

ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR CARGAS GEOTÉCNICAS EN LÍNEAS DE
TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS FINITOS

CRISTHIAN CAMILO VELÁSQUEZ PEÑA
HEINER HERNANDO HERNÁNDEZ MOSCOSO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2015

ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR CARGAS GEOTÉCNICAS EN LÍNEAS DE
TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS FINITOS

CRISTHIAN CAMILO VELÁSQUEZ PEÑA
HEINER HERNANDO HERNÁNDEZ MOSCOSO

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Director
Dr. CARLOS BORRÁS PINILLA, PhD, MSc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2015

*A mi familia por todo su apoyo
incondicional durante este proceso,
y a ella que siempre estuvo allí.*

Cristhian Velásquez

*A Dios por darme la sabiduría y fortaleza
necesaria para la culminación de este
proyecto.*

*A mis padres y hermanos por sus consejos,
cariño y apoyo.*

A mi familia por su apoyo incondicional.

A mi viejito que desde el cielo nos cuida.

A Karina por siempre estar ahí.

Heiner Hernández

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, especialmente a los profesores y personal de la escuela de Ingeniería Mecánica por formarnos como profesionales integrales.

A nuestro director Carlos Borrás Pinilla por sus valiosas contribuciones a este trabajo de grado.

A todas las personas que contribuyeron a que este trabajo pudiera realizarse.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
2. ESTADO DEL ARTE.....	25
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	30
3.1 OBJETIVOS GENERALES	30
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
4. MARCO TEÓRICO	32
4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA.....	35
4.1.1 Especificaciones para tubería de línea	35
4.1.2 Especificación del producto	35
4.1.3 Grados	36
4.1.4 Diámetro	36
4.1.5 Espesor de la pared.....	37
4.1.6 Peso.....	38
4.1.7 Propiedades mecánicas.....	39
4.2 FALLAS POR PROCESOS GEOTÉCNICOS	41

4.3 ANÁLISIS TEÓRICO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE TUBERÍAS A TRAVÉS DE FALLAS ACTIVAS TIPO STRIKE- SLIP	43
4.3.1 Metodología de desarrollo del modelo estructural	44
4.3.2 Cálculo de la fuerza y la deformación axial en el punto de intersección de la falla	46
4.3.3 Solución para la viga en flexión y tensión segmentos ab y bc	50
4.3.4 Interacción entre la deformación axial y por flexión	52
5. METODOLOGÍA	55
5.1 REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA Y ELECCIÓN DEL MODELO.....	55
5.2 ANÁLISIS NUMÉRICO DEL MODELO	55
5.3 SOFTWARE DE SIMULACIÓN COMSOL MULTIPHYSICS ®.....	60
5.3.1 Módulo de mecánica estructural	61
5.4 PROTOCOLO DE SIMULACIÓN.....	62
5.5 REALIZACIÓN DEL MODELO.....	63
5.5.1 Dimensionamiento del modelo	64
5.5.2 Propiedades de Los Materiales.....	65
5.5.3 Consideraciones para El Desarrollo.....	66
5.5.4 Discretización.....	69
5.6 SIMULACIÓN MULTIFÍSICA	70
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS.....	74

6.1 TUBERÍA X65 SIN PRESURIZAR, SOMETIDA A DIFERENTES ÁNGULOS DE FALLA.....	74
6.2 TUBERÍA X65 SIN PRESURIZAR, CON DIFERENTES ESPESORES DE PARED	78
6.3 TUBERÍA X65 SIN PRESURIZAR, DIFERENTES DIÁMETROS	80
6.4 TUBERÍA X65 PRESURIZADA SOMETIDA A DIFERENTES CARGAS DE SERVICIO.....	83
6.5 TUBERÍA X80 SIN PRESURIZAR, SOMETIDA A DIFERENTES ÁNGULOS DE FALLA.....	87
6.6 TUBERÍA X80 PRESURIZADA SOMETIDA A DIFERENTES CARGAS DE SERVICIO.....	89
7. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	92
8. CONCLUSIONES	98
BIBLIOGRAFÍA.....	100

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Grados para aceros	36
Tabla 2. Tolerancias para diámetros de tubería	37
Tabla 3. Tolerancias para diámetros en los extremos	37
Tabla 4. Tolerancia para espesores de tubería	38
Tabla 5. Propiedades mecánicas de la tubería PSL 1	39
Tabla 6. Propiedades mecánicas de la tubería PSL 2	40
Tabla 7. Factores de resistencia	41
Tabla 8. Propiedades interacción suelo-tubería.....	56
Tabla 9. Propiedades mecánicas tubería X65 y X80	66
Tabla 10. Propiedades mecánicas suelo.	67
Tabla 11. Sistema de ecuaciones mecánica de sólidos.....	68
Tabla 12. Lista de simbolos mecánica de sólidos.....	69
Tabla 13. Propiedades mecánicas suelo	93
Tabla 14. Comparación de los valores teóricos y simulados	93
Tabla 15. Comparación de los valores de esfuerzo teóricos y simulados.....	95

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Movimientos de masa en tubería	23
Figura 2. Ruptura gasoducto Mariquita-Cali debido a desplazamientos de tierra ..	24
Figura 3. División de la tubería en cuatro diferentes segmentos	27
Figura 4. Oleoducto transalaska	32
Figura 5. Trazado de los oleoductos a través de la geográfica colombiana	33
Figura 6. Trazado de los poliductos a través de la geográfica colombiana.....	34
Figura 7. Trazado de los gasoductos a través de la geográfica colombiana	34
Figura 8. Movimientos de masa en tubería	41
Figura 9. Efectos del movimiento del terreno en tuberías por subsidencia	42
Figura 10. Movimientos de falla sobre tuberías	43
Figura 11. División de la tubería en cuatro segmentos	44
Figura 12. Distribución esfuerzo deformación en la sección transversal con el máximo momento flector.....	53
Figura 13. Comportamiento de los esfuerzos para diferentes desplazamientos....	57
Figura 14. Deformación máxima vs desplazamiento de la falla para diferentes condiciones de carga y ángulo de intersección de $\beta=30$	58

Figura 15. Deformación máxima vs desplazamiento de la falla para diferentes condiciones de carga y ángulo de intersección de $\beta=60$	59
Figura 16. Análisis de frecuencia propia de una biela.....	60
Figura 17. Desarrollo del gap.....	63
Figura 18. Esquema general de la simulación	64
Figura 19. Tipos de mallas.....	69
Figura 20. Mallado del modelo.....	70
Figura 21. Parámetros primera simulación	71
Figura 22. Parámetros segunda simulación.....	72
Figura 23. Parámetros tercera simulación	72
Figura 24. Introducción del desplazamiento de falla	73
Figura 25. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes ángulos de falla, tubería X65	75
Figura 26. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes ángulos de falla, tubería X65	75
Figura 27. Desplazamiento de la falla para un angulo de 40 grados	76
Figura 28. Variación de esfuerzos de Von Misess (MPa) para diferentes ángulos de falla	77
Figura 29. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes espesores de pared, tubería X65	78
Figura 30. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes espesores de pared, tubería X65.....	79

Figura 31. Variación de deformaciones en el punto máximo para diferentes espesores de pared a) 3/8 in b) 1/2 in c) 5/8 in.....	80
Figura 32. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes diámetros de tubería X65.....	81
Figura 33. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes diámetros de tubería X65	82
Figura 34. Desarrollo de deformación máxima para diferentes diámetros de tubería a) 24 [in] b) 36 [in]	82
Figura 35. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes cargas de servicio, tubería X65	84
Figura 36. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes cargas de servicio tubería X65.....	84
Figura 37. Esfuerzos en la superficie interna de la tubería a diferentes presiones	85
Figura 38. Deformaciones en la superficie interna de la tubería a diferentes presiones	86
Figura 39. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para ángulos de falla tubería X80.....	87
Figura 40. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes ángulos de falla X80	88
Figura 41. Deformaciones para diferentes ángulos de falla.....	89
Figura 42. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes cargas de servicio, tubería X80	90
Figura 43. Porcentaje de deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes cargas de servicio tubería X80.....	91

Figura 44. Desarrollo del gap para una presión de 8.6 MPa	91
Figura 45. Comparación de los valores de porcentaje de deformación teóricos y simulados.....	94
Figura 46. Diagrama del modelo de análisis desarrollado por Trifonov y Cherniy .	95
Figura 47. Comparación de los valores de esfuerzo teóricos y simulados	96

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR CARGAS GEOTÉCNICAS EN LÍNEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS¹.

AUTORES:

CRISTHIAN CAMILO VELÁSQUEZ PEÑA²
HEINER HERNANDO HERNÁNDEZ MOSCOSO

PALABRAS CLAVES: simulación numérica, cargas geotécnicas, oleoductos, gasoductos, transporte de hidrocarburos, COMSOL.

CONTENIDO:

En el presente trabajo de investigación se abordó el modelado y simulación de una tubería de transporte de hidrocarburos a través de una falla geotécnica de desplazamiento transversal, teniendo como objetivo el análisis del comportamiento estructural de la tubería durante la falla; con el fin de aportar al mejoramiento de los métodos de análisis de integridad en tuberías de transporte.

El proceso de investigación comprendió el análisis de deformaciones, así como el estudio de los esfuerzos que se desarrollan en la tubería a causa del desplazamiento del suelo. Esto se desarrolló de manera analítica mediante los modelos desarrollados por Trifonov y Cherniy en [17,18]. Asimismo, se realizó el análisis mediante el uso de simulaciones por medio del método de los elementos finitos en el software COMSOL Multiphysics, y de esta manera se pudo realizar un análisis del efecto de las diferentes características geométricas de la tubería, así como de las características del desplazamiento de la falla en el comportamiento mecánico de la tubería, el proceso de simulación de llevo a cabo mediante los parámetros de simulación de Vazouras et al.[20].

A partir de los datos obtenidos a través del proceso se realizó un análisis de los factores críticos para la integridad de la tubería, durante un proceso de falla.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela De Ingeniería Mecánica
Director: Dr Carlos Borrás Pinilla, PhD.

ABSTRACT

TITLE: STRUCTURAL ANALYSIS OF BURIED STEEL PIPELINES SUBJECTED TO GEOTECHNICAL LOADS USING THE FINITE ELEMENTS METHOD.³

AUTHORS:

CRISTHIAN CAMILO VELÁSQUEZ PEÑA⁴
HEINER HERNANDO HERNÁNDEZ MOSCOSO

KEYWORDS: numerical simulation, geotechnical loads, pipelines, transportation of hydrocarbons, COMSOL.

CONTENT

In the present research the modeling and simulation of an oil pipeline through a geotechnical failure transverse displacement, aiming the analysis of the structural behavior of the pipe during the fault was addressed; in order to contribute to the improvement of methods of analysis of integrity in transport pipes.

The research process included analysis of deformations, and the study of the efforts being made in the pipe due to ground displacement. This developed analytically using models developed by Trifonov and Cherniy in [17,18]. Also, the analysis was performed by using simulations using the finite element method in the COMSOL Multiphysics software, and thus is able to analyze the effect of different geometric characteristics of the pipe and the characteristics the displacement of the fault in the mechanical behavior of the pipe, the simulation process carried out by the simulation parameters Vazouras et al. [20].

From the data obtained through the analysis process critical to the integrity of the pipe is made, during a fault.

³ Degree work

⁴ Faculty of Engineering Physics and Mechanics, School Of Mechanical Engineering
Director: Dr. Carlos Borrás Pinilla, PhD.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los sistemas de tubería se han convertido en uno de los medios más comunes, económicos y seguros de transporte de hidrocarburos a través de grandes distancias. Cuando los sistemas de tubería atraviesan laderas potencialmente inestables, un tema crucial que se debe tener en cuenta en la evaluación de integridad de la línea es la evolución de las acciones transmitidas por el suelo deslizante a la estructura enterrada.

La evaluación de la respuesta de los sistemas de tubería de línea ante los diferentes procesos geotécnicos como movimientos de falla, deslizamientos de tierra, licuefacción inducida por extensión lateral, son de gran importancia para la determinación de la vida útil y la evaluación de seguridad de los sistemas de tubería.

La falla en las tuberías acarrea costos tanto económicos como ambientales, por lo tanto, es de importancia tener conocimiento del comportamiento mecánico de la tubería al momento de pasar por una falla activa.

La generación de investigaciones sobre el comportamiento estructural de las tuberías facilita la predicción de fallas, lo cual optimiza las labores de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo sobre las líneas de transporte.

Con base en esto el presente estudio realizado en una línea de transporte de hidrocarburos busca determinar el comportamiento mecánico de un segmento de tubería que atraviesa una falla activa tipo strike - slip (desplazamiento transversal). Mediante la utilización de modelos matemáticos y numéricos aplicando el software COMSOL Multiphysics se analizó el comportamiento entre las deformaciones por flexión y los esfuerzos mecánicos combinados sobre la línea de transporte,

validados con los modelos matemáticos establecidos, y de esta manera tener un mejor conocimiento del comportamiento mecánico de la tubería ante los diferentes procesos geotécnicos que se encuentran a lo largo del trazado de las líneas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con la creciente demanda de recursos energéticos, se ha obligado a buscar formas más ágiles y seguras de transportar hidrocarburos. Las líneas de transporte de hidrocarburos (gasoductos y oleoductos) han generado una gran facilidad para el transporte de los mismos, puesto que permiten operar a altas presiones y traspasar zonas por las cuales no se pueden utilizar medios de transporte convencionales (camiones cisterna), pero debido a estas cualidades se han planteado grandes retos en la predicción de la vida y la evaluación de la seguridad de las líneas de transporte [8] [16].

