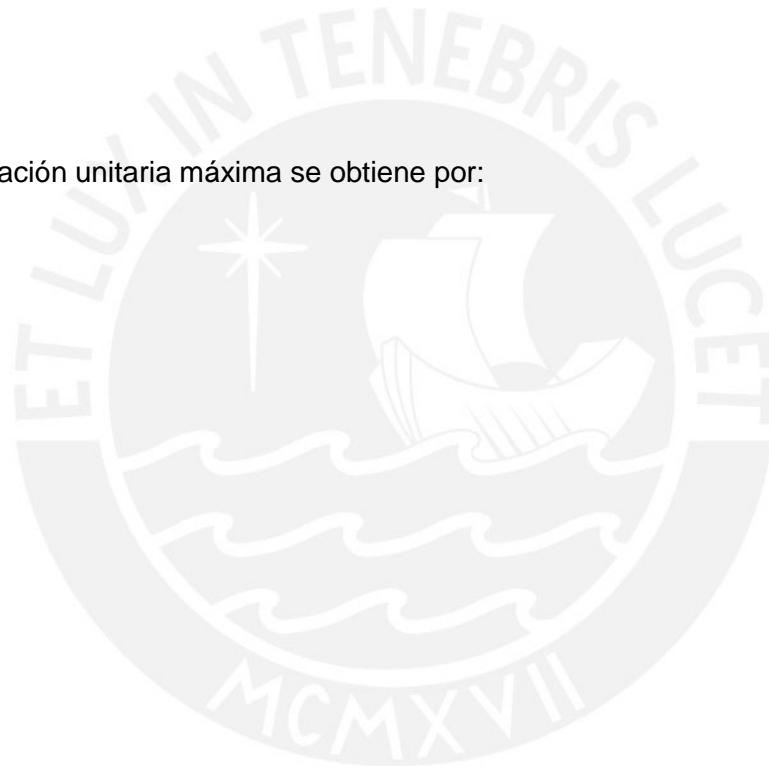
n y r : Coeficientes de Ramberg-Osgood. En la tabla a3 se encuentran los valores de los coeficientes n y r.

La deformación unitaria mínima se obtiene por:

(1.39)

La deformación unitaria máxima se obtiene por:

(1.40)



Capítulo 2

PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE UNA TUBERÍA ENTERRADA

2.1. Introducción

Tal como se mencionó en la introducción de la tesis, los datos de entrada necesarios para analizar una tubería enterrada son: para la tubería, el material, diámetro, espesor, longitud, la profundidad; para el suelo, el tipo y la densidad. Estos valores son obtenidos del reporte final elaborado por Germanischer Lloyd (Lloyd, 2007 págs. 10-21).

Las norma revisada es:

ASME B31.4: Tuberías de Transporte de Hidrocarburos Líquidos y otros Líquidos.

Con la data se procede a verificar que la tubería esté diseñada correctamente según norma ASME B31.4 (ASME B31.4, 2010).

2.2. Parámetros de la tubería

Tabla 2.1: Parámetros de la tubería

Parámetros	Valor
Material	API 5L X70

Norma	ASME B31.4
Diámetro nominal	0.350m
Diámetro exterior	0,3556m(14")
Espesor nominal	0,0048m
Profundidad (Hasta la parte superior de la tubería)	1m
Longitud	700m

2.3. Parámetros del suelo

Tabla 2.2: Parámetros del suelo

Parámetros	Valor
Tipo	Limosa
Densidad	19600N/m ³
Cohesión	0
Ángulo de fricción del suelo	30°

2.4. Condiciones de operación

Tabla 2.3: Condiciones de operación

Parámetros	Valor
Módulo de elasticidad a temperatura ambiente(20°C)	203GPa.
Presión	9MPa

2.5. Cálculo de esfuerzos y deformaciones de la tubería por diseño

2.5.1. Espesor mínimo requerido

Tabla 2.4: Propiedades de la tubería con especificación API5L y grado X70

Propiedad	Valor
SMYS	483MPa

Esfuerzo de fluencia admisible ($S = 0,72 \times SMYS$)	347,8MPa
Esfuerzo último	565MPa

En la especificación API5L se muestran los espesores estandar; para el caso mostrado se tiene un espesor de 4,80mm.

2.5.2. Cálculo de esfuerzos

A continuación se calculan los esfuerzos en la tubería sin considerar los efectos del suelo de relleno, con la finalidad de comprobar que está diseñada en su limite elástico.

2.5.2.1. Esfuerzo circunferencial

Se usa la expresión 1.1:

El esfuerzo circunferencial está por debajo del esfuerzo de fluencia admisible 347,8MPa.

2.5.2.2. Esfuerzo longitudinal

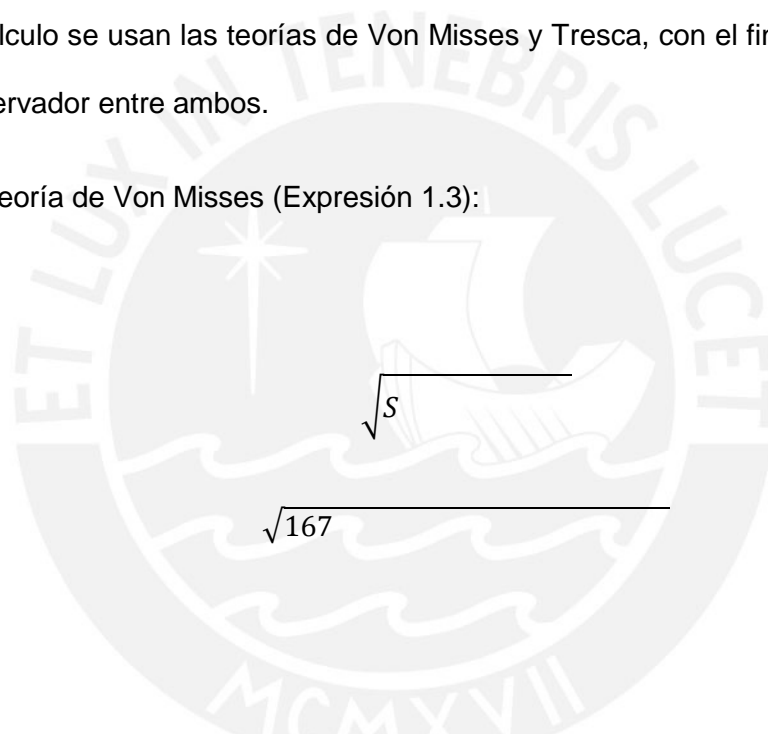
El esfuerzo longitudinal se calcula según 1.2.

El esfuerzo longitudinal está por debajo del esfuerzo de fluencia admisible 347,8MPa.

2.5.2.3. Esfuerzo combinado

Para el cálculo se usan las teorías de Von Mises y Tresca, con el fin de tener el valor más conservador entre ambos.

Según la teoría de Von Mises (Expresión 1.3):


$$\frac{\sqrt{S}}{\sqrt{167}}$$

El esfuerzo combinado esta por debajo del esfuerzo de fluencia admisible 347,8MPa.

2.5.3. Cálculo de deformación unitaria axial

Se calcula según la expresión 1.7

2.5.4. Cálculo de la resistencia axial del suelo

La resistencia axial del suelo por el movimiento de la tubería se obtiene con la expresión 1.8. Debido a que se analiza suelos no cohesivos (lo que indica que las partículas del terreno no se mantienen unidas), el valor de la variable “c”, es igual a 0.

Entonces:

$$\left(\frac{\gamma}{\gamma_{sat}} \right) t$$

$K_0 = 1 - \sin \phi$. Para el caso de estudio el valor del ángulo de fricción del suelo es de 30° indicando un suelo del tipo granular.

$\delta' = f \times \phi$. Para el caso de estudio se utiliza un factor de revestimiento de 0.6, el cual indica el uso de revestimiento del tipo polietileno.

Se calcula:

$$\left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_{sat}} \right) \left(\frac{\gamma}{\gamma_{sat}} \right) t$$

La resistencia axial máxima del suelo por unidad de longitud de tubería es:

—

2.5.5. Cálculo de la resistencia lateral del suelo

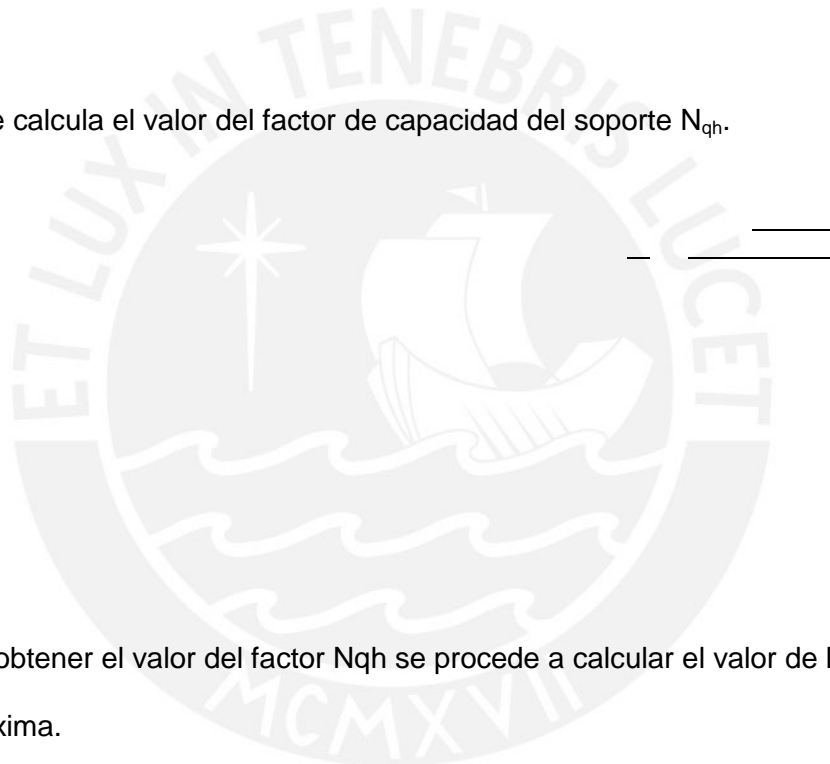
En líneas posteriores se muestra el cálculo para obtener el valor de la resistencia del suelo cuando existe un movimiento lateral del suelo.

Se usa la expresión 1.9:

$$\bar{\gamma}HD$$

Debido a que se analiza suelos no cohesivos, el valor de la variable “c”, es igual a 0.

Primero se calcula el valor del factor de capacidad del soporte N_{qh} .



Luego de obtener el valor del factor N_{qh} se procede a calcular el valor de la resistencia lateral máxima.

La resistencia lateral máxima del suelo por unidad de longitud de tubería es:

2.5.6. Cálculo de la resistencia del suelo al movimiento ascendente (uplift)

En las siguientes líneas se muestra el cálculo para obtener el valor de la resistencia del suelo cuando existe un movimiento vertical descendente del suelo.

Se usa la expresión 1.10:

$$\bar{\gamma}_{HD}$$

Debido a que se analiza suelos no cohesivos, el valor de la variable “c”, es igual a 0.

$$\left(\frac{\left(1 - \frac{c}{\gamma H}\right)}{\left(1 - \frac{c}{\gamma H}\right)} \right) \left(\frac{c}{\gamma H} \right) \left(1 - \frac{c}{\gamma H}\right)$$

La resistencia vertical máxima del suelo al movimiento ascendente del suelo, por unidad de longitud de tubería es:

—

2.5.7. Cálculo de la resistencia del suelo al movimiento descendente (bearing)

Cálculo para obtener el valor de la resistencia del suelo cuando existe un movimiento vertical descendente del suelo.

Se usa la expresión 1.11:

$$\bar{\gamma}_{HD} \quad \text{—}$$

Debido a que se analiza suelos no cohesivos, el valor de la variable “c”, es igual a 0.

$$\bar{\gamma}_{HD} \quad \text{—}$$

Primero se calcula los valores de los factores de capacidad N_q y N_y .

$$\left(45 \quad - \right)$$

$$\left(45 \quad - \right)$$

Luego se reemplaza y se obtiene la resistencia vertical máxima del suelo al movimiento descendente del suelo por unidad de longitud de tubería.

2.6. Parámetros para diseño de la tubería enterrada

Tabla 2.5: Parámetros de diseño de la tubería enterrada

	Simbolo	Unidad	Valor
Espesor nominal			
Esfuerzo circunferencial			
Esfuerzo longitudinal			
Deformación unitaria axial		%	
Resistencia axial del suelo		—	
Resistencia lateral del suelo		—	
Resistencia del suelo al movimiento ascendente (uplift)		—	
Resistencia del suelo al movimiento descendente (bearing)		—	

Capítulo 3

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES, MEDIANTE CÁLCULO ANALÍTICO Y ELEMENTOS FINITOS

3.1. Introducción

En este capítulo se proporciona el cálculo del procedimiento empleado en esta tesis para obtener los esfuerzos y deformaciones originadas en las tuberías enterradas por efectos de una falla de suelo de tipo lateral.

Con la finalidad de estudiar y comprender la respuesta de la tubería enterrada frente a deslizamientos de suelo se llevan dos pasos de análisis: Primero se realiza un análisis basado en el procedimiento propuesto por Kennedy y, posteriormente, se realiza un análisis de elementos finitos mediante el uso del software de elementos finitos ANSYS APDL MECHANICAL.

3.2. Enunciado del problema de análisis

Una tubería enterrada a 1m de profundidad (medida desde la superficie hasta la parte superior del tubo) transporta gas natural líquido. La tubería es API 5L X70, de diámetro exterior 0,3556m y de espesor de pared 0,0048m, el suelo es no cohesivo (lo que indica que las partículas del terreno no se mantienen unidas) con densidad de 19600N/m^3 y el ángulo de fricción del suelo es 30° .