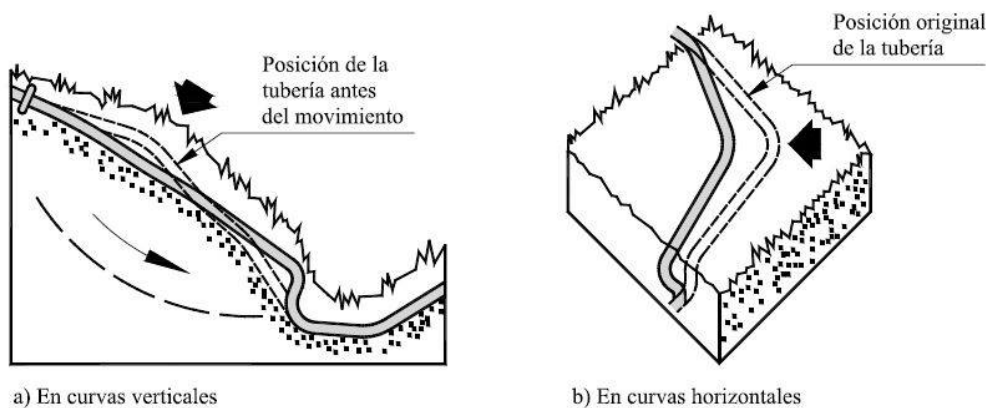
Las tuberías de gas a alta presión se diseñan generalmente para soportar una presión interna específica como el parámetro principal de diseño. Además de la presión interna, las tuberías están sujetas a otras cargas importantes, tales como los desplazamientos del suelo. Estas cargas adicionales a menudo conducen a esfuerzos longitudinales adicionales en la tubería.

Los terremotos constituyen una amenaza para la integridad estructural de las tuberías enterradas, pero recientes investigaciones han demostrado que la mayoría de los daños sobre la tubería son causados por las deformaciones continuas del suelo, tales como movimientos de falla, deslizamientos de tierra, licuefacción inducida por extensión lateral; mientras que sólo unos pocos oleoductos fueron dañados por la onda de propagación [4] [12].

Estas deformaciones continuas son aplicadas sobre la tubería de forma cuasi-estática (Figura 1), y no están necesariamente vinculados a la alta intensidad sísmica, pero la tubería puede ser seriamente deformada en el rango plástico lo que puede conducir a la fractura de la pared del tubo y la pérdida de contención, con riesgos evidentes para la población y el medio ambiente.

Estas tuberías están sometidas a un patrón de deformación impuesta, asociado con el desarrollo de altas tensiones y deformaciones en lugares críticos que están mucho más allá del rango inelástico del material de la tubería y puede causar fallas del gasoducto (figura 2). En particular, los altos esfuerzos de tensión pueden causar la fractura de la pared de la tubería, especialmente en lugares o soldaduras defectuosas, mientras que los esfuerzos de compresión pueden causar pandeo.

Figura 1. Movimientos de masa en tuberías. (a) Deslizamiento paralelo, (b) Deslizamiento transversal.



Fuente: [Ingeniería y Geotecnia Ltda, 1991]

Es por esto que es fundamental la investigación del comportamiento mecánico y análisis de fallas en la tubería debido a factores externos. Determinar los esfuerzos mecánicos inducidos por cargas combinadas, internas y externas, es de vital importancia para establecer el riesgo e impacto en la integridad de servicio de

las tuberías a presión de transporte de hidrocarburos, y poder así garantizar con alta confiabilidad el servicio de suministro.

Hasta ahora, los códigos técnicos colombianos pertinentes y las normas para tuberías no ofrecen un concepto de evaluación de esfuerzos longitudinales y/o flexión. Sin embargo, existen normas y publicaciones internacionales que se ocupan de las tensiones longitudinales y/o de flexión, que a menudo se refieren a los criterios de falla, que se basan en el concepto de deformación crítica o tensión crítica.

Figura 2. Ruptura del gasoducto mariquita - Cali debido a deslizamientos de tierra.



Fuente: Frontera informativa. En línea: <http://fronterainformativa.wordpress.com> [consultado 15 dic 2013].

2. ESTADO DEL ARTE

El estudio de la respuesta de las líneas de transporte de hidrocarburos que atraviesan fallas activas es una de las prioridades en el diseño de las líneas. Las deformaciones axiales y de flexión inducidas a la tubería por el permanente desplazamiento transversal del suelo pueden causar la ruptura de las tuberías ya sea por la tensión o por el pandeo que se desarrolla en la tubería [7,19]. Las actuales técnicas de métodos numéricos permiten una rigurosa solución para este tipo de problemas, minimizando el número de aproximaciones necesarias para el modelado de las tuberías [2].

Sin embargo, el comportamiento no lineal del material de la tubería, la interacción suelo – tubería, hacen que este tipo de análisis sea más exigente, y por lo cual se busca proporcionar bases para el uso de una metodología analítica simplificada, al menos para el diseño preliminar y verificación de propósitos.

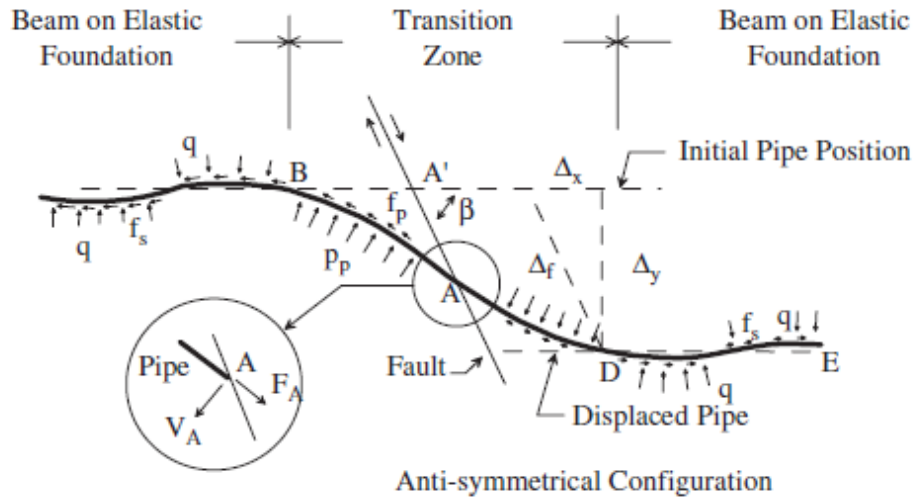
Los modelos analíticos de líneas de tubería a través de fallas activas empiezan con el trabajo de Newmark y Hall [15], el cual dio vía a la metodología propuesta por Kennedy et al. [11] la cual es la metodología simplificada más ampliamente usada hoy en día para el análisis de fallas de desplazamiento transversal y normal, la cual fue luego acogida por la ASCE (guías para el diseño sísmico de tuberías) [5]. Kennedy et al, extiende el trabajo de Newmark y Hall teniendo en cuenta la interacción suelo-tubería en la dirección transversal, así como en las direcciones longitudinales, centrándose en los casos en que la ruptura de la falla provoca el alargamiento grave de la tubería, de manera que la tensión es el modo predominante de la deformación.

Kennedy et al, analizan la relación entre la fuerza de tensión axial, los momentos flectores y la correspondiente deformación axial y deformación por flexión y concluye que la fuerza de tensión axial no depende de la curvatura de la tubería siempre que esta no exceda el 80% de la correspondiente deformación axial y que los momentos flectores son insignificantes y la tubería se comporta esencialmente como un cable, cuando la sección transversal de toda la tubería está bajo rendimiento. Por lo cual esta metodología se basa en la esquematización de la tubería como un cable, omitiendo la rigidez a la flexión de la tubería.

Se hace evidente que el criterio de Kennedy et al, sólo se cumple cuando la tubería se somete a grandes movimientos de la falla y es capaz de someterse a grandes esfuerzos de tracción sin alcanzar la ruptura, esta suposición restringe el uso del modelo solo para el caso de grandes movimientos de la falla en la proyección a la dirección axial de la tubería.

Posteriormente Wang y Yeh [22] trataron de superar este inconveniente teniendo en cuenta la rigidez de la tubería. El uso de esta metodología se restringe solo para fallas de desplazamiento transversal (strike-slip), y se basa en la división de la tubería en cuatro diferentes segmentos, dos en la zona de alta curvatura en ambos lados del recorrido de la falla actuando como arcos y otros dos fuera de esta zona son tratados con la teoría de viga elástica. El radio de curvatura se calcula a partir de las ecuaciones de equilibrio y de la continuidad entre segmentos adyacentes. De esta manera, el momento de flexión en la unión de cada arco con su viga elástica vecina puede calcularse fácilmente. A pesar de las mejoras claras, este modelo tiene deficiencias. En particular, el modelo es incapaz de tener en cuenta la influencia de la fuerza axial en la rigidez a la flexión.

Figura 3. División de la tubería en cuatro diferentes segmentos.



Fuente [Wang y Yeh [7]

El trabajo de Karamitros et al. [10], introduce varios refinamientos a la teoría de Wang y Yeh. Igualmente que en el modelo anteriormente mencionado la tubería es particionada en cuatro segmentos, sin embargo son analizados de acuerdo a la teoría de viga en base elástica. La interacción de la tubería es tomada en cuenta en la dirección transversal y la dirección axial, por otra parte se tiene en cuenta las propiedades no lineales del material. Asimismo, el análisis es realizado como una serie de soluciones elásticas usando el módulo de la secante de la tubería de acero. En los lazos de iteración se busca una convergencia entre la fuerza axial obtenida a partir de la relación entre la elongación geométrica requerida y el esfuerzo inducido, y el máximo momento flector calculado de la teoría de viga elástica. Igualmente, de la convergencia de la fuerza axial y el momento flector calculado de la sección con el máximo momento usando la curva esfuerzo-deformación bilineal. Las predicciones del modelo analítico fueron comparadas

con modelos tridimensionales de elementos finitos que emplean un elemento tipo Shell para describir la tubería y resortes no lineales para simular el comportamiento del suelo.

Más recientemente, una investigación semi-analítica de comportamiento mecánico de tuberías enterradas bajo fallas sísmicas ha sido presentado por Trifonov y Cherniy [17]. Este trabajo extiende la teoría analítica presentada por Karamitros et al. realizando modificaciones al modelo estructural. Primero la tubería es dividida en cuatro segmentos, dos segmentos en zonas de alta curvatura en ambos lados de la falla son modelados como vigas en flexión y tensión con consideración de la fuerza axial en las ecuaciones de movimiento, segundo la condición de simetría en el punto de falla no es utilizada permitiendo analizar diferentes tipos de movimientos de falla, por otra parte la contribución del desplazamiento transversal del suelo a desplazamiento axial de la tubería es introducido. Este trabajo ha sido extendido por Trifonov y Cherniy en [18] en un intento de refinar el modelo analítico para el comportamiento inelástico del material de la tubería de acero. También se tienen en cuenta las cargas de servicio a las cuales se encuentra sometida la tubería como lo son la presión interna y la variación de temperatura ΔT (diferencia entre la temperatura de la línea y la temperatura de operación).

Un notable trabajo experimental en los efectos de los desplazamientos transversales (strike-slip) sobre tuberías enterradas de polietileno de alta densidad (HDPE) ha sido realizado por Ha et al. [9] y Abdoun et al. [1], estas investigaciones examinaron la influencia del tipo de falla, y del ángulo de la falla transversal (strike-slip) sobre el comportamiento mecánico, así como los efectos de la profundidad, y diámetro de la tubería y la humedad contenida.

En el campo de la simulación por medio de elementos finitos los trabajos más sobresalientes en el tema de la evolución del comportamiento mecánico de tuberías a través de fallas activas ha sido desarrollado por Vazouras et al.[20] Ellos enfocan su investigación en tuberías a través de fallas transversales (strike-slip), teniendo en consideración el ángulo respecto al plano de la falla, además del comportamiento inelástico del suelo circundante , la interacción y el contacto entre el suelo y la tubería (incluyendo la fricción de contacto y el desarrollo del gap), el desarrollo de grandes deformaciones inelásticas y la presencia de presión interna. Todo esto a través del modelamiento en elementos finitos del sistema suelo tubería.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

3.1 OBJETIVO GENERAL

Cumplir con la función misional de la Universidad Industrial de Santander, de generar conocimientos y soluciones en pro del progreso de la industria, específicamente la industria dedicada al transporte de hidrocarburos, desarrollando una investigación en ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR CARGAS GEOTÉCNICAS EN LÍNEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, a través del semillero de investigación DicBoT perteneciente a la Escuela de Ingeniería Mecánica.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis numérico, utilizando el modelo analítico desarrollado por Trifonov y Cherniy [17,18] para el análisis de esfuerzo – deformación, generado por desplazamientos transversales (strike-slip)⁵, en tubería enterrada para transporte de hidrocarburos, bajo los parámetros límites establecidos en el anexo C de la norma CSA - Z662-07 (Oil and gas pipeline systems) y la norma API 5L (Especificaciones para Tubería de Línea).

⁵ Una falla geológica en la que la falla es normal a la dirección de la tubería y se mueve en dirección horizontal.

- Realizar el análisis estructural en tubería de transporte de hidrocarburos a través del análisis de esfuerzo – deformación, generado por desplazamientos transversales (strike-slip) por medio de la simulación numérica en 3D, mediante el software COMSOL Multiphysic, en el cual se variarán los parámetros de la tubería de línea (diámetros, espesores, material) para la posterior valoración de integridad de la tubería de transporte, bajo los parámetros límites establecidos en el anexo C de la norma CSA - Z662-07 (Oil and gas pipeline systems) y la norma API 5L (Especificaciones para Tubería de Línea).
- Validar los resultados obtenidos por el método de los elementos finitos, mediante el modelo analítico desarrollado por Trifonov y Cherniy [17,18], para comprobar que la respuesta del modelo de elementos finitos se comporta de acuerdo con la respuesta analítica del sistema.

4. MARCO TEÓRICO

El oleoducto es la pieza maestra de la industria petrolera y constituye la forma más rápida, rentable y segura de transportar crudo a través de grandes distancias. Los oleoductos son un ensamblaje de tubos de acero con diámetros internos que suelen oscilar entre los 30 y los 120 centímetros, además pueden ser construidos sobre la superficie o enterrados bajo tierra según las necesidades del diseño.

Resulta imposible concebir el negocio del petróleo sin los oleoductos. Gracias a ellos el crudo se puede movilizar para su posterior refinación, procesamiento, exportación y uso. Por otra parte, la construcción y operación de estos sistemas de transporte se realizan siguiendo rigurosos estándares internacionales y de esta manera garantizar su perfecto funcionamiento.

Figura 4. Oleoducto transalaska.



Fuente: Nebraska Weather. En línea: <http://goo.gl/IIPrCB> [consultado 23 feb 2015]

En el 2011 se explotaban en el país más de 300 campos petroleros, con el 40% de la actividad exploratoria concentrada en los Llanos Orientales. Además, la producción de crudo ha aumentado considerablemente en los últimos años, al pasar de 35 pozos perforados en 2005, a 112 en el 2010, y de una reserva de 1.542 millones de barriles de crudo en 2003, a 2.058 millones de barriles en 2011.⁶

Para llevar esta importante producción de crudo hacia un terminal marítimo para exportación o hacia las refinerías para consumo interno, Colombia cuenta con seis oleoductos principales: Orensa, Caño Limón – Coveñas, Oleoducto del Alto Magdalena (OAM), Oleoducto de Colombia (ODC), Oleoducto de los Llanos Orientales (ODL), Oleoducto Transandino, Bicentenario Como se puede apreciar figuras 5, 6 y 7, además de una amplia red de poliductos y gasoductos.

Figura 5. Trazado de los oleoductos a través de la geografía colombiana.



Fuente: Ecopetrol. En línea: <http://goo.gl/hlybfv> [consultado 25 feb 2015]

⁶ Datos tomados del Memorando de Información. Corficolombiana Banca de Inversión, Bogotá, Diciembre 2011

Figura 6. Trazado de los poliductos a través de la geográfica colombiana.



Fuente: Ecopetrol. En línea: <http://goo.gl/p5o9cf> [consultado 25 feb 2015]

Figura 7. Trazado de los gasoductos a través de la geográfica colombiana.



Fuente: Ecopetrol. En línea: <http://goo.gl/NgHwEp> [consultado 25 feb 2015]

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA

El American Petroleum Institute (API) es el organismo más prestigioso a nivel mundial en lo que respecta a normas de ingeniería para la construcción de oleoductos, siendo las especificaciones API 5L (Especificaciones para Tubería de Línea), API 6D (especificaciones para válvulas en tubería) y la API 1104 (soldadura de tuberías), las aplicables para la construcción de tuberías para transporte de petróleo crudo, gas, así como derivados de hidrocarburos.

4.1.1 Especificaciones para tubería de línea

El propósito de la norma API 5L [3] es suministrar estándares confiables en la tubería de línea para la industria del gas y el petróleo para que de esta manera se garantice la fiabilidad de la tubería para la construcción de oleoductos y gasoductos.

4.1.2 Especificación del producto (Psl)

La norma API 5L establece los requerimientos para dos niveles de especificación del producto (PSL1 y PSL2). Estas dos designaciones establecen diferentes niveles de requerimientos técnicos estándar. PSL 2 tiene requisitos obligatorios para el carbón equivalente, dureza Notch, límite de fluencia y máxima resistencia a la tensión. Los requerimientos que aplican solo a PSL 1 o solo a PSL 2 son así designados. Los requerimientos que no son asignados a un PSL específico aplican para los dos niveles.

4.1.3 Grados

Los grados cubiertos por esta especificación son A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 y X80 y algunos grados intermedios. La tubería de nivel PSL 1 se puede ser suministrada en los grados A25 a X70 y la tubería de nivel PSL 2 puede ser suministrada en los grados B a X80. El acero de clase II es refosforizado y algunas veces presenta mejores propiedades de enroscado que la clase. Para grados x46 y superiores los fabricantes deberán aplicar una franja de color en el final de cada tramo de tubería para su identificación.

Tabla 1. Grados para aceros.

GRADO	SIMBOLO	COLOR ID
A 25 CLASE I	A 25	-----
A 25 CLASE II	A 25 R	-----
A	A	-----
B	B	-----
X42	X42	-----
X46	X46	NEGRO
X52	X52	VERDE
X56	X56	AZUL
X60	X60	ROJO
X65	X65	BLANCO
X70	X70	PURPURA
X80	X80	AMARILLO

Fuente: [norma API 5L]

4.1.4 Diámetro

El diámetro externo debe estar dentro de las tolerancias especificadas en la norma API 5L descritas en las tablas 2 y 3. Cualquier tubería que sea encontrada fuera de esta tolerancia se somete a medición individual del tramo hacia atrás, hasta el

final y hasta los siguientes tramos medidos secuenciales y que se encuentren dentro de la tolerancia.

Tabla 2. Tolerancias para diámetros de tubería

TAMAÑO	TOLERANCIA (con respecto al diametro externo)
<2 3/8	0,41mm- 0,79 mm
≥2 3/8 y < 20 soldadura continua	± 1,00%
≥ 2 3/8 y < 20	±0,75%
≥ 20 con costura	±1,00%
≥ 20 y ≤ 36 soldada	±0,75%-0,25%
> 36 soldada	6,35mm - 3,20mm

Fuente [Norma API 5L]

Tabla 3. Tolerancias para diámetros en los extremos

TAMAÑO	TOLERANCIA MINIMA	TOLERANCIA MAXIMA	FUERA DE REDONDEZ	
			TOLERANCIA DIAMETRO Y	DIFERENCIAL MAXIMO ENTRE DIAMETRO MIN Y
≤ 10 3/4	0,4mm	1,59mm	-	
> 10 3/4 y ≤ 20	0,79mm	2,38mm		
>20 y ≤ 42	0,79mm	2,38mm	±1%	≤ 12,7 mm
> 42	0,79 mm	2,38 mm	±1%	≤ 15,9 mm

Fuente: [Norma API 5L]

4.1.5 Espesor de la pared

El espesor de la tubería varía de acuerdo al tipo de grado, el material usado, la ubicación y la presión del diseño. Cada tramo de tubería debe ser medido con

respecto a las especificaciones de la norma API 5L descritas en la tabla 3, el espesor en cualquier localización debe estar dentro de las tolerancias descritas en la tabla 4, excepto el área de soldadura la cual no tiene limitaciones de espesor.

Tabla 4. Tolerancia para espesores de tubería

TAMAÑO	TIPO DE TUBERIA	TOLERANCIA (% de espesor especificado)	
		GRADO B O MENOR	GRADO X42 O SUPERIOR
≤ 2 7/8	TOTAL	20,0 - 12,5	15,0 - 12,5
> 2 7/8 < 20	TOTAL	15,0 - 12,5	15,0 - 12,5
≥ 20	SOLDADURA	17,5- 12,5	19,5 - 8
≥ 20	CON COSTURA	15,0 - 12,5	17,5 - 10,0

Fuente: [Norma API 5L]

4.1.6 Peso

Cada tramo de tubería de 5 9/16 o mayor debe ser pesado por separado, los tramos de tubería menores son pesados individualmente o en grupos. La tubería roscada y acoplada es pesada con los respectivos acoplamientos teniendo en cuenta que estén al interior de las roscas protectoras.

Los pesos calculados de longitudes completas son determinados según la siguiente ecuación según la API 5L:

$$w_l = (w_{pe}l) + e_w \quad (1)$$

Donde

w_l = peso calculado de una parte de la tubería de longitud L

L = longitud de la tubería, incluyendo los extremos

$$w_{pe} = 0.02466(D - t)t \quad (2)$$

w_{pe} = peso del extremo por unidad de longitud redondeado al valor más cercano

e_w = ganancia o pérdida de peso debida a los extremos

D = diámetro externo especificado

t = espesor especificado

4.1.7 Propiedades Mecánicas

Las propiedades para la tubería con nivel PSL 1, se establecen según la norma API 5L de acuerdo a los requerimientos de tensión especificados en la tabla 5.

Tabla 5. Propiedades mecánicas de la tubería PSL 1.

GRADO	MINIMO LIMITE DE FLUENCIA		MINIMA RESISTENCIA ULTIMA A TENSION		ALARGAMIENTO EN 2" MINIMO %
	PSI	MPA	PSI	MPA	
A25	25	172	45	310	a
A	30	207	48	331	a
B	35	241	60	414	a
X42	42	290	60	414	a
X46	46	317	63	434	a
X52	52	359	66	455	a
X56	56	386	71	490	a
X60	60	414	75	517	a
X65	65	448	77	531	a
X70	70	483	82	565	a

Fuente: [Norma API 5L]

Para la tubería con nivel PSL 2, se establecen según la norma API 5L de acuerdo a los requerimientos de tensión especificados en la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de la tubería PSL 2.

GRADO	MINIMO LIMITE DE FLUENCIA		MINIMO LIMITE DE FLUENCIA^B		MINIMA RESSITENCIA ULTIMA A TENSION		MINIMA RESSITENCIA ULTIMA A TENSION^c		ALARGAMIENTO EN 2" MINIMO %
	PSI	MPA	PSI	MPA	PSI	MPA	PSI	MPA	
B	35	241	65	448	60	414	110	758	a
X42	42	290	75	496	60	414	110	758	a
X46	46	317	76	524	63	434	110	758	a
X52	52	359	77	531	66	455	110	758	a
X56	56	386	79	544	71	490	110	758	a
X60	60	414	82	565	75	517	110	758	a
X65	65	448	87	600	77	531	110	758	a
X70	70	483	90	621	82	565	110	758	a
X80	80	552	100	690	90	621	120	827	a

Fuente [norma API 5L]

Notas

- a. e = alargamiento mínimo en 50.8 mm expresado en porcentaje y redondeado a 0.5% y se calcula mediante la siguiente fórmula

$$e = 62500 \left(\frac{A^{0.2}}{U^{0.9}} \right) \quad (4)$$

Donde

A = área de la sección transversal de la probeta

U = resistencia a la tracción

- B. el esfuerzo de fluencia máximo para un grado intermedio debe ser el máximo del grado superior inmediato.
- b. todos los grados intermedios deben tener un esfuerzo máximo de tracción de 758 MPa

De igual manera se deben tener en cuenta los factores de resistencia mecánica establecidos por la norma CSA - Z662-07 (Oil and gas pipeline systems), en su anexo C, tabla 7.

Tabla 7. Factores de resistencia

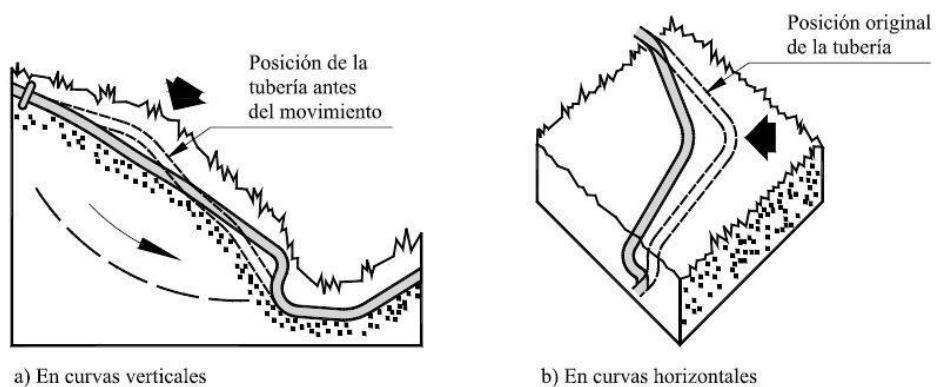
TIPO DE RESISTENCIA	FACTOR DE RESISTENCIA ϕ
ESFUERZO ULTIMO ϕ_y	0,9
ESTABILIDAD ϕ_c	0,7
ESFUERZO DE TENSIÓN ϕ_{et}	0,7
ESFUERZO DE COMPRESIÓN ϕ_{ec}	0,8

Fuente: [CSA - Z662-07 (Oil and gas pipeline systems)]

4.2 FALLAS POR PROCESOS GEOTÉCNICOS

Los procesos geotécnicos como procesos de erosión y movimientos de masa son un gran riesgo para los sistemas de tuberías, por lo cual son de importancia al momento de evaluar la integridad en ductos.