3.3. Planteamiento del problema

Evaluar las deformaciones y esfuerzos en la tubería debido a la acción de una falla lateral, Δh de 0,7m (que corresponden a dos veces el diámetro) sobre una tubería enterrada de 700m de largo, cuyo ángulo de cruce con la tubería es: $\beta = 90^\circ$.

Ver imagen 1.15 para la representación gráfica del problema de análisis.

3.4. Resultados del cálculo analítico

Para el cálculo analítico se utiliza el procedimiento dado por Kennedy, R.P. (1977b) que se explica en el capítulo 1.

En las siguientes tablas: 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran los resultados para: respectivamente.

Los detalles del cálculo analítico se encuentran en el anexo 3, 4 y 5 respectivamente.

Tabla 3.1: Resultados del cálculo analítico para

Longitud de 700m			
	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Desplazamiento		m	0,7
Esfuerzo axial		MPa	412
Fuerza axial		N	2179480
Deformación por geometría		m	0,7
	$L_1=L_2$	m	346
Longitud entre apoyos virtuales	L_1+L_2	m	692
Deformación por material		m	0,7
Elongación de flexión en la sección de		%	0

curvatura			
Elongación axial		%	0,21
Elongación mínima		%	0,21
Elongación máxima		%	0,21

Tabla 3.2: Resultados del cálculo analítico para

Longitud de 700m			
	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Desplazamiento		m	0,7
Esfuerzo axial		MPa	128
Fuerza axial		N	677120
Deformación por geometría		m	0,06
	$L_1=L_2$	m	102,1
Longitud entre apoyos virtuales	L_1+L_2	m	204,2
Deformación por material		m	0,061
Elongación de flexión en la sección de curvatura		%	1,69
Elongación axial		%	0,063
Elongación mínima		%	-1,63
Elongación máxima		%	1,75

Tabla 3.3: Resultados del cálculo analítico para

Longitud de 700m			
	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Desplazamiento		m	0,7
Desplazamiento axial		m	0,49
Desplazamiento lateral		m	0,49
Esfuerzo axial		MPa	363
Fuerza axial		N	1920270
Deformación por geometría		m	0,52
	$L_1=L_2$	m	297,5
Longitud entre apoyos virtuales	L_1+L_2	m	595
Deformación por material		m	0,52
Elongación de flexión en la sección de curvatura		%	0,6
Elongación axial		%	0,18
Elongación mínima		%	-0,42
Elongación máxima		%	0,78

Tabla 3.4: Tabla resumen de resultados para los tres casos (β 45°)

Desplazamiento(Δh) =0.7m	Unidad			
Esfuerzo axial	MPa	412	128	363
Longitud mínima que debería tener la tubería	m	692	204	595
Elongación de flexión en la sección de curvatura	%	0	1,69	0,6

Elongación axial	%	0,21	0,063	0,18
Elongación mínima	%	0,21	-1,63	-0,42
Elongación máxima	%	0,21	1,75	0,78

3.5. Simulación mediante elementos finitos

3.5.1. Explicación de la simulación

Para la simulación se trata el mismo problema calculado en la sección de cálculo analítico. La tubería es API 5L X70, de diámetro exterior 0,3556m y de espesor de pared 0,0048m. El poliducto está enterrado a una profundidad de 1m, y el suelo es no cohesivo (lo que indica que las partículas del terreno no se mantienen unidas) con densidad de 19600N/m^3 y ángulo de fricción del suelo de 30° .

Evaluar las deformaciones en la tubería debido a la acción de una falla lateral de 0,7m cuando el ángulo de cruce con la tubería es de $\beta = 0^\circ, 90^\circ$ y 45° .

La ubicación de la falla es a 351m del extremo izquierdo, que se ubica un set de cuatro resortes.

La simulación del desplazamiento (dh) de suelo implica la aplicación de los desplazamientos descompuestos en los ejes axial (dx) y lateral (dz). Como se muestra en la imagen 1.15

Al descomponer el desplazamiento lateral en ejes "x" y "z" se obtiene:

$$(4.1)$$

$$(4.2)$$

Estos desplazamientos descompuestos (dx y dz) se aplican al nodo libre del resorte (Representado con una línea en la imagen 3.1) en las direcciones que

correspondan (x y z respectivamente). Los resortes verticales están restringidos $dy = 0$.

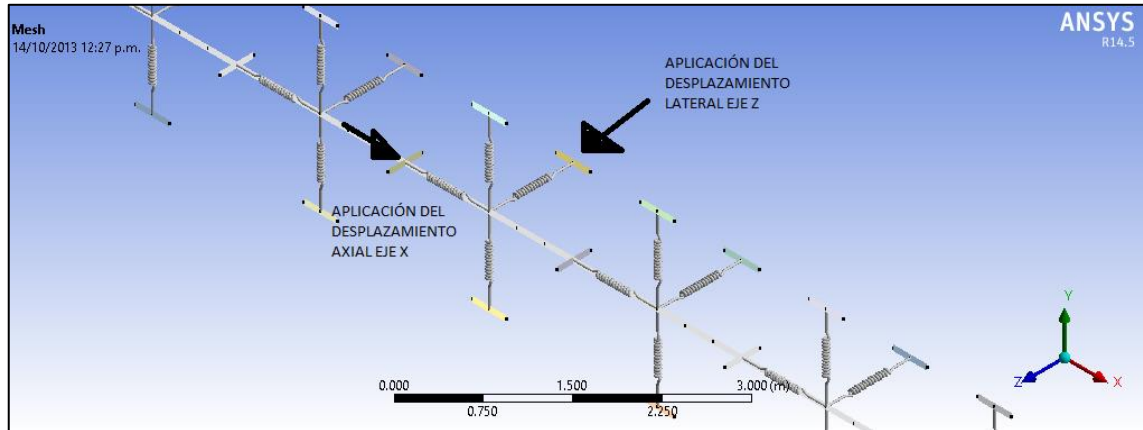


Imagen 3.1: Muestra gráfica de la ubicación de los desplazamientos

Para la simulación se considera la aplicación de los desplazamientos de suelo a todos los resortes laterales, verticales y axiales ubicados a la derecha del nodo central de la tubería donde ocurre la falla. Ver imagen 3.2. El desplazamiento que se impone a los resortes verticales es de 0.

Los resortes ubicados a la izquierda del punto de falla se restringen en movimiento dependiendo de la dirección del resorte (los resortes verticales están restringidos en la dirección vertical; los resortes axiales, en la dirección axial y los resortes laterales, en la dirección lateral), ya que simulan que esa zona no sufrió la falla.

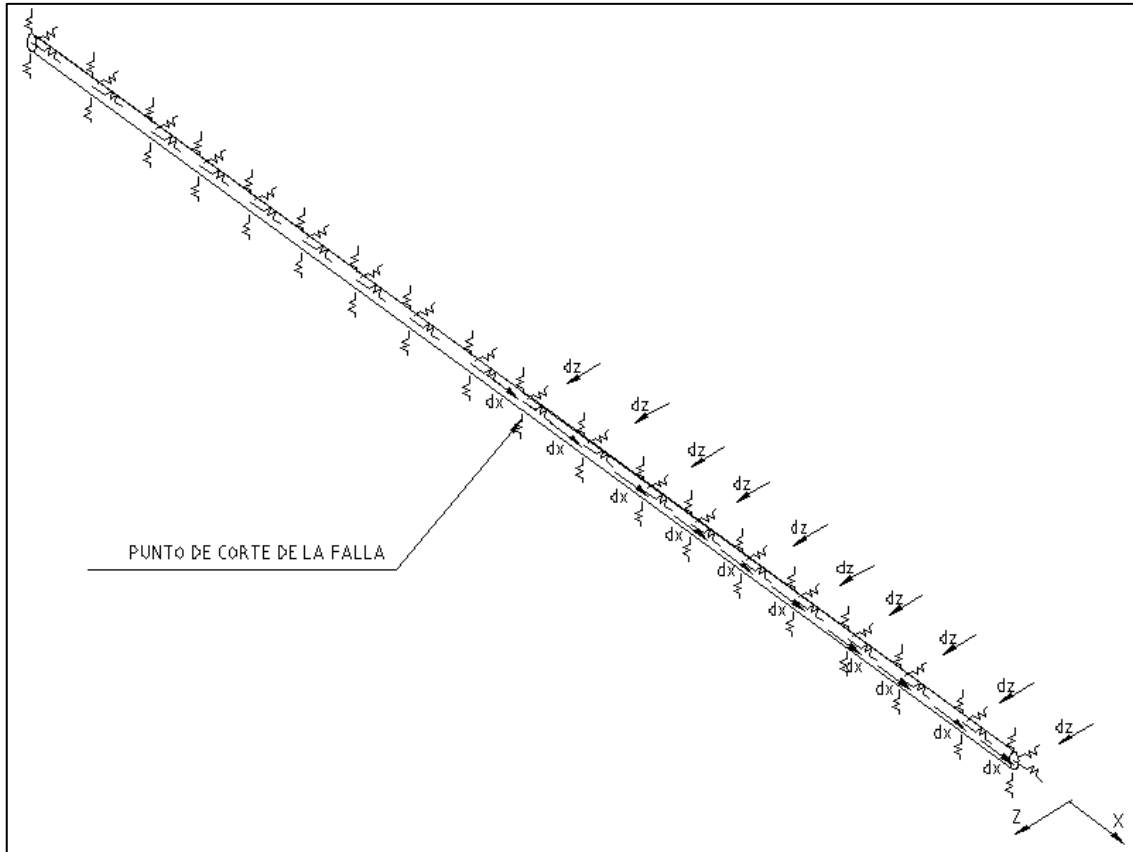


Imagen 3.2: Esquema de la ubicación de los desplazamientos que se usa en ANSYS.

3.5.2. Procedimiento de simulación

3.5.2.1. Selección del material

Los parámetros del material de la tubería API 5L X70 se muestran en la siguiente tabla

3.5.

Tabla 3.5: Valores de las propiedades

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7850	Kg/m ³
Módulo de elasticidad	2,1e11	Pa
Razón de Poisson	0,3	
SMYS	483	MPa
Elongación de fluencia	%	0,24

La curva esfuerzo versus deformación del material de la tubería se muestra en la siguiente imagen:

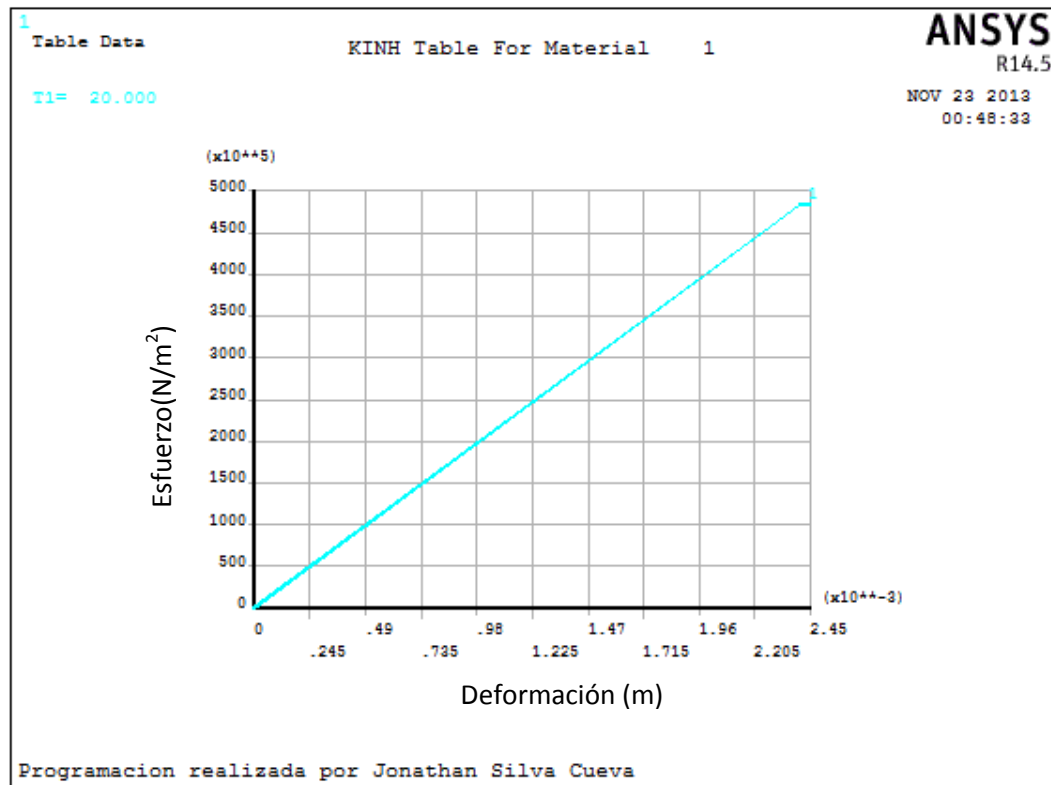


Imagen 3.3: Curva Esfuerzo – Deformación de API 5L X70

3.5.2.2. Definición de la geometría

Para crear la geometría en el APDL Mechanical se define la longitud de la tubería. Para nuestro análisis se considera una longitud de 700m, debido a que según el cálculo analítico (Ver tabla 3.4) se tiene una longitud mínima de 692m.

La longitud de 700m se dibujan en el APDL como puntos espaciados 1m cada uno, por lo que se tendría 701 nodos.

Un nodo de la tubería es soportado por cuatro resortes, dos verticales, uno lateral y otro paralelo a la tubería (Ver imagen 3.5). Estos resortes se simulan con elementos conectores entre los nodos de la tubería y los correspondientes nodos de la suelo.