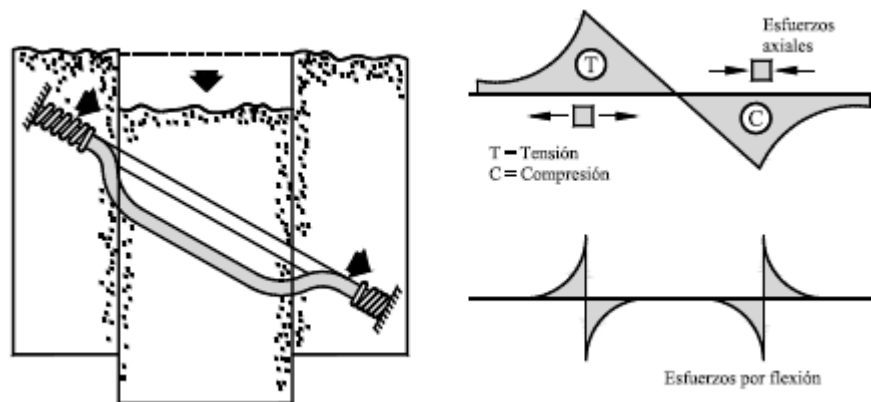
Figura 8. Movimientos de masa en tuberías. (a) Deslizamiento paralelo (b) Deslizamiento transversal.



Fuente: [Ingeniería y Geotecnia Ltda, 1991]

En la figura 8 se presentan el tipo de deformaciones que puede sufrir la tubería cuando es sometida a esfuerzos provenientes de desplazamientos del suelo. La figura A corresponde a un desplazamiento paralelo a la dirección de la tubería en este tipo de desplazamientos se generan esfuerzos de compresión en la dirección de movimiento de la falla y de tracción en la dirección opuesta. La figura b muestra una fallas con movimiento transversal a la dirección de la tubería, este tipo de falla es el tipo de desplazamiento más común que se presenta en los sistemas de tubería. Este tipo de falla genera esfuerzos axiales como también esfuerzos por flexión.

Figura 9. Efectos del movimiento del terreno en tuberías por subsidencia⁷



Fuente: [Ingeniería y Geotecnia Ltda, 1991]

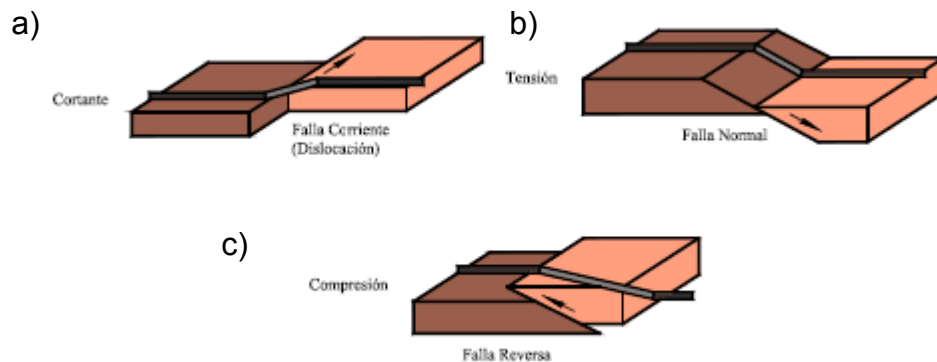
En general las fallas geotécnicas imponen altos niveles de tensión en ductos enterrados figura 9. Generalmente las tuberías soportan más tensiones a tracción distribuidas sobre tramos largos que las tensiones distribuidas sobre tramos cortos. Los factores como tipo de falla (Figura10.), orientación, material del relleno

⁷ La subsidencia en geología describe el progresivo hundimiento de una superficie

y posición de puntos fijos influyen sobre el comportamiento mecánico de la tubería durante un proceso de falla.

Los desplazamientos de falla generalmente pueden llegar a los 5 metros y en casos extremos pueden alcanzar rangos de 15 a 20 m.

Figura 10. Movimientos de falla sobre tuberías, a) Strike – slip, b) Normal c) Inversa



Fuente: [Potter, Savigny]

4.3 ANÁLISIS TEÓRICO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN TUBERÍAS A TRAVÉS DE FALLAS ACTIVAS TIPO STRIKE- SLIP

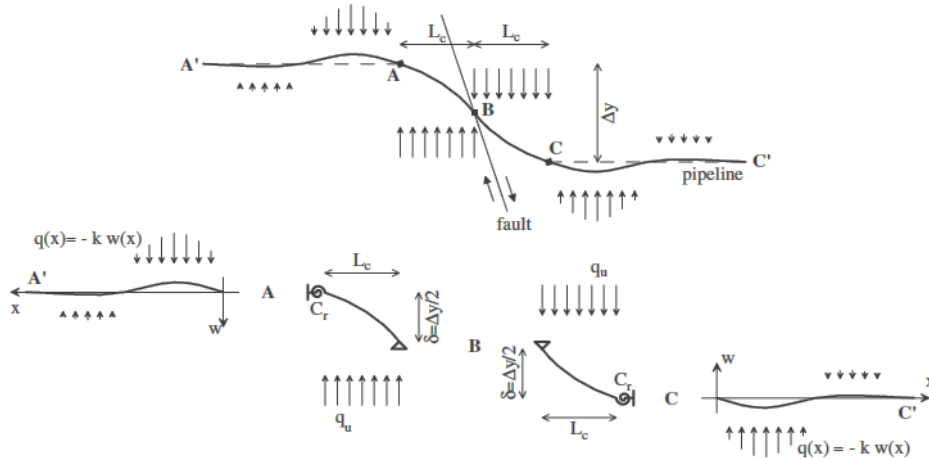
El análisis del comportamiento mecánico de la tubería se desarrolla por medio del modelo elastoplástico realizado por Trifonov y Cherniy en [18], junto con el modelo estructural tipo viga desarrollado por Trifonov y Cherniy en [17]. La solución del modelo estructural proporciona los esfuerzos axiales y de flexión a lo largo de la tubería, los cuales son usados en el modelo plástico para evaluar la

distribución de esfuerzo-deformación sobre la sección transversal, con el máximo momento flector.

4.3.1 Metodología de desarrollo del modelo estructural

Como modelo estructural se seguirá directamente el modelo presentado en [17] y [18]. Siguiendo el modelo de Trifonov y Cherniy, la tubería es particionada en cuatro segmentos como se muestra en la figura 11, el punto B representa la intersección de la tubería con el recorrido de la falla; los puntos A y C están cerca de los puntos de la tubería con cero desplazamiento transversal. Los puntos A' y C' están a una distancia de A y C lo suficientemente lejos para que no exista desplazamiento transversal.

Figura 11. División de la tubería en cuatro segmentos



Fuente: [Trifonov y Cherniy [13]

Los segmentos AA' y CC', son analizados como vigas en base elástica de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = 0 \quad (5)$$

Donde E es el modulo elástico, I es el momento de inercia de la sección transversal, k es el parámetro de rigidez para base elástica. Considerando los desplazamientos en la dirección transversal w y la fuerza correspondiente q , en este caso la rigidez es calculada como $k = q/w$.

La solución de la ecuación (5) es obtenida usando las siguientes condiciones límite:

$$W=0 \text{ para } x=0 \text{ y } w \rightarrow 0 \text{ cuando } x \rightarrow \infty.$$

Los segmentos AB y BC son analizados como vigas elásticas cargadas con una fuerza axial F y una carga distribuida q . La intensidad de la fuerza distribuida es igual al valor límite de la fuerza de interacción suelo tubería por unidad de longitud, debido al desplazamiento transversal de la tubería relativo al suelo circundante.

La ecuación de equilibrio para la viga bajo la combinación de flexión – tensión tiene la forma:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - F \frac{d^2 w}{dx^2} = q \quad (6)$$

La solución de las ecuaciones (5) y (6) son correspondientes a segmentos con constantes desconocidas, las cuales son halladas de las condiciones límites de los segmentos en los puntos de unión. El resultante sistema de ecuaciones no lineares puede ser resuelto numéricamente. En el caso de falla transversal (strike

slip), el problema de la flexión se convierte en antisimétrico⁸ y el sistema se reduce a una simple ecuación no lineal que puede resolverse mediante el método de Newton- Raphson.

Después de que la solución $W(x)$ es obtenido, otras cantidades tales como la rotación $\phi(x) = w'(x)$, momento flector $M(x) = EIw''(x)$ y la fuerza cortante $V(x) = EIw'''(x)$ pueden ser evaluados. También el máximo momento flector $|M_{max}|$ puede ser evaluado para cada segmento.

4.3.2 Cálculo de la fuerza y la deformación axial en el punto de intersección de la falla

La fuerza axial actuando sobre los segmentos AB y BC es asumida constante e igual a la fuerza axial en el punto de intersección de la falla con la tubería.

La elongación geoméricamente requerida ΔL_{req} es la suma de la elongación ocasionada por el movimiento de la falla en dirección axial Δx y la elongación ocasionada por el desplazamiento transversal de la tubería Δb

$$\Delta L_{req} = \Delta x + \Delta b \quad (7)$$

Donde

$$\Delta x = \Delta f \cos(\beta), \quad \Delta b = \int_x (w)^2 dx \quad (8)$$

Aquí Δf es el desplazamiento de la falla, β es el ángulo de intersección de la falla y la tubería. La integración en la ecuación (8) es realizada sobre los segmentos AB

⁸ Es un concepto usado en matemática y física cuando un objeto se rompe tanto a la simetría rotacional como a la simetría translacional. Eso es, cuando un objeto sólo puede hacer rotar un objeto en ciertos ángulos o cuando uno puede decir si el objeto ha sido cambiado de puesto lateralmente.

y BC. La expresión analítica para la elongación Δb , se aproxima mediante el uso de los polinomios de Hermite, de la siguiente forma:

$$\Delta b = \frac{3}{5L_1} [w_1^2(0) + w_1^2(L_1) - w_1(0)w_1(L_1)] + \frac{L_1}{15} \left[\phi_1^2(0) + \phi_1^2(L_1) - \frac{1}{4}\phi_1(0)\phi_1(L_1) \right] + \frac{1}{20} [w_1(0)\phi_1(0) - w_1(L_1)\phi_1(L_1) + w_1(0)\phi_1(L_1) - w_1(L_1)\phi_1(0)] \quad (9)$$

La ecuación (9) es escrita para el segmento AB. Una expresión análoga puede ser utilizada para el segmento BC. El error en el cálculo de Δb no excede el 3% para $\Delta f/D$, entre el rango de 0.1 y 4.0.

La longitud disponible ΔL_{av} es definida como:

$$\Delta L_{av} = 2 \int_0^{L_{anch}} \varepsilon_a(x) dx \quad (10)$$

Donde L_{anch} es la longitud, sobre la que el deslizamiento entre el tubo y el suelo circundante se produce, $\varepsilon_a(x)$ es la deformación axial y x es la coordenada axial medida desde el punto de intersección de la falla. En la ecuación (10) se asume que la elongación en ambos lados de la falla es idéntica, estrictamente esto es válido solo para el caso de falla transversal (strike slip).

La longitud anclada L_{anch} es calculada de la ecuación de equilibrio en la dirección axial, asumiendo cero deformación axial en el final de la longitud anclada.

$$\sigma_x(L_{anch}) = \sigma_x^{in} \quad (11)$$

$$L_{anch} = \frac{F_a}{t_u} = \frac{\sigma_a A_s}{t_u} \quad (12)$$

Donde F_a y σ_a son la fuerza axial y el esfuerzo desarrollado en el punto de intersección, A_s es el área de la sección transversal de la tubería, y t_u es el límite de fricción en la interface suelo- tubería.

La deformación axial para un punto x dentro de la longitud anclada, se expresa como:

$$\varepsilon_a = (\sigma_x - \sigma_x^{in})/E \quad \text{si } \sigma_x \leq \sigma_0 \quad (13)$$

$$\varepsilon_a = (\sigma_x - a)/b \quad \text{si } \sigma_x > \sigma_0 \quad (14)$$

Aquí y más adelante en esta sección está implícito que $\sigma_0 = \sigma_0^1$ y $a = a_1$.

De la condición de equilibrio, para un determinado punto x dentro de la longitud anclada, el esfuerzo de tensión se expresa como:

$$\sigma_x(x) = \sigma_a - \frac{t_u}{A_s}x + \sigma_x^{in} \quad (15)$$

Donde

$$\sigma_x^{in} = \gamma\sigma_\theta - E\alpha\Delta T \quad (16)$$

Donde α es el coeficiente de expansión térmica. La convención “in” indica inicial, γ es el módulo de poisson y $\sigma_\theta = 0.75\sigma_y$ es el esfuerzo superficial.

Si el comportamiento es elástico la longitud disponible se define de la siguiente forma:

$$\Delta L_{av} = 2 \int_0^{l_{anch}} \frac{[\sigma_a - \frac{t_u x}{A_s}]}{E dx} = \frac{\sigma_a A_s}{E t_u} \quad (17)$$

De la condición $\Delta L_{req} = \Delta L_{av}$, se puede evaluar el máximo esfuerzo de tensión. Dos casos pueden ser considerados: (1) la longitud requerida es menor que la

actual elongación correspondiente al máximo esfuerzo axial igual al límite de esfuerzo $\sigma_a = \sigma_Y$; (2) la longitud actual es mayor que la actual elongación correspondiente a $\sigma_a = \sigma_Y$:

$$\text{Si } \Delta L_{req} \leq \frac{\sigma_Y^2 A_s}{Et_u}$$

$$\sigma_a = (Et_u \Delta L_{req} / A_s)^{1/2} \quad (8)$$

$$\text{Si } \Delta L_{req} > \frac{(\sigma_0 - \sigma_x^{in})^2 A_s}{Et_u}$$

$$\sigma_a = a - \sigma_x^{in} + \left[(a - \sigma_x^{in})^2 - 2(a - \sigma_x^{in})(\sigma_0 - \sigma_x^{in}) + (\sigma_0 - \sigma_x^{in})^2 \left(1 - \frac{b}{E}\right) + \Delta L_{req} b t_u / A_s \right]^{1/2} \quad (19)$$

De la teoría elastoplástica se define el máximo esfuerzo longitudinal a compresión como $\sigma_0^1 = \frac{\sigma_\theta}{2} + \Psi \sigma_Y$, además, se define la constante $a_1 = \frac{E\Psi^2 \sigma_0^1 + H' \sigma_x^{in}}{H' + E\Psi^2}$.

Donde el parámetro de endurecimiento del material se define como

$$H' = \frac{E_t}{\left(1 - \frac{E_t}{E}\right)}, \quad \Psi = \left(1 - \frac{3\sigma_\theta^2}{4\sigma_Y^2}\right)^{1/2}, \quad \text{y } b = \frac{EH'}{H' + E\Psi^2},$$

La fuerza axial en el punto de intersección de la falla es:

$$F_a = (\sigma_a + \sigma_x^{in}) / A_s \quad (20)$$

La deformación axial es calculada de acuerdo con las ecuaciones:

$$\varepsilon_{a,f} = \sigma_a / E \quad \text{si } \sigma_x \leq \sigma_0 \quad (21)$$

$$\varepsilon_{a,f} = (\sigma_a + \sigma_x^{in} - a) / b \quad \text{si } \sigma_x > \sigma_0 \quad (22)$$

4.3.3 Solución para la viga en flexión y tensión, segmentos ab y bc.

El análisis de los segmentos AB y BC se realiza mediante la solución de la ecuación 6, la cual escrita en forma de los parámetros iniciales, toma la siguiente forma:

$$w(x) = w(0) + \phi(0) \frac{\sinh \alpha x}{\alpha} + \frac{M(0)}{EI\alpha^2} [\cosh \alpha x - 1] + \frac{V(0)}{EI\alpha^3} [\sinh \alpha x - \alpha x] + \frac{q}{F} \left[\cosh \alpha x / \alpha^2 - x^2 / 2 \right] \quad (23)$$

Donde $\alpha^2 = \frac{F}{EI}$

La ecuación 23 se aplica a los segmentos AB y BC. La solución es construida por separado para cada segmento y las constantes correspondientes son encontradas de las condiciones límite en los puntos de unión.

Las condiciones límites en los puntos de unión con los segmentos de vigas en base elástica, se expresan como:

$$\begin{aligned}
w_1(0) &= 0 & w_2(0) &= 0 \\
\phi_1(0) &= \phi_A & \phi_2(0) &= \phi_c \\
M_1(0) &= -M_A = C_{r1}\phi_A & M_2(0) &= -M_c = C_{r2}\phi_c \\
V_1(0) &= V_A = \lambda C_{r1}\phi_A & V_2(0) &= V_c = \lambda C_{r2}\phi_c
\end{aligned}$$

La solución para el segmento AB se designa con el subíndice 1 y la solución de segmento BC con el subíndice 2.

$$\begin{aligned}
w_1(x) &= \phi_A \frac{\sinh \alpha_1 x}{\alpha_1} + \frac{C_{r1}\phi_A}{EI\alpha_1^2} [\cosh \alpha_1 x - 1] + \frac{\lambda C_{r1}\phi_A}{EI\alpha_1^3} [\sinh \alpha_1 x - \alpha_1 x] \\
&\quad + \frac{q_{u1}}{F} \left[\cosh \alpha_1 x / \alpha_1^2 - x^2 / 2 \right]
\end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
w_2(x) &= \phi_c \frac{\sinh \alpha_2 x}{\alpha_2} + \frac{C_{r2}\phi_c}{EI\alpha_2^2} [\cosh \alpha_2 x - 1] + \frac{\lambda C_{r2}\phi_c}{EI\alpha_2^3} [\sinh \alpha_2 x - \alpha_2 x] \\
&\quad + \frac{q_{u2}}{F} \left[\cosh \alpha_2 x / \alpha_2^2 - x^2 / 2 \right]
\end{aligned} \tag{25}$$

Donde $\lambda_j = \sqrt[4]{k_j/4EI}$, $C_{rj} = 2\lambda_j EI$, $j = 1, 2$. Hay cuatro incógnitas en las ecuaciones (24) y (25), para determinar estas variables se introducen las siguientes condiciones:

$$w_1(L_1) + w_2(L_2) = -\Delta y$$

$$\phi_1(L_1) = \phi_2(L_2)$$

$$M_1(L_1) = -M_2(L_2)$$

$$V_1(L_1) = V_2(L_2)$$

4.3.4 Interacción entre la deformación axial y por flexión.

En el rango de deformación inelástica, la deformación axial y flexión están interconectadas. Específicamente, el momento de flexión máximo hace que, la deformación axial en la proximidad de la sección transversal aumente localmente (asegurando el equilibrio entre la fuerza axial de tensión y la fuerza axial aplicada). Este efecto es considerado usando la relación bilineal de esfuerzo - deformación. Cabe señalar que bajo esta consideración la sección transversal de la tubería tiende a ovalarse bajo la acción de la presión externa y los momentos de flexión. El efecto de la ovalización cambia la rigidez de la sección transversal y contribuye al fenómeno del pandeo. En el documento [13] basado en experimentación y análisis numéricos se muestra que el límite de ovalización (deformaciones por compresión correspondientes a 15 % de ovalización), es alcanzado solo en tuberías sin presurizar. Para la razón D/t usada en esta investigación las deformaciones compresivas exceden el -2.5% , por este motivo para simplificar los análisis se puede asumir que la sección transversal se mantiene plana.

Bajo la asunción de que la sección transversal se mantenga plana, la distribución de deformaciones en la sección transversal con el máximo momento flector es dada por:

$$\varepsilon = \varepsilon_a + \varepsilon_b \cos \varphi \quad (26)$$

Donde ε_a es la deformación axial y $\varepsilon_b = M_{max}D/2EI$ es la máxima deformación por flexión, φ es el ángulo polar de la sección transversal.

Denotando los ángulos polares máximos en tensión y compresión como $\varphi_{1,2}$ obtenemos:

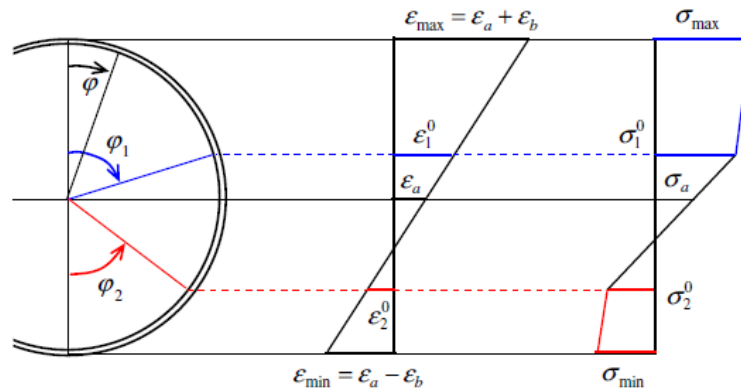
$$\sigma_x = \begin{cases} a_1 + b\varepsilon_x, & 0 \leq \varphi < \varphi_1 \\ E\varepsilon_x + \sigma_x^{in} & \varphi_1 \leq \varphi \leq \pi - \varphi_2 \\ a_2 + b\varepsilon_x & \varphi_2 < \varphi \leq \pi \end{cases} \quad (27)$$

Los ángulos $\varphi_{1,2}$ pueden ser calculados con las siguientes relaciones:

$$\varphi_1 = \begin{cases} \pi & \varepsilon_a - \varepsilon_b > \varepsilon_1^0 \\ \arccos\left(\frac{\varepsilon_1^0 - \varepsilon_a}{\varepsilon_b}\right) & \varepsilon_a + \varepsilon_b \geq \varepsilon_1^0 \\ 0 & \varepsilon_a + \varepsilon_b < \varepsilon_1^0 \end{cases} \quad (28)$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \pi & \varepsilon_a + \varepsilon_b < \varepsilon_2^0 \\ \arccos\left(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_2^0}{\varepsilon_b}\right) & \varepsilon_a + \varepsilon_b \leq \varepsilon_2^0 \\ 0 & \varepsilon_a - \varepsilon_b > \varepsilon_1^0 \end{cases} \quad (29)$$

Figura 12. Distribución esfuerzo deformación en la sección transversal con el máximo momento flector.



La fuerza axial y el momento flector en la sección transversal son evaluados integrando sobre la sección transversal:

$$F(\varepsilon_a, \varepsilon_b) = 2 \int_0^\pi \pi R_m t d\varphi = 2R_m t \{ E\varepsilon_a \pi + \sigma_x^{in}(\pi - \varphi_1 - \varphi_2) - (E - b)(\varphi_1 + \varphi_2)\varepsilon_a + a_1\varphi_1 + a_2\varphi_2 - (E - b)[\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2]\varepsilon_b \} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} M(\varepsilon_a, \varepsilon_b) &= 2 \int_0^\pi \sigma R_m t R_m \cos \varphi d\varphi \\ &= 2R_m^2 t \{ E\varepsilon_b \pi / 2 - \sigma_x^{in}(\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) \\ &\quad - (E - b)\varepsilon_b(\varphi_1 + \varphi_2)/2 - (E - b)\varepsilon_a(\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) + a_1 \sin \varphi_1 \\ &\quad - a_2 \sin \varphi_2 - (E - b)(\sin 2\varphi_1 + \sin 2\varphi_2)\varepsilon_b (1/4) \} \end{aligned} \quad (31)$$

Donde la notación $R_m = (D - t)/2$.

La máxima deformación axial ε_a puede ser evaluada de la ecuación de equilibrio entre la fuerza axial aplicada y la fuerza axial obtenida de la integración sobre la sección transversal.

$$F(\varepsilon_a, \varepsilon_b) - F_a = 0 \quad (32)$$

5. METODOLOGÍA

5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ELECCIÓN DEL MODELO

En esta investigación, la elección del modelo de análisis numérico se basó en los resultados obtenidos por Trifonov y Cherniy [17][18], quienes desarrollaron un algoritmo para el análisis numérico de tuberías a través de fallas activas que se aproxima en buena medida al comportamiento real de la tubería, tal y como se presentó en el estado del arte del presente documento.

Mediante este modelo analítico se desarrolló una simulación numérica del modelo, asimismo se realizó la comprobación de los resultados obtenidos a través del modelado realizado mediante elementos finitos en el software COMSOL Multiphysics®.

5.2 ANÁLISIS NUMÉRICO DEL MODELO

El análisis numérico para el modelo analítico será realizado para una línea de transporte de gas a alta presión, la cual se encuentra en una falla activa de desplazamiento transversal (strike - slip).

Para la tubería se asume un diámetro de $D = 0.9144$ [m] (36 [in]) y un espesor de pared de $t=0.0119$ [m] (0.469 [in]). La tubería de acero es caracterizada en la curva de esfuerzo y deformación con las siguientes características esfuerzo de

fluencia $\sigma_y = 490 \text{ MPa}$, modulo elastico de Young $E = 210 \text{ GPa}$, modulo de endurecimiento $E_2 = 1.088 \text{ GPa}$. La interacción suelo- tubería está determinada por las propiedades establecidas en el anexo B de la norma ALA –ASCE [9], además de los factores establecidos en el anexo C de la norma CSA - Z662-07 [6] (Oil and gas pipeline systems) y se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Propiedades interacción suelo-tubería.

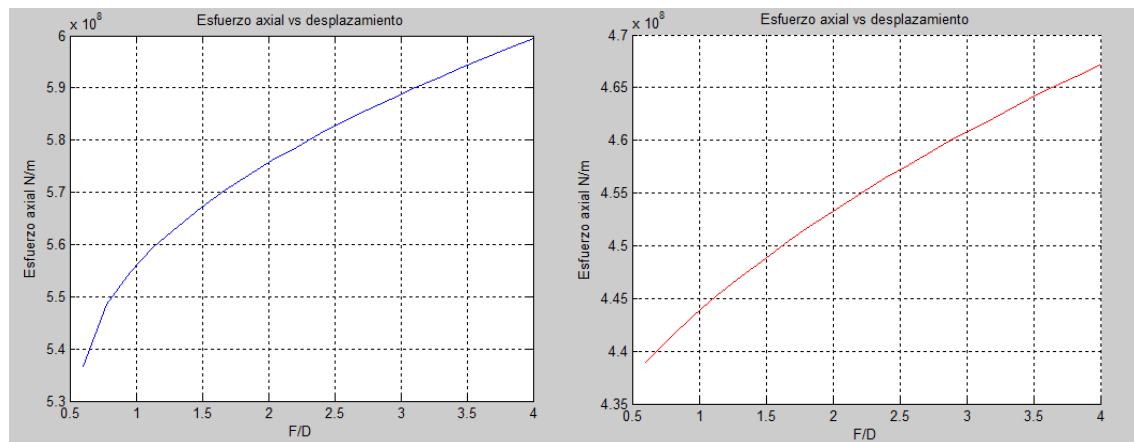
Dirección del desplazamiento	Fuerza (KN/m)	Desplazamiento (mm)
Dirección axial	40,5	3
Dirección transversal horizontal	318,6	11,4
Dirección movimiento vertical	52	2,2
Dirección movimiento vertical hacia abajo	1360	100

Es asumido que la tubería está enterrada 1.3 m en arena de media densidad con un ángulo de fricción de 36° y un peso por unidad de área de 18 kN/m^2 . Además se realizarán los cálculos para diferentes ángulos de intersección de la falla y la tubería, para analizar el comportamiento en la deformación de la tubería.