El suelo alrededor de la tubería es modelado usando resortes con ubicaciones discretas, para mayor información revisar el capítulo 1.5.

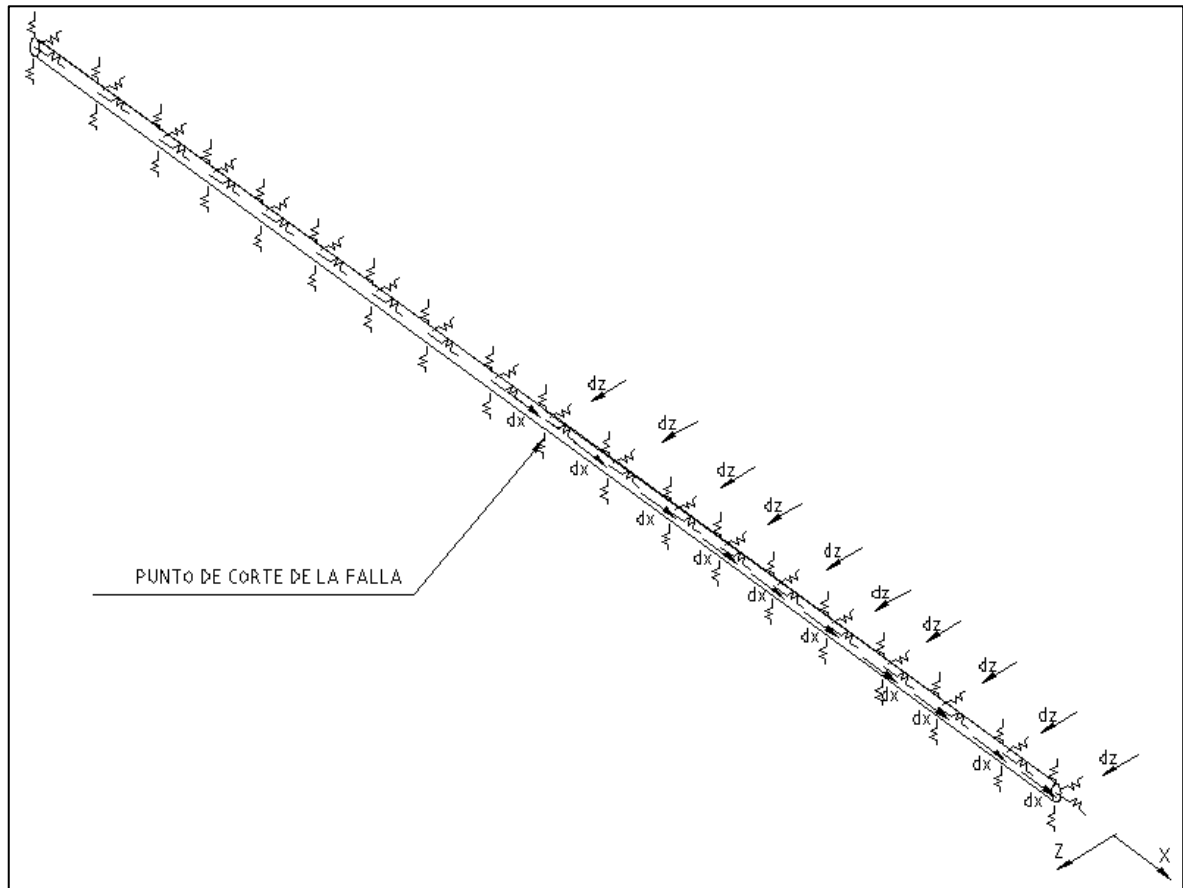


Imagen 3.4: Geometría del modelo de elemento finito propuesto para la tubería.

3.5.2.3. Definición de la conexiones

Las conexiones son resortes bilineales ubicados discretamente entre los nodos de la tubería y los nodos correspondientes al suelo. Cada nodo de la tubería es soportada por cuatro resortes. En la siguiente imagen 3.5 se representa un nodo de la tubería que se colocan cuatro resortes, dos verticales en la dirección Y , 1 lateral en la dirección Z y el último axial en la dirección X .

El número de total de resortes es de 2804, distribuidos equitativamente en las tres direcciones.

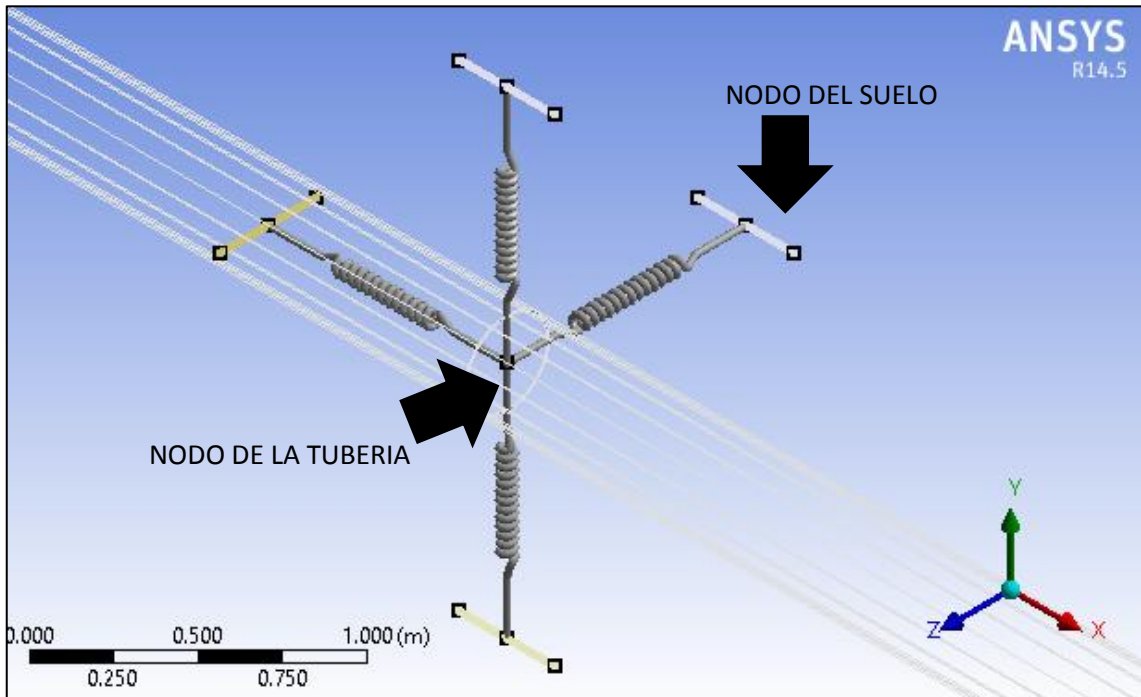


Imagen 3.5: Modelo de resorte-tubería implementado en ANSYS.

Cada resorte requiere de un valor de rigidez, esta se obtiene mediante el modelo de resortes bilineales. Este modelo propone la utilización resortes inelásticos en cada dirección (vertical, axial y lateral) para representar la interacción suelo-tubería.

La rigidez de cada resorte se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$(-)$$

- **Cálculo de la rigidez axial del suelo**

En la tabla 2.5 se encuentra el valor de la resistencia al movimiento longitudinal. (ALA, July 2001 pág. 68)

El desplazamiento necesario de la tubería, para que esto suceda, es de 3mm según (ALA, July 2001 pág. 68).

Ver anexo 5 para visualizar la curva (resistencia vs desplazamiento) y la comprobación de las propiedades mediante simulación.

- **Cálculo de la rigidez lateral del suelo**

En la tabla 2.5 se encuentra el valor de la resistencia al movimiento lateral (ALA, July 2001 pág. 70).

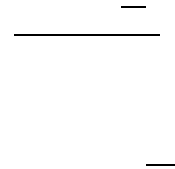
El desplazamiento necesario de la tubería, para que esto suceda, es 0,04 (H+D/2), y es de 0,054224m. (ALA, July 2001 pág. 70).

Ver anexo 6 para visualizar la curva (resistencia vs desplazamiento) y la comprobación de las propiedades mediante simulación.

- **Cálculo de la rigidez del suelo al movimiento ascendente (uplift)**

En la tabla 2.5 se encuentra el valor de la resistencia al movimiento ascendente. (ALA, July 2001 pág. 71).

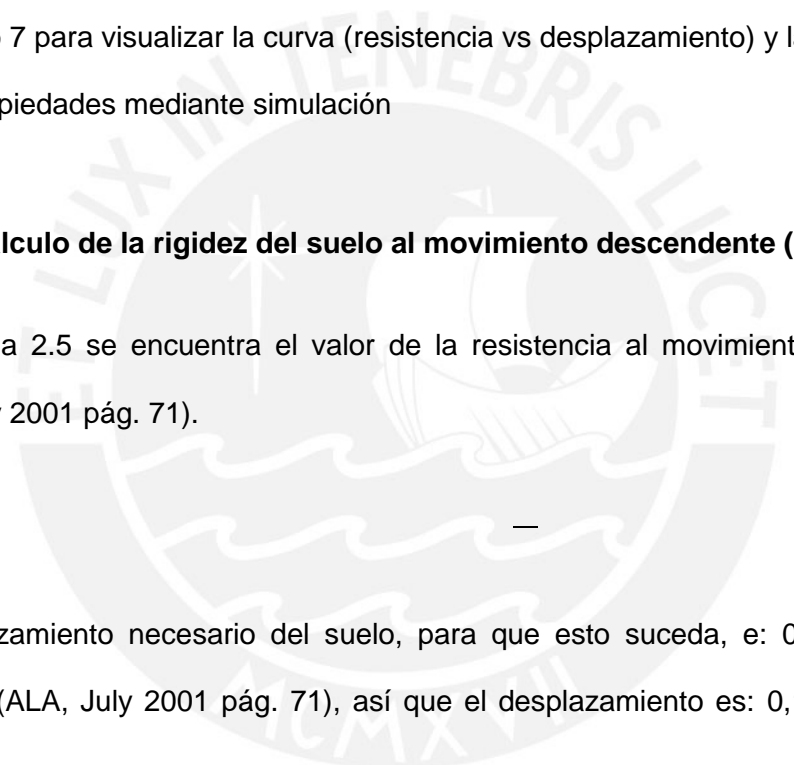
El desplazamiento necesario de la tubería para que esto suceda, es $0,01H$ para suelo granular. (ALA, July 2001 pág. 71) así que el desplazamiento es $0,01 \times (1 + 0,1778) = 0,011778m$.



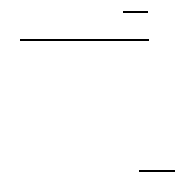
Ver anexo 7 para visualizar la curva (resistencia vs desplazamiento) y la comprobación de las propiedades mediante simulación

- **Cálculo de la rigidez del suelo al movimiento descendente (bearing)**

En la tabla 2.5 se encuentra el valor de la resistencia al movimiento descendente. (ALA, July 2001 pág. 71).



El desplazamiento necesario del suelo, para que esto suceda, e: $0,1D$ para suelo granular. (ALA, July 2001 pág. 71), así que el desplazamiento es: $0,1 \times 25,4 \times 14 = 35,56mm$.



Ver anexo 8 para visualizar la curva (resistencia vs desplazamiento) y la comprobación de las propiedades mediante simulación:

3.5.2.4. Elemento tubería-ANSYS

El tramo de tubería fue modelado usando PIPE288, que es utilizado para modelar tuberías de espesor delgado.

PIPE288 es un elemento que tiene seis grados de libertad en cada nodo. (Las traslaciones en la X, Y y Z y las rotaciones alrededor de los ejes X, Y y Z).

Para nuestro caso el elemento PIPE288 se usa con las siguientes características:

- Función de forma cuadrática para obtener una mayor aproximación de los esfuerzos resultantes.
- El esfuerzo circunferencial se obtiene considerando espesor delgado para diámetro / espesor mayor a 10.

La geometría del elemento PIPE288 se muestra en la siguiente imagen 3.6

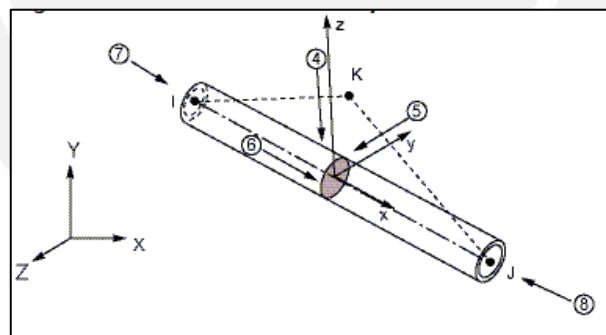


Imagen 3.6: Geometría del elemento tubería - PIPE288. Ref: APDL Help desk

3.5.3 Diagrama de flujo del código

Para escribir el programa en ANSYS APDL, primero se realiza un diagrama de flujo. Este contiene dos etapas la etapa de preprocesador y la de procesador (solución).

En la etapa de preprocesador se realizan: La definición de parámetros, en donde se definen las constantes del programa; se crean elementos, estos elementos son del

tipo resorte COMBIN39 y del tipo tubería PIPE288; estos elementos requieren de valores que se añaden con las especificaciones del problema; posteriormente se programa la geometría de la tubería y la ubicación de los resortes. Para finalizar se le da el mallado a los elementos creados.

En la etapa de procesador se coloca el valor de los desplazamientos de los resortes que simularán el deslizamiento del terreno. Entonces se restringen los movimientos laterales, axiales y verticales de los resortes que se ubican a la izquierda del nodo de falla y se provee el desplazamiento de los resortes de la derecha.

Luego de dar la instrucción de resolver al compilador se obtienen los resultados de la interfaz gráfica del ANSYS APDL, del siguiente modo:

Primero, se hace click en el General Postproc(Postprocesador), luego en el List Results(Lista de resultados) y finalmente en Element Solution(Solución del elemento).