En la figura 13 se observa el comportamiento de los esfuerzos en función del desplazamiento para dos diferentes cargas de servicio, y un ángulo de intersección de la falla $\beta = 30^\circ$. Como se puede observar, el esfuerzo en la tubería aumenta en función del desplazamiento del suelo y la carga de servicio a la cual se encuentra sometida la línea.

Las figuras 14 y 15 corresponden a un ángulo de falla de $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$ respectivamente. Las gráficas (a) y (b) representan los resultados para casos con una presión interna correspondiente a un esfuerzo radial σ_θ igual a 0.85 y 0.15 del esfuerzo de fluencia σ_y y un aumento de temperatura $\Delta_T = 50^\circ c$ relativo a las condiciones de tendido de la línea. Las gráficas (c) y (d) muestran los resultados para las mismas condiciones de presión pero sin carga térmica.

Figura 13. Comportamiento del esfuerzo axial para diferentes desplazamientos.



a. Nivel de esfuerzo para una carga de $\sigma_\theta = 0.85\sigma_y$, b. nivel de Nivel de esfuerzo para una carga de $\sigma_\theta = 0.15\sigma_y$

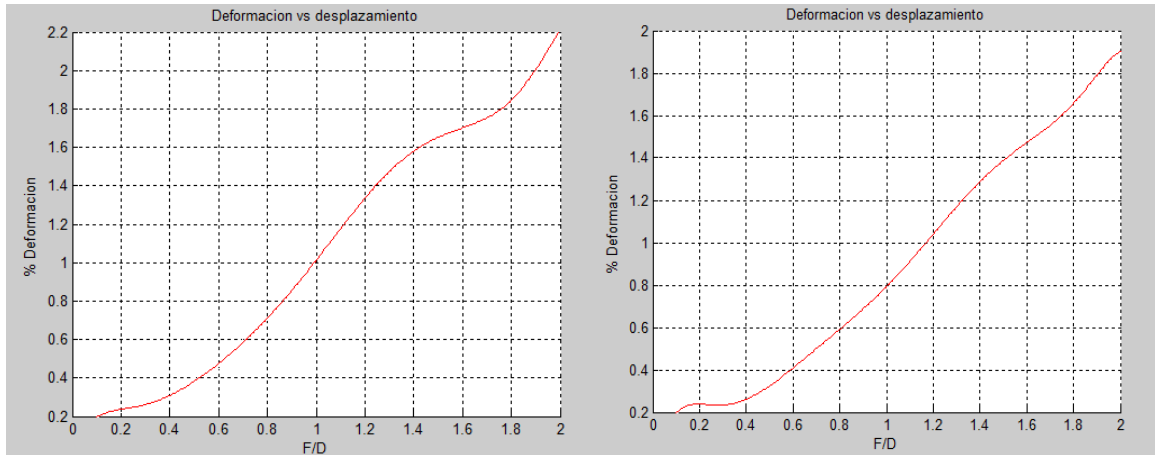
Comparando las figuras 14 y 15, se puede notar que para el caso de $\beta = 30^\circ$ las deformaciones son más altas, esto es debido a la componente axial del desplazamiento de la falla. Las deformaciones plásticas comienzan a desarrollarse relativamente pequeñas para los desplazamientos de falla iguales a $0.2D - 0.4D$.

Figura 14. Deformación máxima vs desplazamiento de la falla para diferentes condiciones de carga y ángulo de intersección de $\beta = 30^\circ$.

$\Delta T = 50^\circ c$

A. $\sigma_\theta = 0.85\sigma_Y$,

B. $\sigma_\theta = 0.15\sigma_Y$



$\Delta T = 0^\circ c$

C. $\sigma_\theta = 0.85\sigma_Y$,

D. $\sigma_\theta = 0.15\sigma_Y$

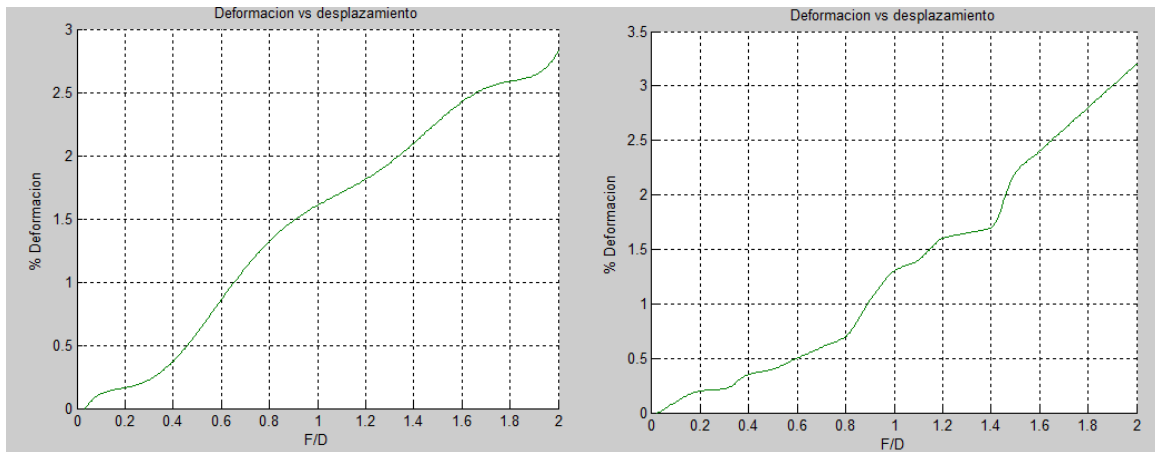
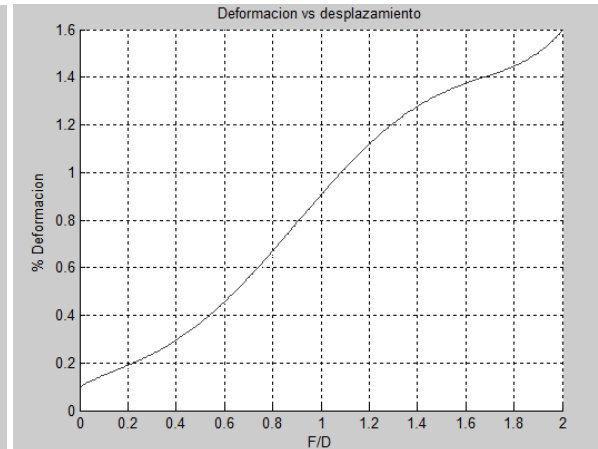
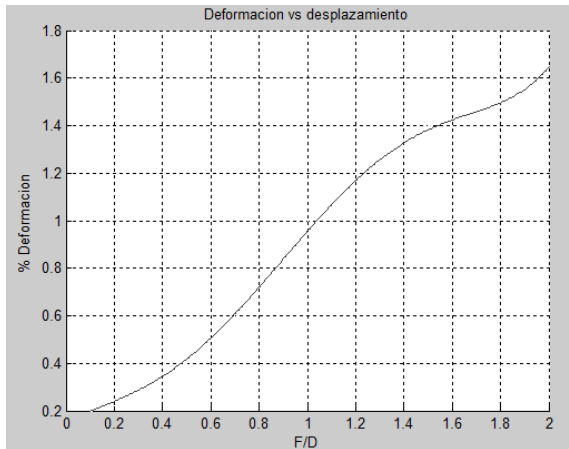


Figura 15. Deformación máxima vs desplazamiento de la falla para diferentes condiciones de carga y ángulo de intersección de $\beta = 60^\circ$.

$$\Delta T = 50^\circ c$$

A. $\sigma_\theta = 0.85\sigma_Y$,

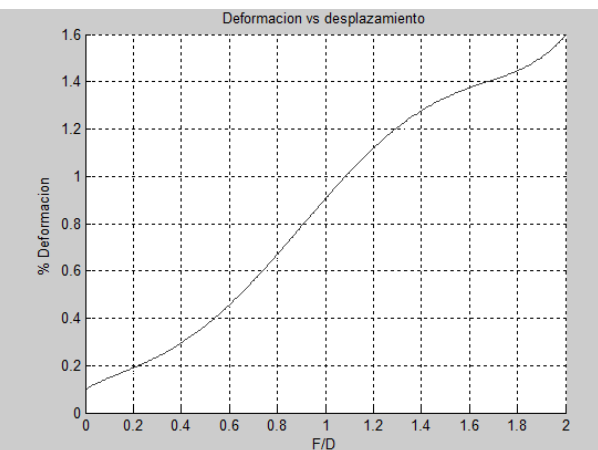
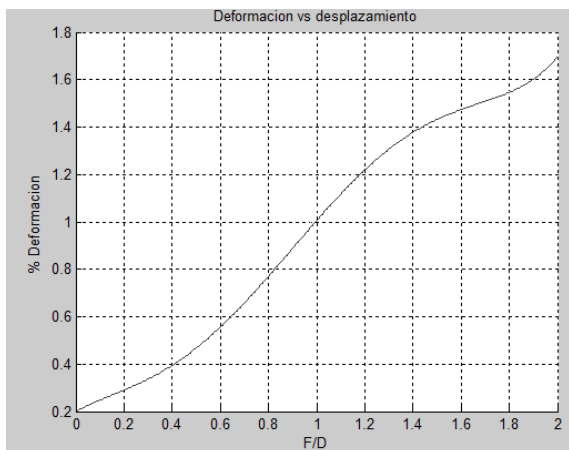
B. $\sigma_\theta = 0.15\sigma_Y$



$$\Delta T = 0^\circ c$$

C. $\sigma_\theta = 0.85\sigma_Y$,

D. $\sigma_\theta = 0.15\sigma_Y$



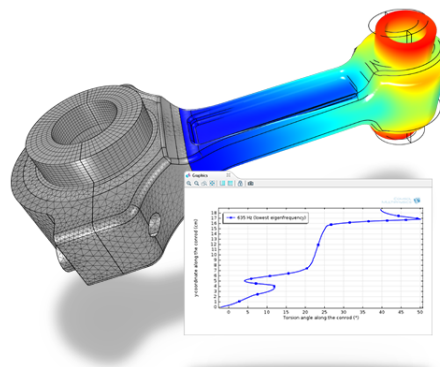
Es instructivo comparar los resultados de deformación máxima con algunas deformaciones finales correspondientes a posibles estados límite de la tubería. Tales estados límites podrían corresponder a la pérdida de fuerza (fallo), límite

plástico (deformaciones plásticas grandes), pandeo local (arrugas), ovalización, agrietamiento de las uniones soldadas y cuerpo de la tubería, la inestabilidad estructural global, etc. La deformación en la tubería alcanzada en un estado límite en particular depende de una serie de factores, una geometría de la tubería, el material, la carga y las condiciones operativas.

5.3 SOFTWARE DE SIMULACIÓN COMSOL MULTIPHYSICS ®

COMSOL Multiphysics ® es una plataforma de software de propósito general, basado en métodos numéricos avanzados, para el modelado y la simulación de problemas basados en la física. COMSOL Multiphysics ® puede modelar virtualmente cualquier fenómeno físico mediante ecuaciones diferenciales parciales (PDE), incluyendo transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo y mecánica estructura.

Figura 16. Análisis de frecuencia propia de una biela.



Fuente: Comsol. En línea: <http://goo.gl/EK1wb3> [consultado 17 mar 2015]

5.3.1 Módulo de mecánica estructural

El módulo de Mecánica Estructural está dedicado al análisis de las estructuras mecánicas que están sujetas a cargas estáticas o dinámicas. Se puede utilizar para una amplia gama de tipos de análisis, incluyendo estacionario y transitorio, modo propio / modal, paramétrico, respuesta a la frecuencia casi estática, pandeo, y pretensado.

El módulo de Mecánica Estructural proporciona interfaces de usuario para el análisis en 2D, simetría axial 2D y 3D sistemas de coordenadas para sólidos, Shell (3D), placas (2D), cerchas (2D, 3D), membranas (simetría axial 2D, 3D), y vigas (2D, 3D). Estos permiten el análisis de deformación con la no linealidad geométrica, contacto mecánico y la tensión térmica.

El módulo de mecánica estructural se divide en las siguientes aplicaciones:

APLICACIONES EN 2D

- Tensión de plano.
- Presión de plano.
- Placas gruesas y delgadas.
- Simetría axial, tensión-presión.
- Simetría axial, difusión de calor.
- Viga de Euler.

APLICACIONES EN 3D

- Sólido.
- Viga de Euler.
- Armazones.

En las anteriores aplicaciones, el usuario puede proporcionar las propiedades materiales o seleccionarlas del archivo material del módulo de mecánica estructural. Las propiedades materiales pueden darse como funciones arbitrarias de espacio, tiempo, desplazamientos, tensión y presión. Las aplicaciones anteriores pueden combinarse con las prestaciones de análisis siguientes: Análisis estático, Análisis dinámico, Análisis de frecuencias propias, Análisis de respuesta en frecuencia.