Ver imagen 3.7

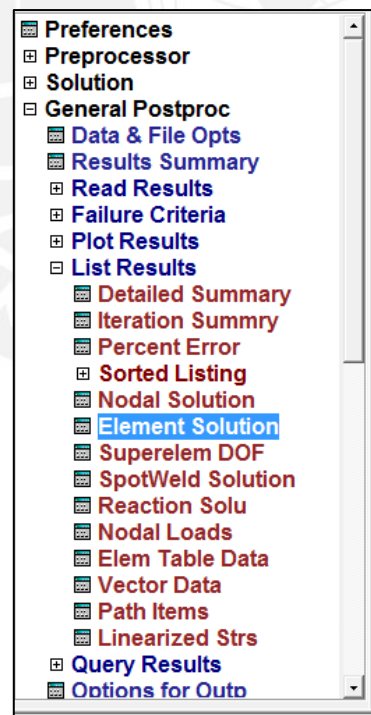


Imagen 3.7: Barra de opciones del APDL Mechanical

Segundo, se selecciona la lista del cual se desea tener información. Para nuestro caso es elastic strain (deformación unitaria elástica) y structural forces (fuerzas estructurales). Ver imagen 3.8.

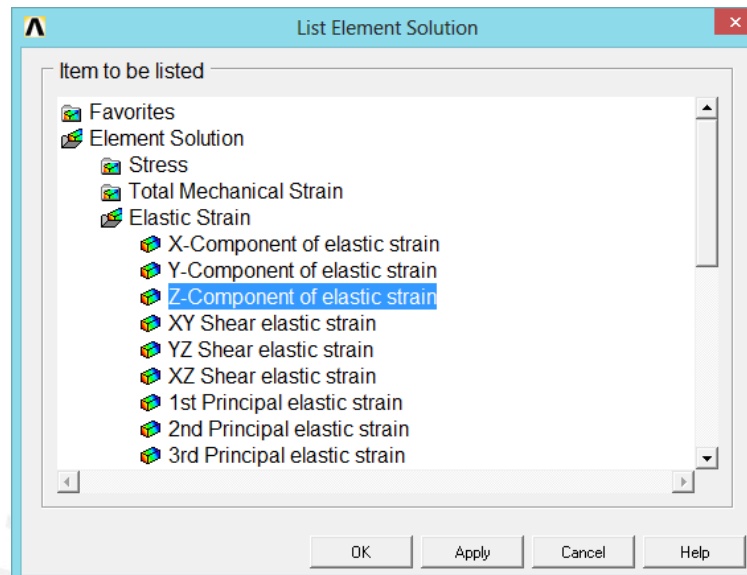
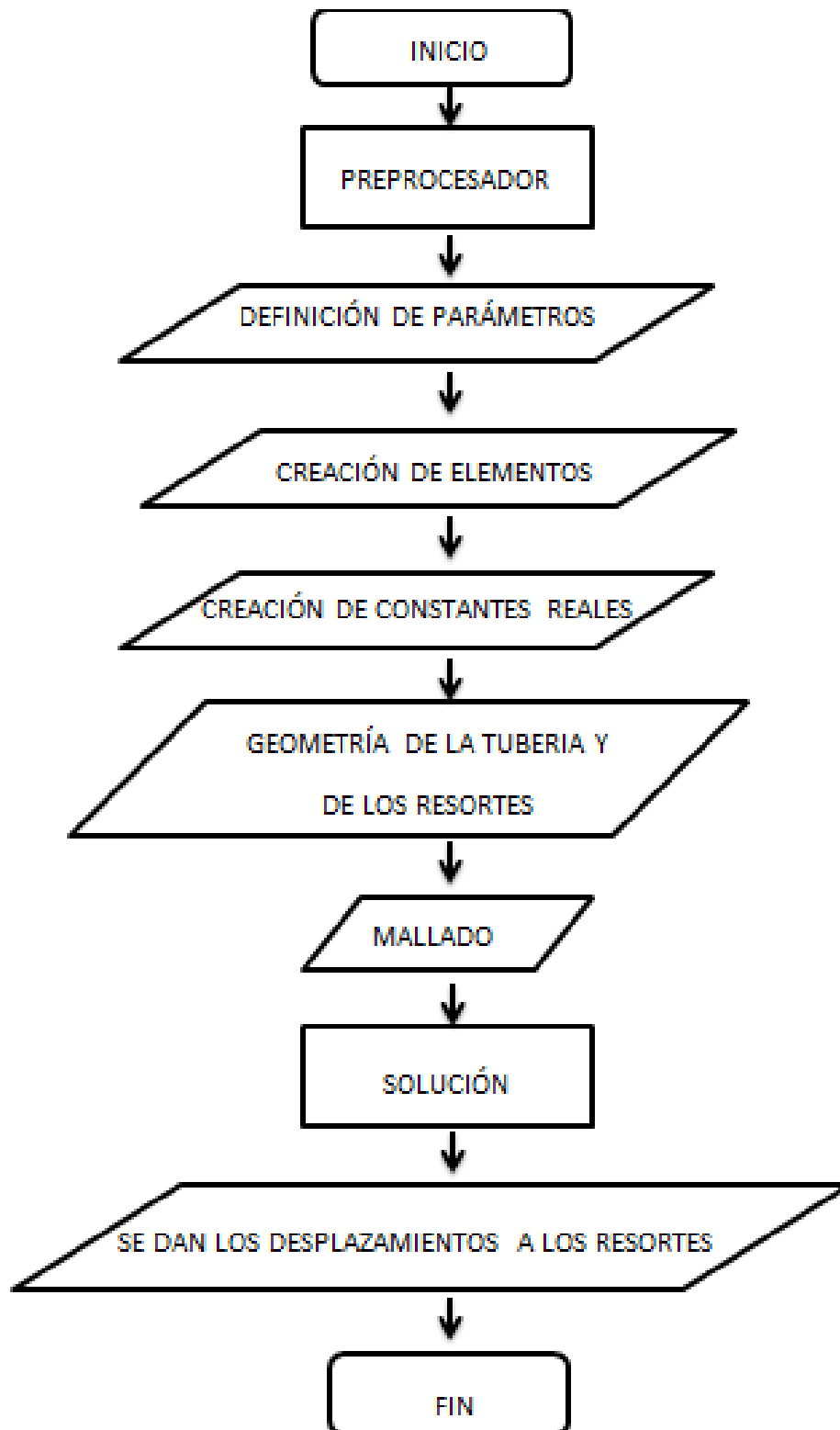


Imagen 3.8: Opciones para la obtención de resultados

La programación en APDL Mechanical se encuentra en el anexo 9, donde se escribe el código en el lenguaje de programación APDL.



3.5.4. Procedimiento de la simulación

Para una longitud de 700 m, este problema se va a tratar en tres etapas:

- Primero se realiza una simulación de los efectos sin variaciones de presión ni temperatura, que se considera los desplazamientos de suelo Δh igual a 0,7m con un ángulo β igual a 0° .
- Segundo se realiza una simulación de los efectos sin variaciones de presión ni temperatura, que se considera los desplazamientos de suelo Δh igual a 0,7m con un ángulo β igual a 90° .
- Tercero se realiza una simulación de los efectos sin variaciones de presión ni temperatura, que se considera los desplazamientos de suelo Δh igual a 0.7m con un ángulo β igual a 45° .

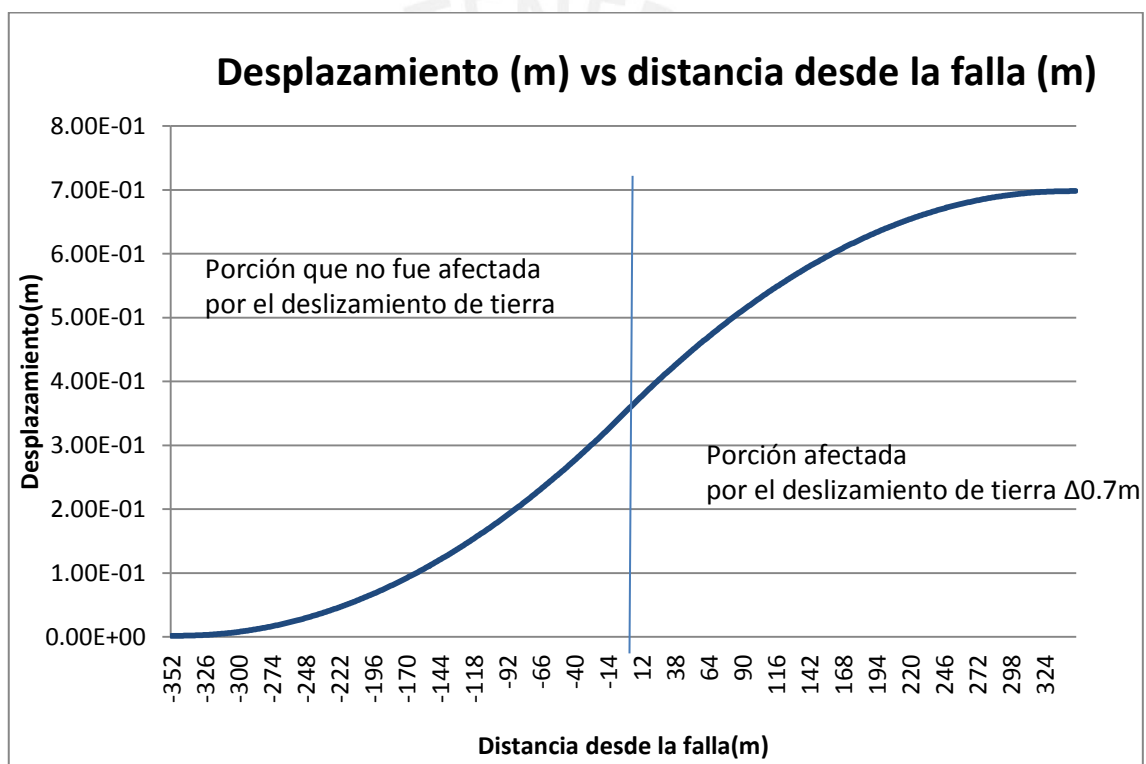
3.5.4.1. Resultados de la simulación para $\Delta h = 0,7\text{m}$, $\beta = 0^\circ$

En las siguientes cuatro gráficas, la variación del desplazamiento axial, resistencia de fricción axial, fuerza axial y elongación axial.

De la gráfica 3.1.:

- Se aplicó un desplazamiento de 0,7m a los resortes ubicados a la derecha del punto de falla.
- Se puede ver que la curva describe la deformación axial que sufre la tubería a lo largo de su longitud, desde un valor mínimo de 0 hasta un valor máximo de 0,7m.

- Como se ve en la gráfica, los resortes bilineales cumplen correctamente su función, muestran un deslizamiento de 0,7m al final del tramo a la derecha del punto de falla, el cual es el impuesto para el análisis.
- Se puede visualizar que la curva es simétrica con respecto al punto de falla, y que en el punto de falla ocurre un desplazamiento cercano a 0,35m.

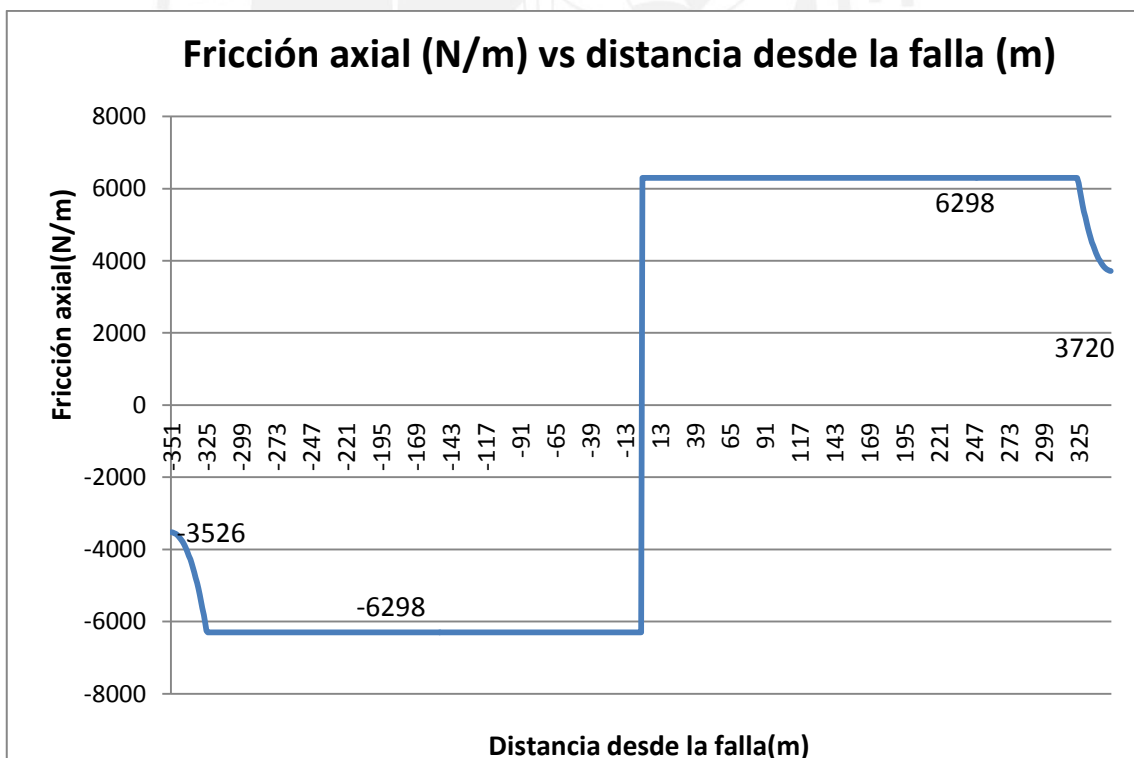


Gráfica 3.1: Comportamiento de la tubería con respecto al punto de falla

De la gráfica 3.2.

- El valor de la resistencia de fricción axial máxima, obtenida en la simulación, es comparable con la calculada en el procedimiento analítico. Este valor es 6298N/m.

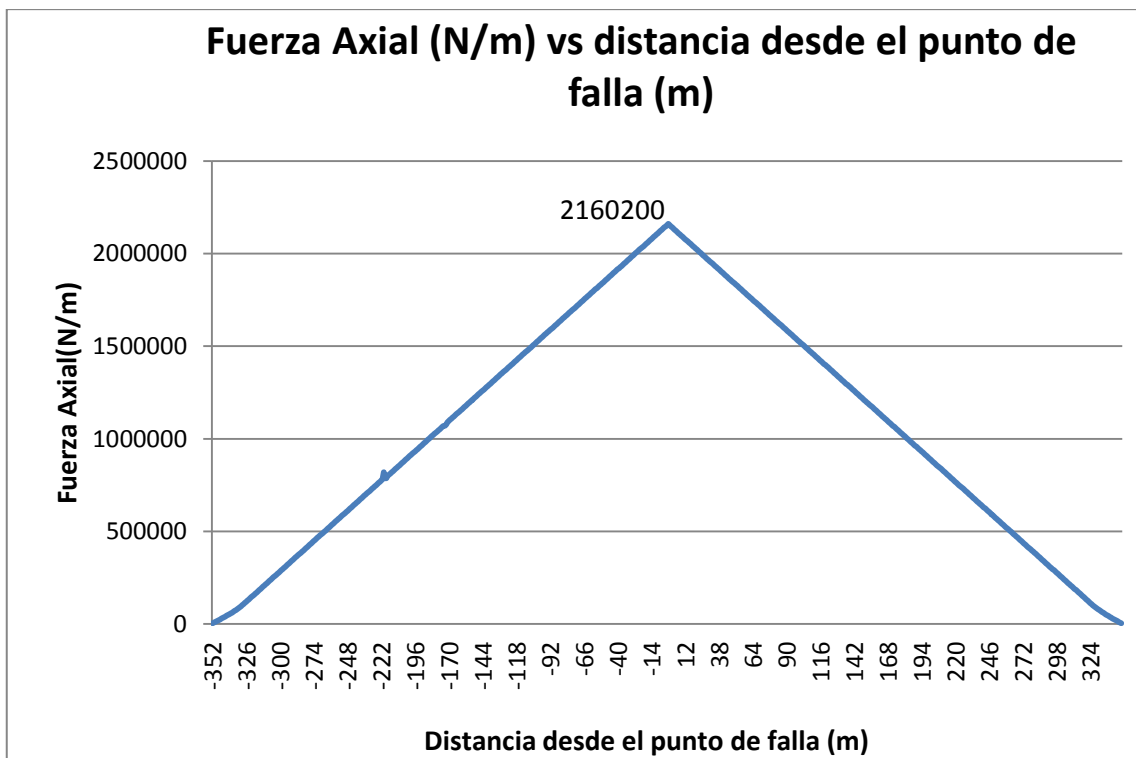
- Como se ve en la gráfica 3.2, la resistencia axial es constante en la zona cercana al punto de falla y luego realiza una tendencia hacia valores cercanos a cero en los extremos. Esto es debido al comportamiento de los resortes que en la zona donde ocurre la falla se encuentran en rango plástico manifestando su máximo valor de fuerza, mientras que en los extremos se encuentra en rango elástico.
- Se puede ver además que la resistencia de fricción axial no llega a cero en los extremos, lo que indica que la tubería queda cargada con una resistencia axial de 3800 N/m en cada extremo.



Gráfica 3.2: Variación de la fricción axial con respecto al punto de falla

De la gráfica 3.3.

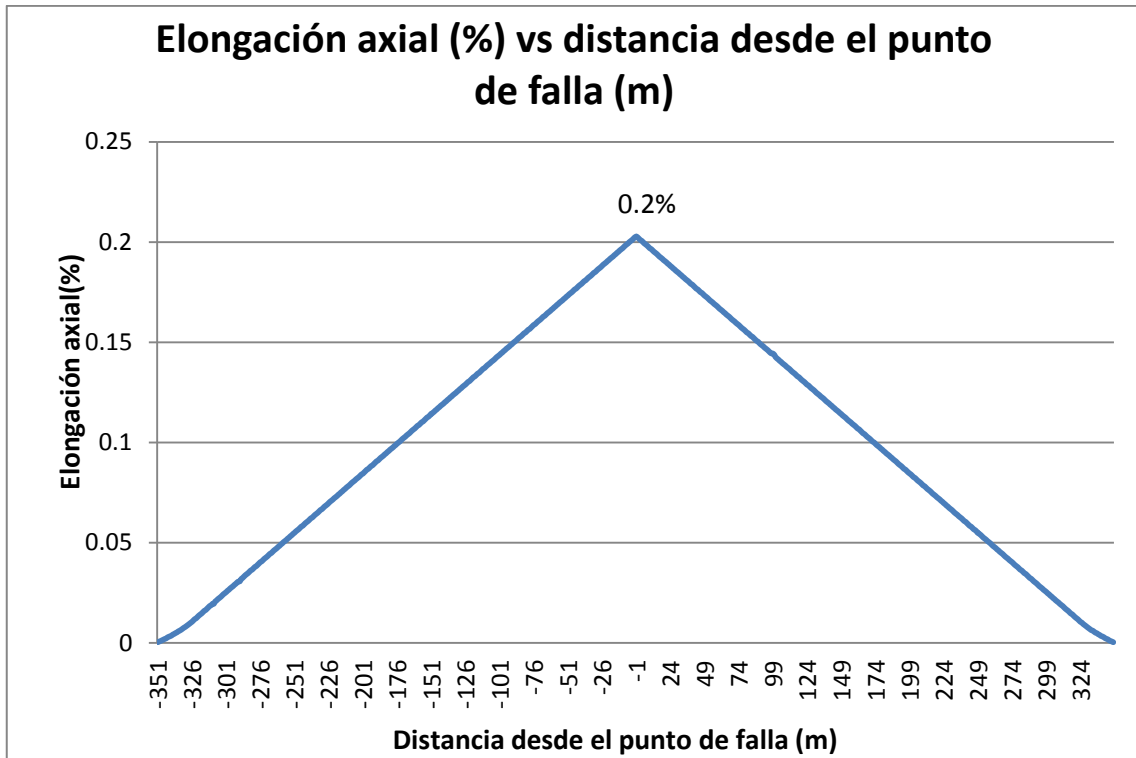
- La fuerza axial tiene un pico en el punto de falla, que es alrededor de 2160200 N/m. Al ser una carga distribuida y no constante, no es posible compararla con el valor obtenido analíticamente; sin embargo se puede obtener la fuerza axial media dividiendo entre dos el valor de la máxima fuerza axial obteniéndose 1080100N/m, luego para un tramo de 700m se tiene 756MN, que está por encima de 412MPa, calculado analíticamente (Ver tabla 3.4) .



Gráfica 3.3: Variación de la fuerza axial con respecto al punto de falla

De la gráfica 3.4.

- La tubería alcanza una elongación máxima de 0.2% en el punto de falla, luego esta decrece linealmente a lo largo de la tubería.
- La elongación axial no es constante como el considerado para el cálculo analítico que muestra un valor de 0.21% para su elongación axial.



Gráfica 3.4: Variación de la elongación axial con respecto al punto de falla

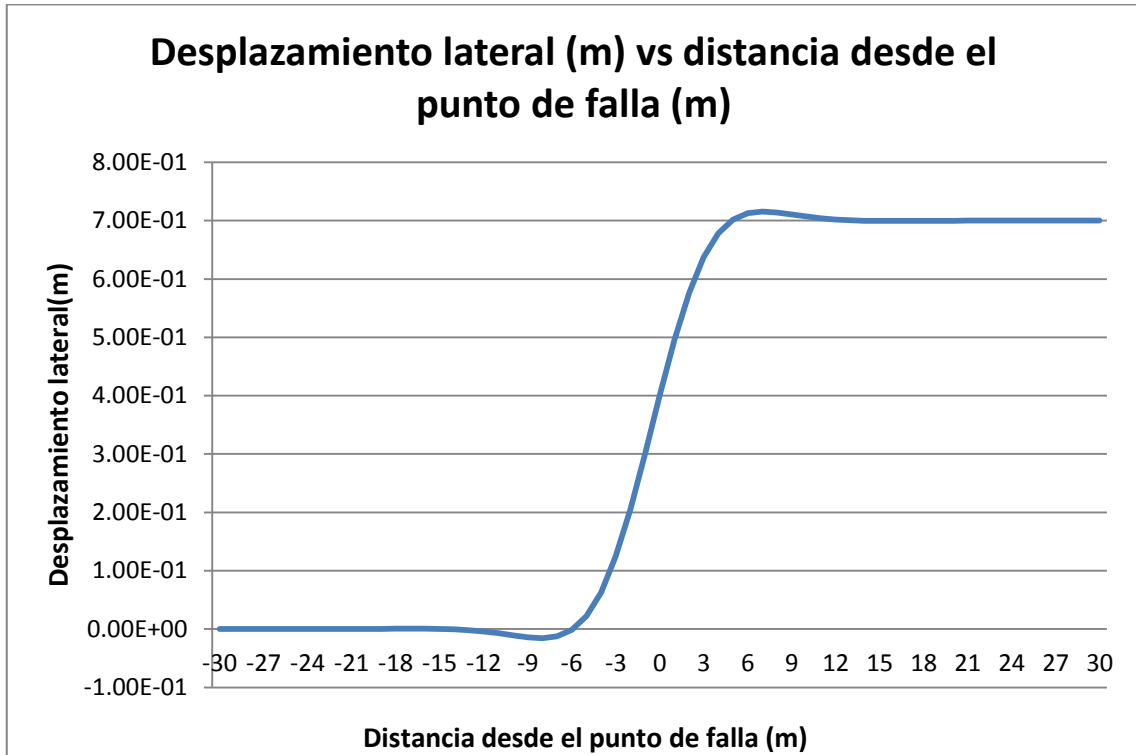
3.5.4.2. Resultados de la simulación para $\Delta h = 0,7\text{m}$, $\beta = 90^\circ$

En este punto se muestran en cuatro gráficas la variación del desplazamiento lateral, resistencia de fricción del suelo lateral, fuerza cortante y elongación de flexión.

De la gráfica 3.5.

- Se puede ver que la curva describe la deformación lateral que sufre la tubería a lo largo de su longitud, desde un valor mínimo de 0 hasta un valor máximo de 0,7m, que es concordante con el desplazamiento de terreno impuesto.
- Los resortes bilineales cumplen correctamente su función, debido a que al final del tramo se muestra un deslizamiento de 0,7m, que es el impuesto para el análisis.

- Se puede visualizar que la curva es simétrica con respecto al punto de falla y que en el punto de falla ocurre un desplazamiento cercano a 0,35m.

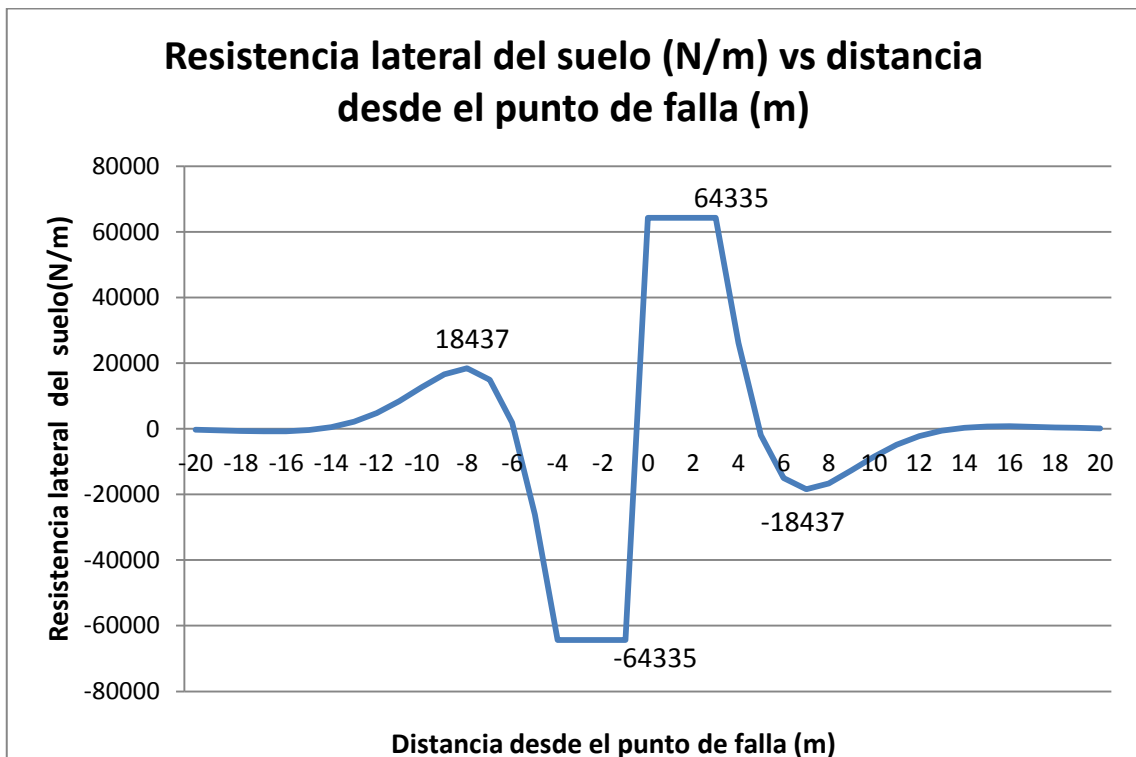


. Gráfica 3.5: Comportamiento de la tubería con respecto al punto de falla

De la gráfica 3.6.