5.4 PROTOCOLO DE SIMULACIÓN

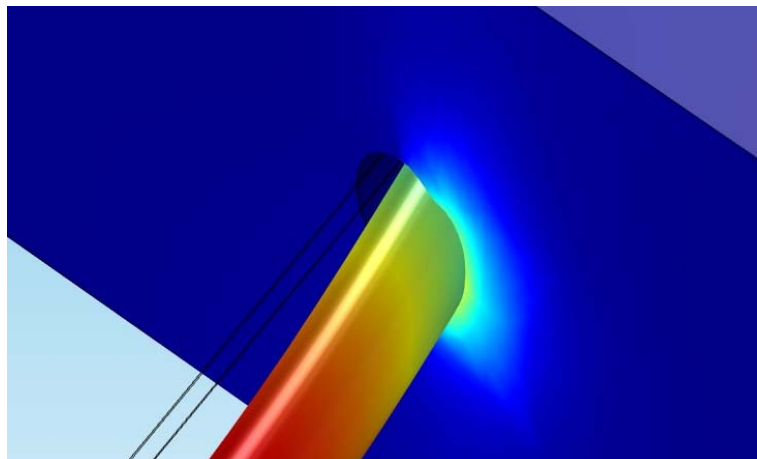
Debido a la alta complejidad del modelo numérico se hace difícil el análisis de los diferentes parámetros que intervienen en el análisis del comportamiento estructural de la tubería. A través del software COMSOL Multiphysics®, la variación de estos parámetros se hace de manera más ágil, lo cual facilita el análisis estructural de la tubería.

Existe gran cantidad de documentación en lo que respecta al manejo de COMSOL Multiphysics® y el desarrollo de modelos multifísicos, pero ninguna de estas referencias cubría por completo el detalle de los protocolos de simulación que deben seguirse para obtener los resultados numéricos relacionados con los objetivos de este estudio. A causa de esto se hizo necesario un largo proceso de prueba y error, para la obtención de la información numérica que se buscaba en este proyecto. A continuación se muestra detalladamente el protocolo de simulación que se llevó a cabo para el desarrollo del modelo propuesto en esta investigación.

5.5 REALIZACIÓN DEL MODELO.

El primer paso para el desarrollo del análisis estructural es el estudio de la interacción entre la tubería y el suelo circundante, y de esta manera establecer los parámetros para que el comportamiento se desarrolle de manera similar al proceso físico real, como lo son el desarrollo del gap⁹ y la transmisión de esfuerzos a la tubería a través del desplazamiento del suelo.

Figura 17. Desarrollo del gap



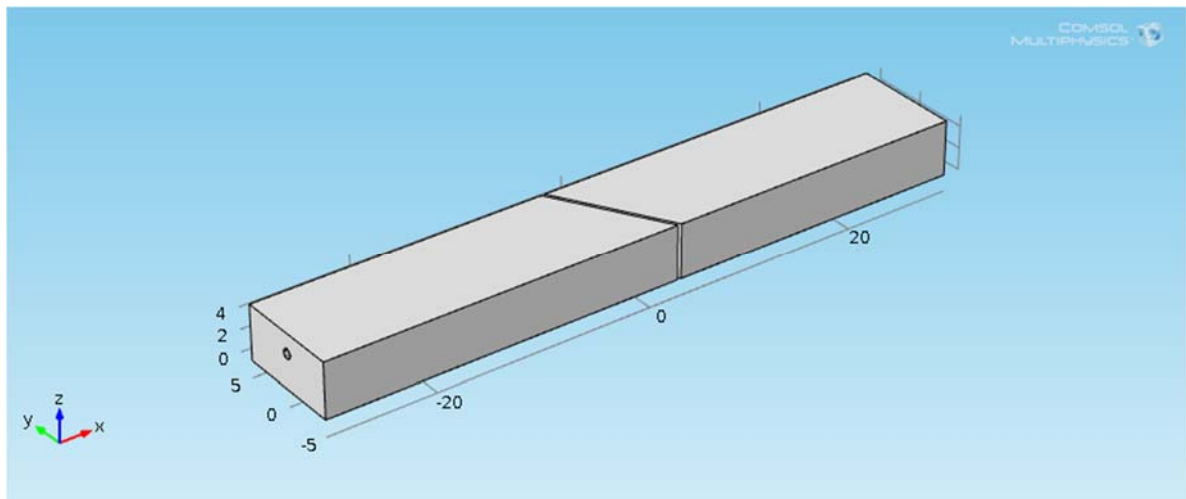
Posteriormente a la verificación del comportamiento de la interacción suelo-tubería se realiza la optimización de los diferentes parámetros de la simulación como los son la malla, condiciones de frontera y pares de contacto; buscando que el modelo se comporte lo más cercano al proceso físico real y consumiendo la menor cantidad posible de recursos computacionales.

⁹ Espacio vacío que se desarrolla en el suelo circundante a la tubería debido al desplazamiento de la misma.

5.5.1 Dimensionamiento del modelo

Para el dimensionamiento del modelo se tomaron los parámetros del trabajo realizado por Vazouras et al.[21], la tubería es alojada a lo largo del eje x de un suelo prismático como se ve en la figura 18 ; La superficie superior del prisma representa la superficie del suelo. La tubería es enterrada aproximadamente 2.73 diámetros de la tubería lo cual está acorde con las prácticas en ingeniería [14]. El prisma tiene una longitud en el eje x de 60 [m], una longitud en el eje y de 10 [m] y una longitud en el eje z de 5 [m].

Figura 18. Esquema general de la simulación



El plano de falla sísmica divide el suelo en dos bloques de igual tamaño como se observa en la figura 18, en donde uno de estos se desplaza a lo largo de la dirección paralela al plano de falla y el otro se mantiene estático. La tubería se dimensiona de acuerdo a la norma API 5L.

5.5.2 Propiedades de los materiales

Las propiedades físicas tanto como mecánicas son establecidas de acuerdo a las diferentes normativas. Las propiedades de la tubería se establecen de acuerdo a la norma API 5L y se muestran en la tabla 9 para dos materiales de tubería utilizados. Asimismo las propiedades del suelo son establecidas en el anexo B de la norma ALA –ASCE [9] y se muestra en la tabla 10.

Posteriormente estos datos son introducidos al software COMSOL para realizar el proceso de simulación.

Tabla 9. Propiedades mecánicas tubería X65 y X80.

Material	Propiedad	Valor
Tubería X65	Módulo de Young	210 [GPa]
	Razón de Poisson	0,33
	Densidad	7850 [kg/m ³]
	Límite elástico	448 [Mpa]
	Módulo de endurecimiento	0,7 [GPa]
Tubería X80	Módulo de Young	210 [GPa]
	Razón de Poisson	0,33
	Densidad	7850 [kg/m ³]
	Límite elástico	552 [Mpa]
	Módulo de endurecimiento	0,7 [GPa]

Tabla 10. Propiedades mecánicas suelo.

Material	Propiedad	Valor
Suelo	Módulo de Young	25 [MPa]
	Razón de Poisson	0,5
	Densidad	1400 [kg/m ³]
	Cohesión	50 [kPa]
	Ángulo fricción interna	0 [deg]
	Ángulo de dilatación	0 [deg]

5.5.3 Consideraciones para el desarrollo

Para el análisis del modelo se tomaron algunas consideraciones para poder desarrollar el modelo dentro de los límites computacionales adecuados y que la aproximación al modelo real sea cercana. Para esto se realizaron las siguientes consideraciones:

- Se considera comportamiento no lineal para los materiales del suelo y de la tubería.
- Los nodos en las superficies verticales del primer bloque de suelo (bloque fijo) y la tubería permanecen fijos en las direcciones horizontales.
- Se considera un desplazamiento horizontal uniforme debido al movimiento de la falla, el cual es impuesto en los nodos externos de la tubería y el suelo del segundo bloque (bloque en movimiento) que se mueve horizontalmente a lo largo de la dirección paralela al plano de la falla; sin embargo el movimiento en la dirección vertical no es restringido.

- En la superficie inferior de ambos bloques todos los nodos son fijados con respecto al desplazamiento vertical para eliminar el movimiento de cuerpo rígido.
- Para la tubería se considera el modelo de alta deformación de Von Mises con endurecimiento isotrópico, el cual es calibrado a través de una apropiada curva uniaxial de esfuerzo-deformación proveniente de la prueba de tensión.
- El comportamiento mecánico del suelo es descrito a través del modelo elástico perfectamente plástico de Mohr- Coulomb, caracterizado a través de la cohesión c , el ángulo de fricción ϕ , el módulo de elasticidad de Young E y la razón de Poisson ν . El ángulo de dilatación ψ es asumido como cero.
- La interface entre la superficie exterior de la tubería y el suelo circundante es simulado con un algoritmo de contacto, el cual permite la separación de la tubería y el suelo circundante, considerando fricción para la interface a través de un coeficiente apropiado μ , para efectos de este documento se asume un $\mu = 0.3$ [21].

Con base en lo anterior la simbología y ecuaciones propias del problema se presentan en las tablas 11 y 12.

Tabla 11. Sistema de ecuaciones mecánica de sólidos.

Componente	Ecuación	Descripción
Material elástico Lineal	$0 = \nabla \cdot (FS) + Fv$	
	$F = I + \nabla u$	(F) Tensor de gradiente de deformación
	$S = S_0 + C: (\epsilon - \epsilon_0 - \epsilon_{inel})$	Ley de Hooke, relaciona el tensor de esfuerzo con el tensor de deformación
	$\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T + (\nabla u)^T \nabla u)$	(ϵ) Tensor de deformación total de ingeniería, escrito en términos del gradiente de desplazamiento

Tabla 11. (continuación)

Componente	Ecuación	Descripción
Restricciones de movimiento	$u = u_{0x}$ $v = u_{0y}$	Restricción en las superficies externas verticales del bloque fijo
	$w = u_{0x}$	Restricción en la superficie inferior del bloque fijo
	$u = u_{0x}$ $v = u_{0y}$	Restricción en las superficies externas verticales del bloque en movimiento
	$u = u_{0x}$ $v = u_{0y}$ $w = u_{0z}$	Restricción en la superficie inferior del bloque en movimiento
Fricción	$T_t \leq \min(\mu T_n + T_{cohe}, T_{t,max})$ $\mu = \mu_{stat}$	Ecuación de fricción entre las superficies externas de la tubería y el suelo
Gravedad	$a_f = -g$	Ecuación de aceleración debida a la gravedad

Tabla 12. Lista de simbolos mecánica de sólidos

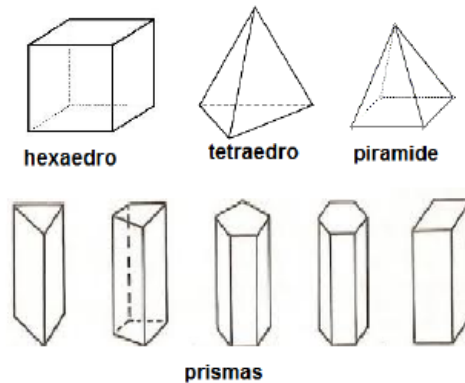
Notación	Descripción
F_v	Fuerza de volumen
I	Matriz de identidad
S_0	Esfuerzos inicial
C	Tensor elasticidad 4º orden
:	Producto de tensor de doble punto
ϵ_0	Deformaciones iniciales
u	Desplazamiento global en la dirección x
v	Desplazamiento global en la dirección y
w	Desplazamiento global en la dirección z
T_t	Fuerza tangencial
T_n	Presión de contacto
T_{cohe}	Resistencia al deslizamiento
μ_{stat}	Coficiente de fricción estático

5.5.4 Discretización

El análisis mediante el método de elementos finitos utiliza una serie de puntos generados a partir de la discretización, es decir, la operación denominada generación de mallado. El tipo de malla y los elementos que la conforman dependen del tipo de malla, según el tipo de estudio que se realiza.

Las mallas pueden ser de dos tipos, estructuradas constituidas en cuadriláteros en 2D o hexaedros en 3D, y las no estructuradas que emplean elementos triangulares en 2D o tetraédricos, prismas y pirámides en 3D (figura 19).

Figura 19. Tipos de mallas

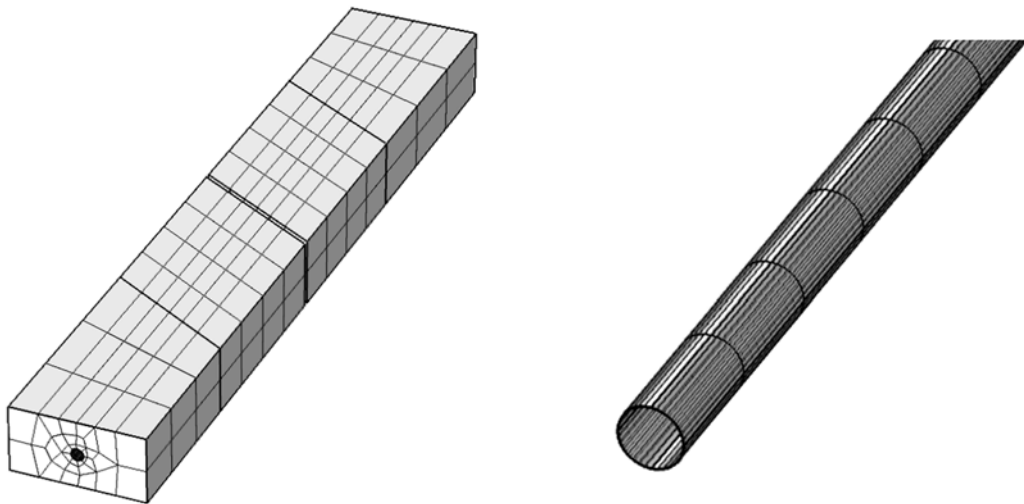


La cantidad de malla está asociada a la densidad de los nodos, suavidad, esquinamiento etc., y es de gran importancia para la exactitud y estabilidad del modelo.