- La resistencia máxima lateral calculada en el procedimiento analítico es 64335N/m, que es verificado en la gráfica por medio de la simulación por elementos finitos.
- En puntos cercanos a la falla se presenta un valor constante de la resistencia lateral, esto debido a que los resortes alcanzan el valor máximo, por lo que la resistencia de fricción lateral es constante.
- La resistencia presenta valores máximos cerca al punto de falla debido a que en ese tramo la tubería opone mayor resistencia al desplazamiento de suelo.

- Según el cálculo analítico la longitud mínima para que exista una correcta distribución de la resistencia axial es de 204,2m. Lo que muestra la simulación es que la longitud mínima esta alrededor de 40m. Esto se puede deber a que la formulación de Kennedy considera una resistencia lateral máxima y constante.

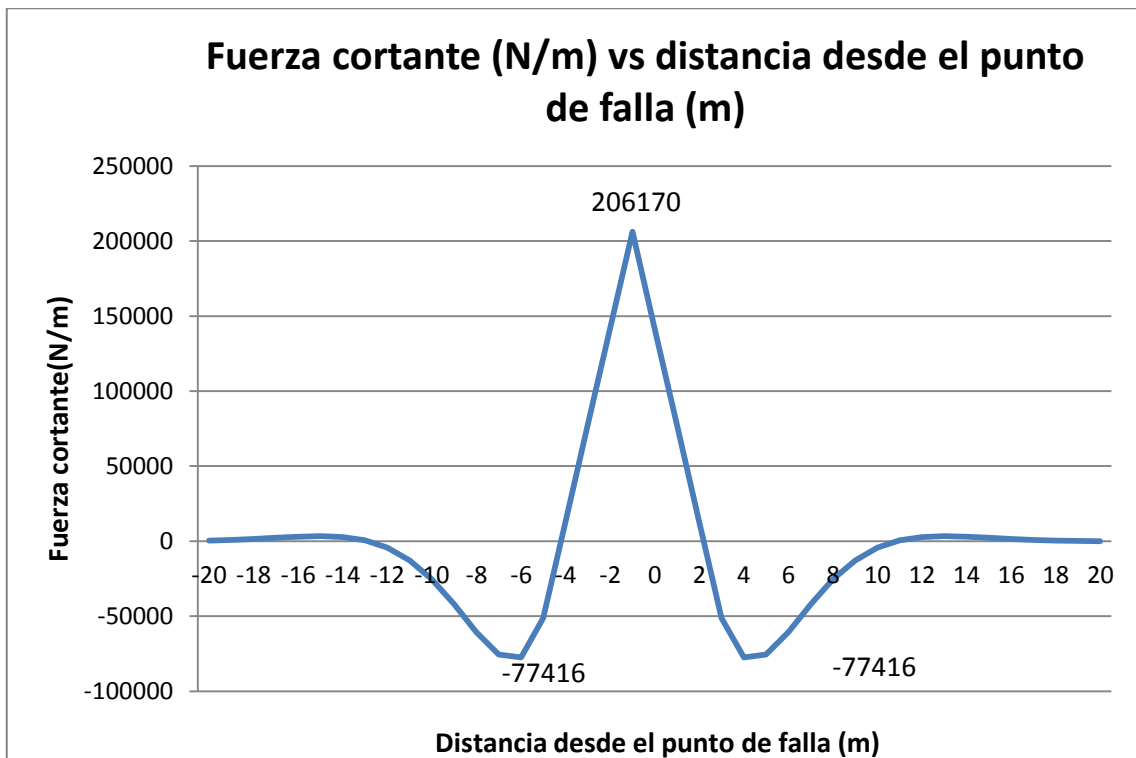


Gráfica 3.6: Variación de la Resistencia lateral del suelo con respecto al punto de falla

De la gráfica 3.7.

- Se muestra una fuerza cortante máxima de 206170 N/m, que actúa en el punto de falla.
- La gráfica de la fuerza cortante muestra tres picos: el primero es el equivalente al cortante en el inicio de la zona de curvatura con valor de -77400N/m, el

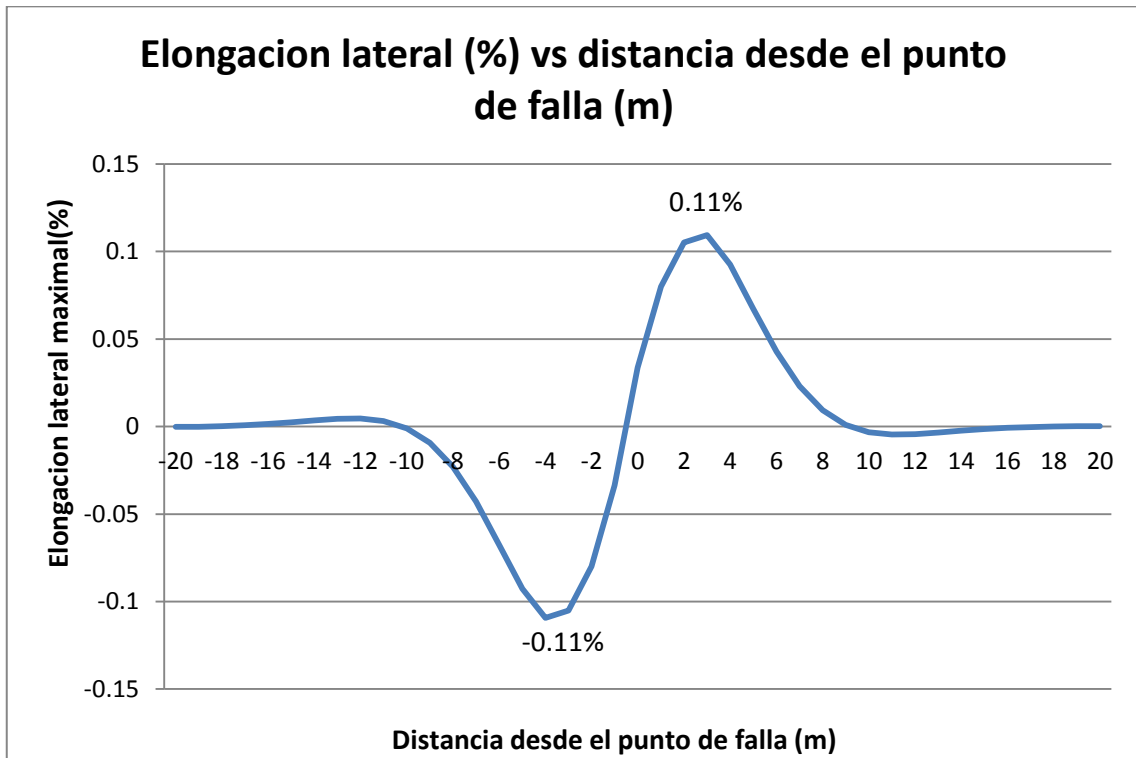
segundo pico se da en el punto de falla y el tercero ocurre al final de la sección curvada cuyo valor es igual al primero.



Gráfica 3.7: Comportamiento de la fuerza cortante con respecto al punto de falla

De la gráfica 3.8.

- El pico máximo de elongación obtenido es 0.11%.
- La forma de la curva generada es simétrica con respecto al punto de falla y en este la elongación es 0.
- La tendencia que se tiene hacia el valor de 0 es debido a que la fuerza cortante que actúa en la tubería tiene su punto máximo en el punto medio, luego esta tiende hacia cero en los extremos.



Gráfica 3.8: Variación de la elongación lateral con respecto al punto de falla.

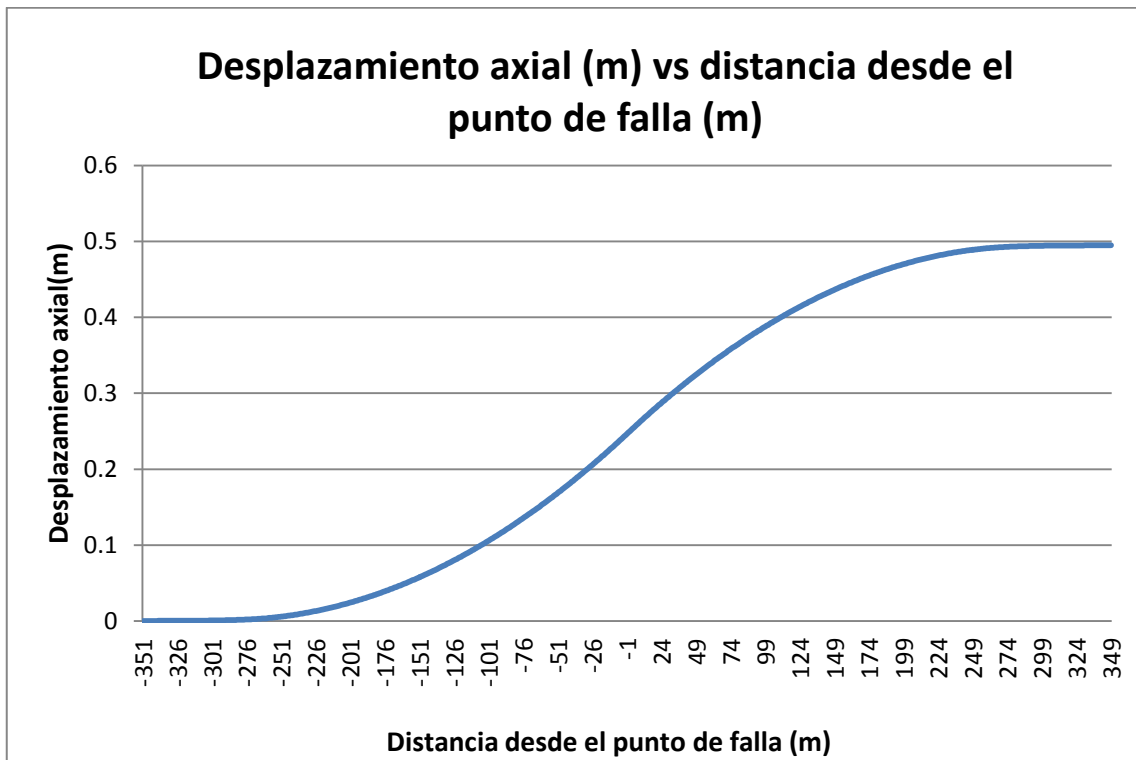
3.5.4.3. Resultados de la simulación para $\Delta h = 0,7\text{m}$, $\beta = 45^\circ$

A continuación se muestran en cuatro gráficas la variación del desplazamiento axial, desplazamiento lateral, resistencia de fricción axial y lateral del suelo, fuerza axial y cortante y finalmente elongación axial y de flexión.

De la gráfica 3.9.

- La carga aplicada a los resortes de la derecha del punto de falla es cortante y de valor igual a 0,45m, y, como se ve en la gráfica para puntos cercanos a la falla los resortes, que se encuentran a la izquierda del punto de falla, reducen el valor del desplazamiento en la tubería, por lo que el desplazamiento máximo de la tubería se da en el extremo derecho con un valor cercano a 0,495m, mientras que en el punto de falla el valor obtenido es de 0,25m.

- Se puede verificar el comportamiento de los resortes, debido a que estos fueron sometidos a un deslizamiento igual a 0,495m en la dirección axial y esto se visualiza en el tramo final de la curva.

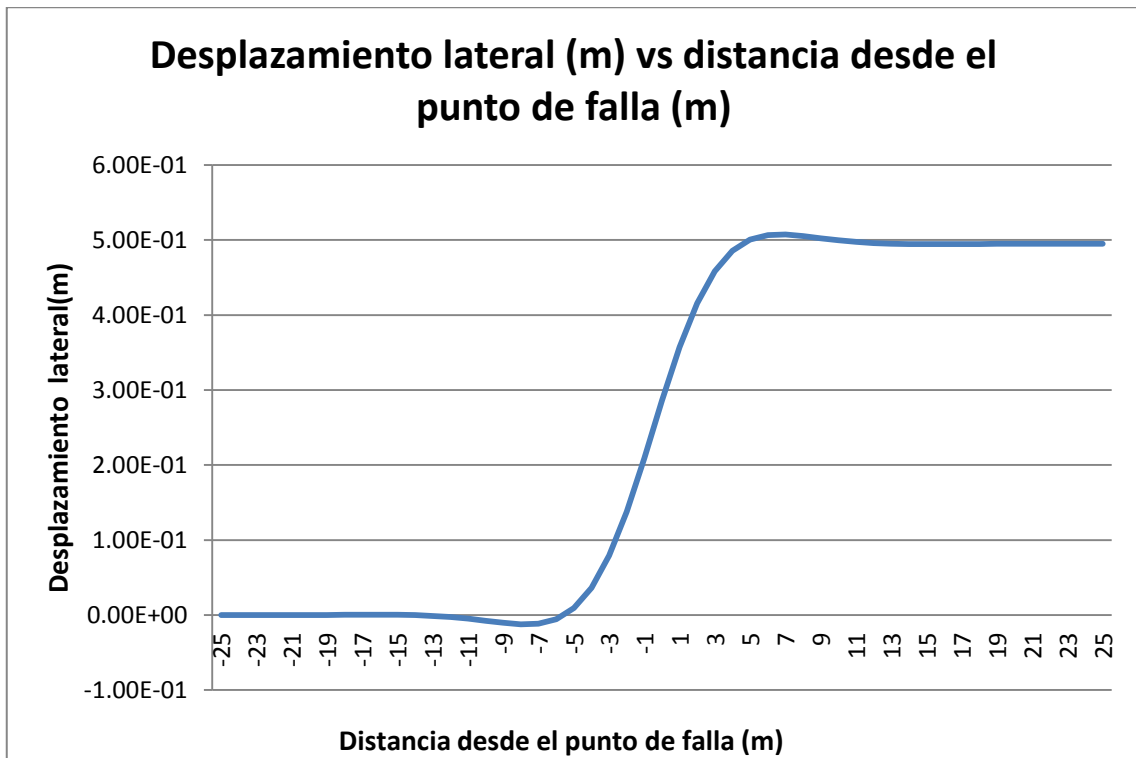


Gráfica 3.9: Comportamiento axial de la tubería con respecto al punto de falla.

De la gráfica 3.10.

- La gráfica muestra el desplazamiento lateral de la tubería cuando ocurre la falla a un ángulo de 45°.
- Como se puede ver se considera solo un tramo cercano al punto de falla; esto debido a que la deformación crítica de la tubería se encuentra en puntos cercanos a la falla. Esta longitud es el tramo curvado (deformado) de la tubería, luego del desplazamiento del suelo.

- Se puede ver que el deslizamiento máximo de 0.495m que sufre la tubería es igual al impuesto a los resortes laterales.



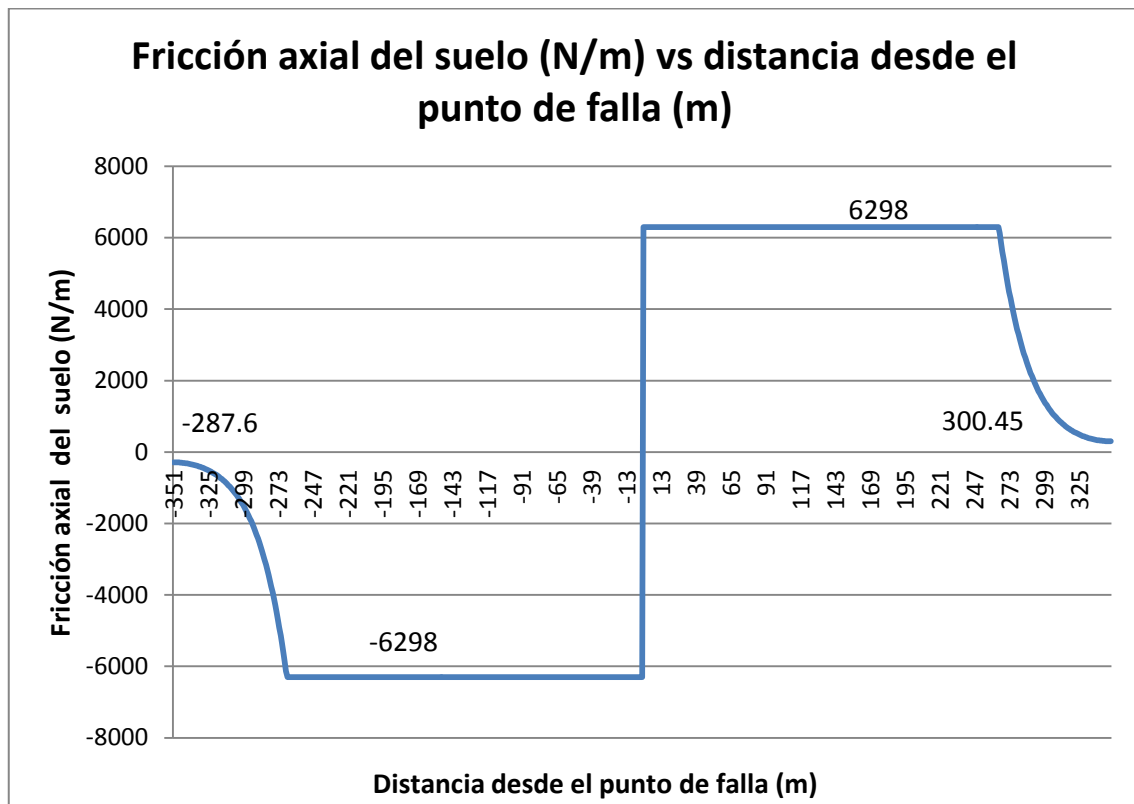
Gráfica 3.10: Comportamiento lateral de la tubería con respecto al punto de falla.

Gráfica 3.11.

- Como se puede ver en la gráfica, el valor de la resistencia de fricción axial, cerca a la falla, tiene un valor constante. Esto indica que para un tramo de 530m los resortes se comportan plásticamente, por lo que el valor es constante e igual a 6298N/m.
- Se puede ver además que la curva tiende a un valor cercano 0 en los extremos, lo que indica que la longitud que se analiza en la simulación no es la necesaria para que la resistencia de fricción axial se distribuya en toda la

longitud de la tubería, por lo que la tubería queda cargada en sus extremos con un valor de resistencia de fricción axial de 300N/m.

- Se verifica el correcto funcionamiento de los resortes, debido a que los resortes axiales tienen un valor máximo calculado de 6298 N/m para un desplazamiento de suelo de 3mm lo que es verificado en la gráfica 3.11.

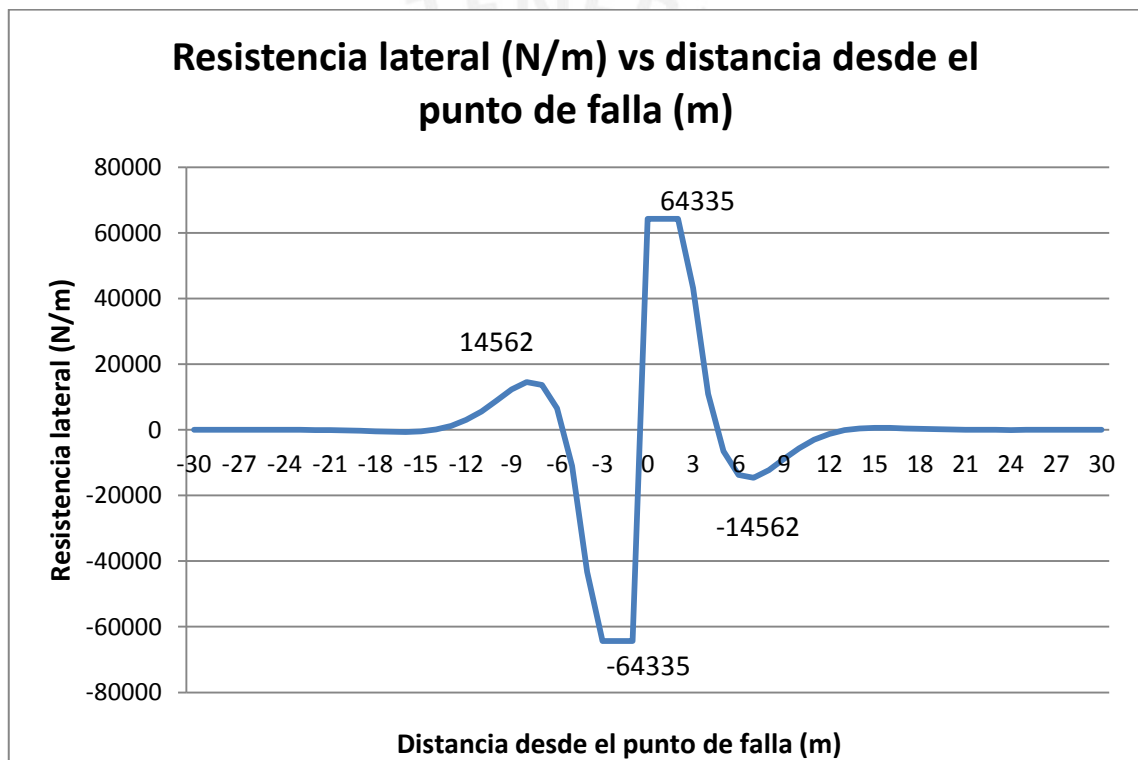


Gráfica 3.11: Fricción axial del suelo con respecto al punto de falla.

Gráfica 3.12.

- Se puede visualizar una gráfica similar a la obtenida en el desplazamiento axial, en la que la zona con valor constante indica que el resorte alcanzo la plasticidad.

- Se puede visualizar que el tramo con el valor constante es corto, y, que en sus extremos, la curva tiende a cero. Este tramo de la curva hasta llegar al valor de cero es la zona curvada de la tubería.
- Se puede verificar que los resortes cumplieron con su función, debido a que los resortes laterales tienen un valor máximo calculado de 64335 N/m, lo que es verificado en la gráfica.



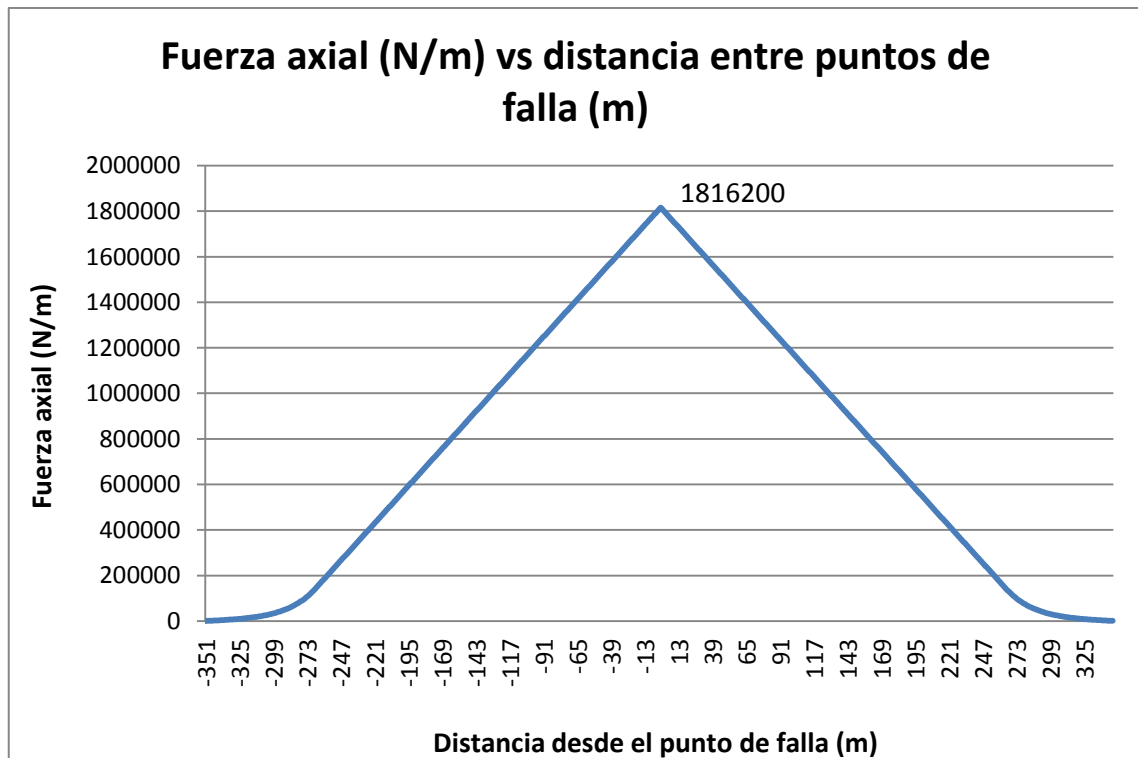
Gráfica 3.12: Resistencia lateral del suelo con respecto al punto de falla.

Gráfica 3.13.

- La fuerza axial tiene un pico en el punto de falla y es alrededor de 1816200N/m. Al ser una carga distribuida y no constante no es posible compararla con el valor obtenido analíticamente, por lo que se divide entre dos

para obtener la fuerza axial media y a este valor se le multiplica por la longitud de la tubería analizada de 700m obteniendose 636 MN.

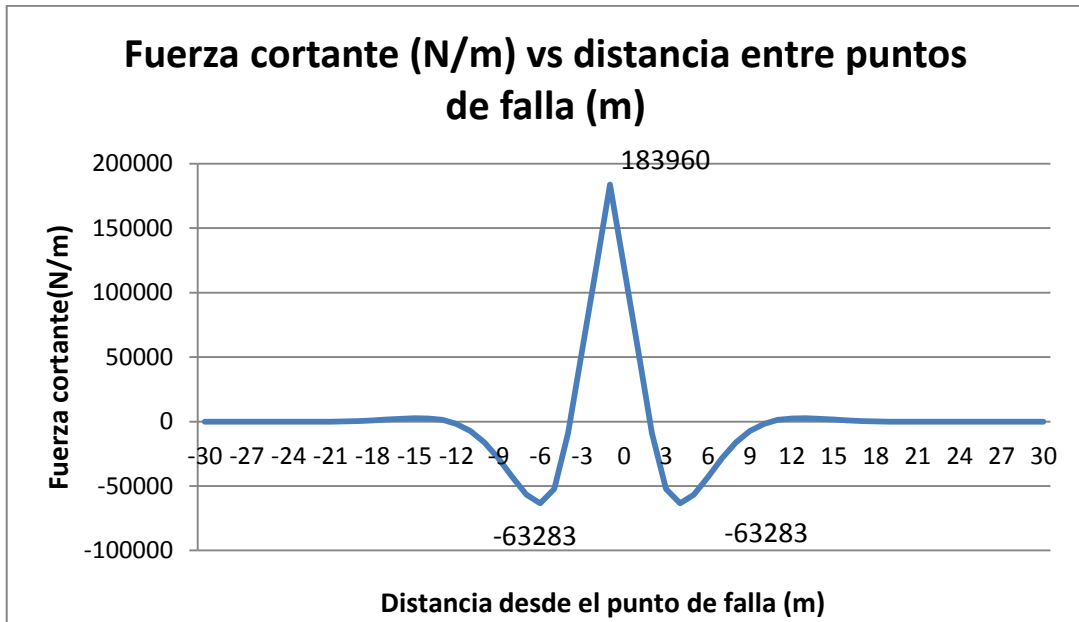
- Se puede ver también que la fuerza axial decrece linealmente a lo largo del tramo de la tubería.



Gráfica 3.13: Fuerza axial con respecto al punto de falla.

Gráfica 3.14.

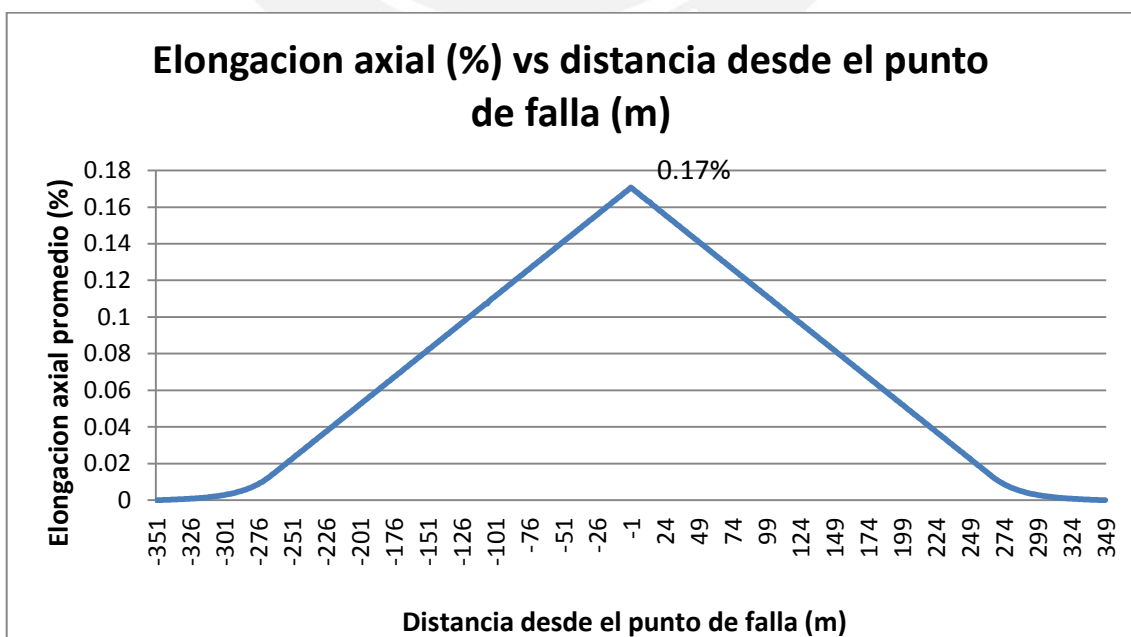
- Se muestra una fuerza lateral pico máximo de 183960 N/m, el cual actúa en el punto de falla.
- La gráfica de la fuerza lateral muestra tres picos: el primero es el equivalente al cortante en el inicio de la zona de curvatura, el segundo pico se da en el punto de falla y el tercero ocurre al final de la sección curvada.



Gráfica 3.14: Fuerza cortante con respecto al punto de falla.

Gráfica 3.15.

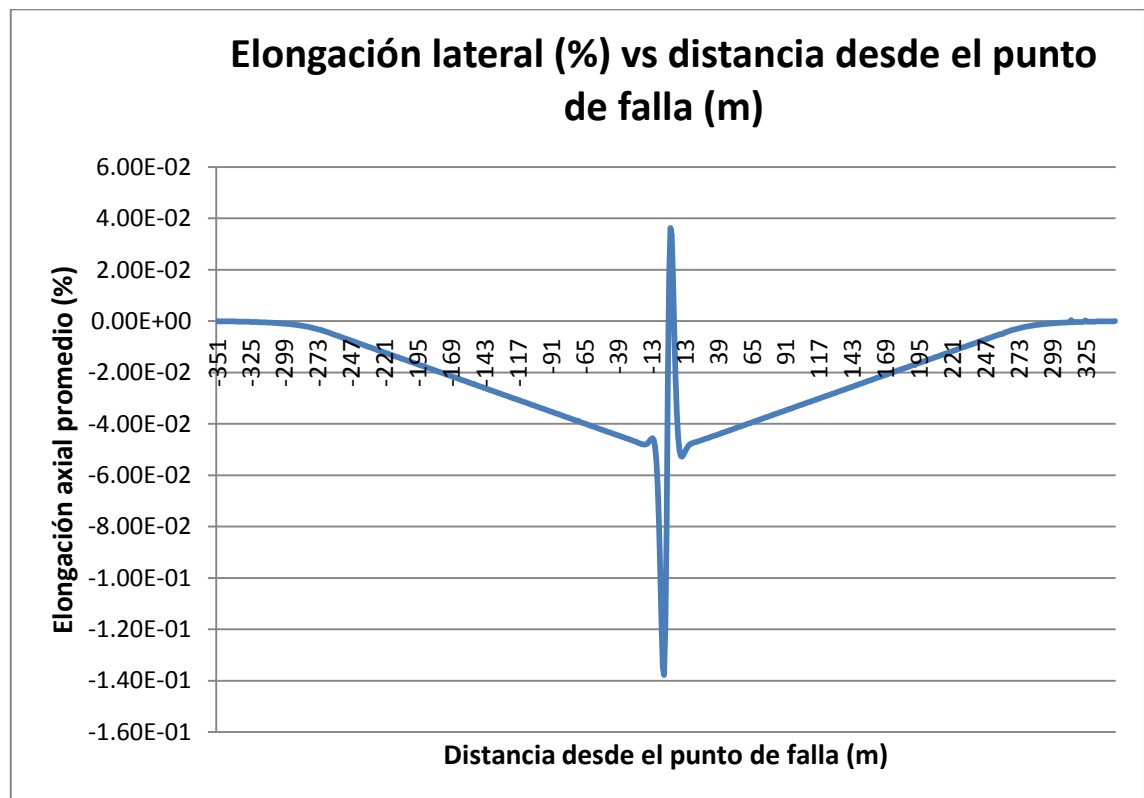
- La falla alcanza una elongación máxima en el punto de falla, luego esta decrece linealmente a lo largo de la tubería.
- De lo obtenido en la simulación se tiene una elongación axial máxima de 0.2% en el punto de falla.



Gráfica 3.15: Elongación axial con respecto al punto de falla.

Gráfica 3.16.

- Se puede visualizar en esta gráfica como la elongación lateral presenta 2 picos en el lugar donde ocurrió la falla, mostrando un valor de elongación positivo de 0.04% y un valor negativo de -0.14%.
- La falla alcanza una elongación máxima en el punto de falla, luego esta decrece linealmente a lo largo de la tubería.
- El pico máximo de elongación obtenido es -0.14%.



Gráfica 3.16: Elongación lateral con respecto al punto de falla.

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado, implementado y validado un procedimiento para obtener tensiones y elongaciones a lo largo de un tramo de tubería enterrada por causas de deslizamiento de suelo, con el uso de elementos finitos. Por lo que el modelo de elementos finitos propuesto puede ser usado en la determinación de zonas críticas en tuberías de gran longitud afectadas por fallas del suelo. El automatizar este procedimiento con elementos finitos permite usar menos cantidad de recursos computacionales y reflejar de manera adecuada lo que le sucede a una tubería cuando es afectado por un deslizamiento del suelo.
- Los resortes con rangos elástico y plástico permiten simular el suelo con una buena aproximación a una situación real, debido al comportamiento inelástico propio del suelo. Un resorte inelástico brinda la posibilidad de deformarse proporcionalmente con la fuerza aplicada hasta un punto máximo en el que se alcanza la fuerza máxima luego del cual el resorte se deforma sin aumentar la carga. La deformación de la tubería enterrada al ser afectada por una falla del suelo bajo los tres ángulos analizados (β) igual 0° , 45° y 90° es representada de forma adecuada por el modelo de tubería y los resortes inelásticos utilizados para el análisis de elementos finitos. Debido a que se consideran las propiedades del suelo circundante y las del material además de verificarse por medio de cálculos analíticos los resultados obtenidos. En la siguiente tabla se

muestran los valores obtenidos para los cuatro resortes cuando se analizan por simulación y por cálculo analítico. De esta tabla se validan los resortes de la simulación con los obtenidos por cálculo analítico.

Tabla 1c: Tabla comparativa simulación-analítico

	Unidad	Resorte axial	Resorte lateral	Resorte vertical superior	Resorte vertical inferior
Simulación	N/m	6298	64334	18578	173939
Analítico	Kg/m	642	6558,1	1893,8	17730,8

- Se concluye que las longitudes de 692m y 595m proporcionadas por el cálculo analítico para β igual a 0° y 45° respectivamente (mostradas en la tabla 3.4) no son conservativas. El cálculo analítico no considera la variación que experimenta la fricción axial del suelo a lo largo de la tubería, como se puede ver en las gráficas 3.2 y 3.11, en los que la fricción axial no llega a cero para un tramo de 700m.
- De las gráficas de resistencia de fricción axial 3.2 y 3.11 se puede visualizar la tendencia que realiza la resistencia de fricción a lo largo de la tubería. De la gráfica 3.11. Resistencia de fricción axial con respecto al punto de falla se puede concluir que el método de elementos finitos provee información de la variación de la resistencia axial a lo largo de la tubería (de su valor máximo cercano al punto de falla a un valor mínimo lejano al punto de falla). Como se puede visualizar de la gráfica 3.11 existe una tendencia de la resistencia de fricción a disminuir a un valor cercano a cero a partir de ± 273 m. Desde el punto de falla del suelo, esta tendencia se debe a que los resortes (que simulan el suelo) se comportan dentro de su rango elástico. Si la longitud de la tubería analizada por elementos finitos fuese más amplia entonces se podría visualizar como la resistencia de fricción tiende a cero.

- En la simulación se usó un caso real: una tubería de diámetro exterior 0,3556m (14") con un espesor de 0,0048m sometida a una falla lateral con ángulo de 0°, 45° y 90° con respecto a la posición inicial de la tubería. La zona crítica se encuentra en el plano de falla donde ocurren los mayores sobreesfuerzos.

Para el ángulo de 0°, el esfuerzo axial alcanza un valor de 420MPa y una elongación axial de 0.2%.

Para el ángulo de 90°, el esfuerzo de flexión máximo alcanza los 231MPa con una elongación de flexión máxima de 0,11%.

Para el ángulo de 45°, el esfuerzo axial alcanza un valor de 357MPa y el esfuerzo de flexión un valor de 107MPa. La elongación axial alcanza un valor de 0,17% y una elongación de flexión de 0,14%.

Estos valores obtenidos por simulación son validados con el cálculo analítico mostrado en la tabla 3.4.

RECOMENDACIONES DE TRABAJOS FUTUROS

- Se propone realizar un procedimiento de análisis de tuberías enterradas de gran longitud afectadas por deslizamiento del suelo, que incluyan los efectos de temperatura y presión en la tubería enterrada.
- Se propone realizar un estudio de análisis de falla en tuberías enterradas considerando varios tipos de suelos (cohesionales o no cohesionales).
- Se propone realizar un procedimiento que relacione los esfuerzos y elongaciones críticos obtenidos en una tubería de gran longitud con el análisis a nivel de tramo corto de tubería.

BIBLIOGRAFIA

ASME/ANSI, B31.4

2010 *Pipeline Transportation Systems for liquid Hydrocarbons and Other Liquids.*

AMERICAN LIFELINES ALLIANCE

2001 *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe.* Julio 2001.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE

2007 *Welded Steel Pipe Design Manual. Merits, Design Standards, Technical Data and References.*

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY KANPUR IITK – GSDMA

2007 *Guidelines for seismic design of buried pipeline,* pp. 1-105.
November 2007

GERMANISCHER LLOYD

2007 *Reporte final N° GLP/GLM/MEMP/726-07 .* Revisión 1, pp. 10-248. Julio 2007

LIANG CHUAN Peng

1998 *Part 1- Basic Calculations.* Stress analysis methods for underground pipelines. Pipeline industries, pp.66-69. Mayo 1988.

KENNEDY, R.P., CHOW, A.W., y WILLIAMSON, R.A

1977b *Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline*, Journal of the Transportation Engineering Division, ASCE. Vol. 103, No. TE5, pp. 617-633.

NAVARRO, Hundiél

2013 “Tablas de referencia”. Consulta 16 de diciembre del 2013.
<snavarro.files.wordpress.com/2008/08/tablas-de-referencia.pdf>.

RAMBERG, W. y OSGOOD, W.

1943 *Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters*. Technical Note, No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, 28p, 1943.

POLYNIKIS Vazouras, SPYROS A. Karamanos, PANOS Dakoulas.

2010. *Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 1361–1376, November 2010.

SHANTANU Joshi, AMIT Prashant, ARGHYA DEB SUDHIR K. Jain.

2011 *Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 930–940, Julio 2011.

D.K. Karamitros. G.D. Bouckovalas. G.P. Kouretzis, V. Gkesouli

2011 *An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volumen 31, pp. 1452–1464, November 2011.

CHARIS J. Gantes, GEORGE D. Bouckovalas, VLASIS Koumousis

2001 *Slope failure verification of buried steel pipelines*

HANSEN, J.B

1961 *The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces,* Boletin 12, Danish Geotechnical Institute Copenhagen Denmark, 1961.

GRAUX, Daniel

1975 *Fundamentos de Mecanica de suelos Proyecto de muros y cimentaciones.* 2 edición, pp.14-15, editores tecnicos asociados, Barcelona, 1975.