Para el modelo desarrollado en el presente trabajo el tipo de malla utilizado fueron hexaedros, barridos a lo largo de la geometría para la tubería y el suelo, debido a que los análisis que se desarrollaron requieren que el modelo no sea desarrollado

en elementos de alta rigidez, como lo son las pirámides, los tetraedros y prismas, los cuales no ofrecen una respuesta adecuada durante análisis de tipo estructural. La parte central de la tubería, donde los esfuerzos máximos y las deformaciones son esperadas, tiene una malla fina elementos tipo solid y para las partes más alejadas del centro se usó una malla del mismo tipo más gruesa, para reducir los costos computacionales como se observa en la figura 20. En promedio la malla fue compuesta por 1500 elementos hexaédricos barridos por toda la geometría tanto de la tubería como del suelo.

Figura 20. Mallado del modelo



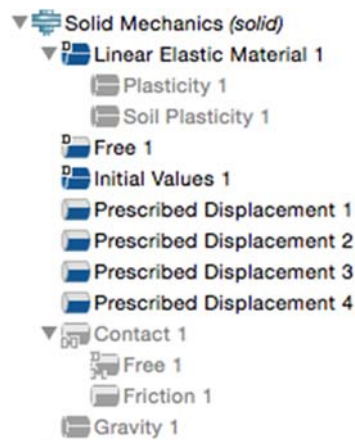
5.6 SIMULACIÓN MULTIFISICA

Una vez establecidos los parámetros necesarios para el desarrollo de la simulación se procede con el estudio del problema físico real, esto se lleva a cabo

mediante los siguientes pasos, los cuales son necesarios para que el programa pueda trabajar optimamente cuando se utilizan pares de contacto y fricción:

- Se procede a simular el estudio solo con los parámetros por defecto del software y las restricciones de movimiento anteriormente mencionadas como se observa en la figura 21.
- Luego se procede a simular una vez más habilitando los parámetros de plasticidad de la tubería y el suelo así como los pares de contacto entre las superficies como se muestra en la figura 22.

Figura 21. Parámetros primera simulación



- Una vez realizados los pasos anteriores se simulan nuevamente habilitando la carga por gravedad y la fricción, cada una de estas a la vez. Al momento de simular los parámetros de fricción esta se debe llevar a cabo con un barrido auxiliar como se observa en la figura 23.

Figura 22. Parámetros segunda simulación

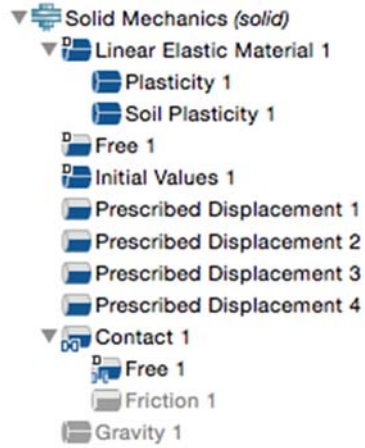
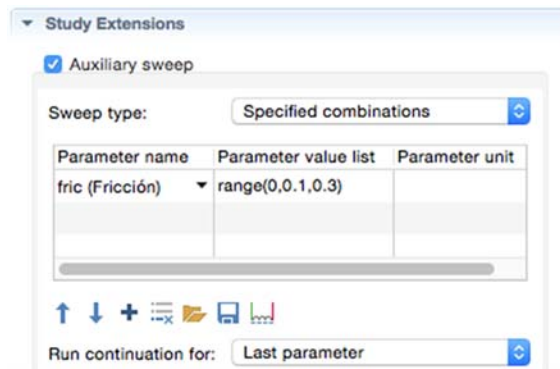
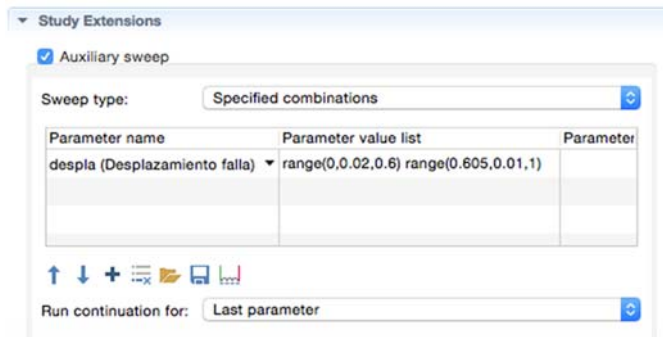


Figura 23. Parámetros tercera simulación



- El paso final para la simulación es introducir el desplazamiento mediante un barrido auxiliar y de esta manera poder variar la distancia que se desplaza la falla, como se muestra en la figura 24.

Figura 24. Introducción del desplazamiento de falla.



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

Los resultados de las simulaciones computacionales para las diferentes configuraciones geométricas y cargas de servicio, de diferentes líneas de transporte de hidrocarburos se detallan a continuación:

6.1 TUBERÍA X65 SIN PRESURIZAR , SOMETIDA A DIFERENTES ÁNGULOS DE FALLA

Como se observó en la ecuación (8) la elongación geométrica requerida ΔL_{req} depende directamente del ángulo de la falla, lo que afecta el desarrollo de las deformaciones en la tubería; en la figura 25 se observa que cuando el ángulo de falla aumenta las deformaciones en la tubería también lo hacen para un mismo punto de desplazamiento, además se pudo notar que antes de que la falla alcance los 0.15 [m] de desplazamiento el ángulo de falla no altera el desarrollo de las deformaciones, pero por encima de los 0.15 [m] de desplazamiento la diferencia entre el porcentaje de deformación de la tubería para cada ángulo de falla se hace más notable.

La figura 26 se muestra el comportamiento del esfuerzo máximo como función del desplazamiento de la falla para diferentes ángulos de falla, como se pudo observar a medida que el ángulo que la falla aumenta la tubería alcanza más rápidamente el punto de deformación plástica, una vez alcanzado el punto de deformación plástica la tubería sufre una elevada deformación como se pudo notar al comparar las figuras 25 y 26, donde al alcanzar valores superiores a 0.15 [m] la tubería se deforma rápidamente.

Figura 25. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes ángulos de falla, tubería X65

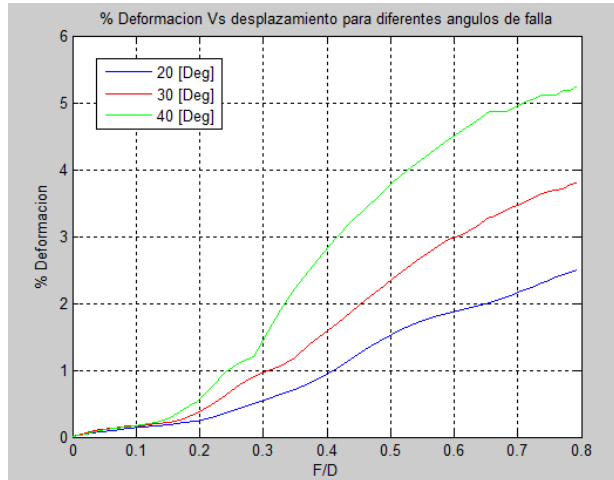
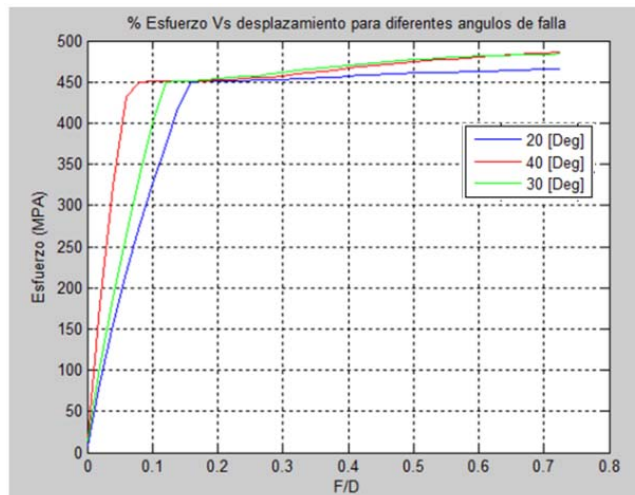
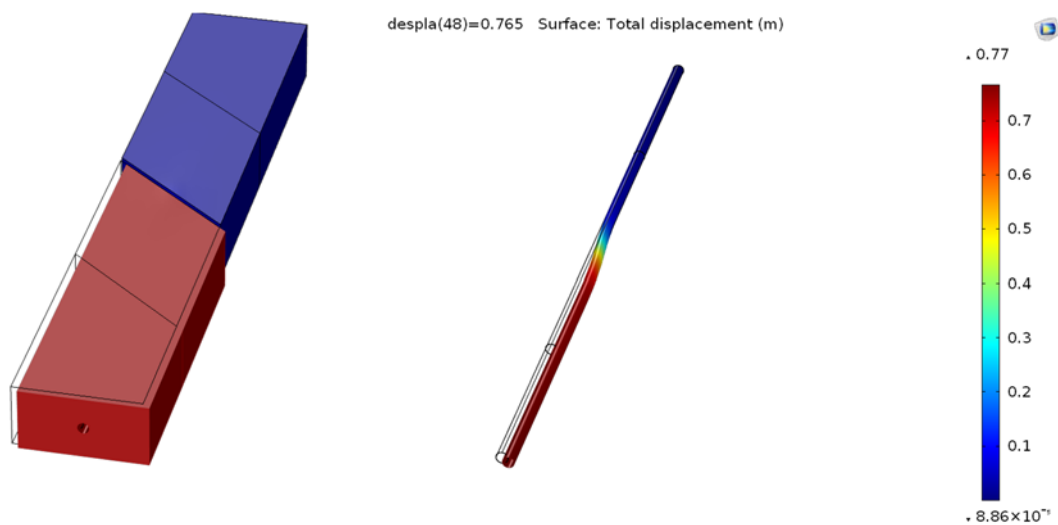


Figura 26. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes ángulos de falla, tubería X65.



En la figura 27 se observa el comportamiento que tiene la tubería al aplicar un desplazamiento prescrito de 0.765 [m] sobre el bloque en movimiento, el ángulo de falla para este caso fue de 40°.

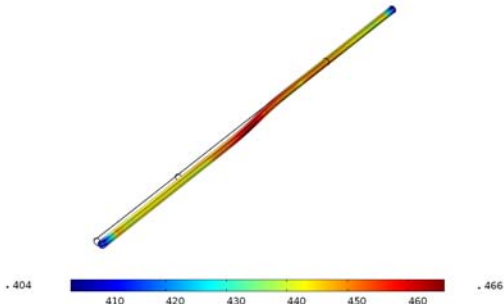
Figura 27. Desplazamiento de la falla para un angulo de 40 grados



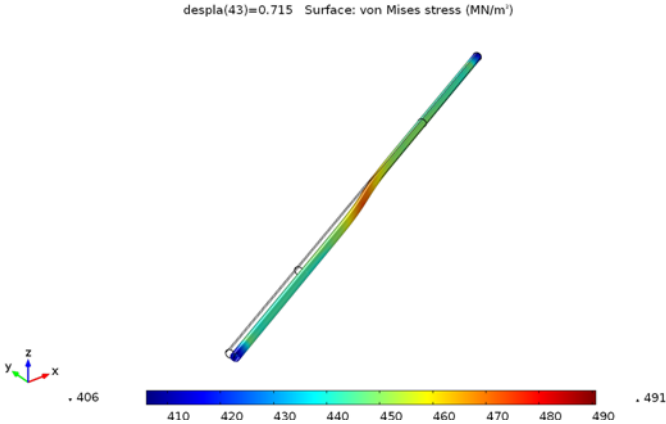
De igual manera en la figura 28, se puede visualizar el desarrollo de los esfuerzos a diferentes ángulos de falla y un desplazamiento de 0.715 [m], en esta figura se pudo observar que entre menor sea el ángulo de la falla los esfuerzos en la tubería tienden a extenderse desde el punto de falla hacia los extremos, mientras que cuando el ángulo aumenta los esfuerzos tienden a concentrarse solo en el punto de falla .

Figura 28. Variación de esfuerzos de Von Mises (MPa) para diferentes ángulos de a) 20 b) 30 y c) 40 grados respectivamente.

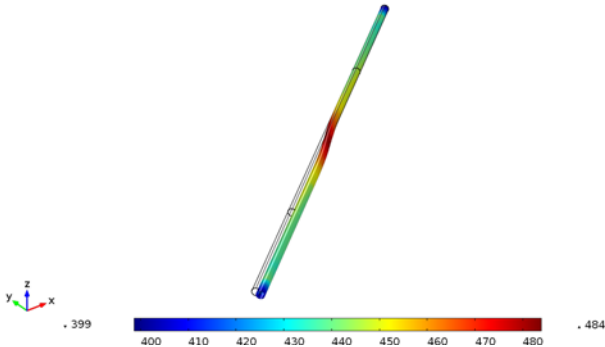
a.



b.



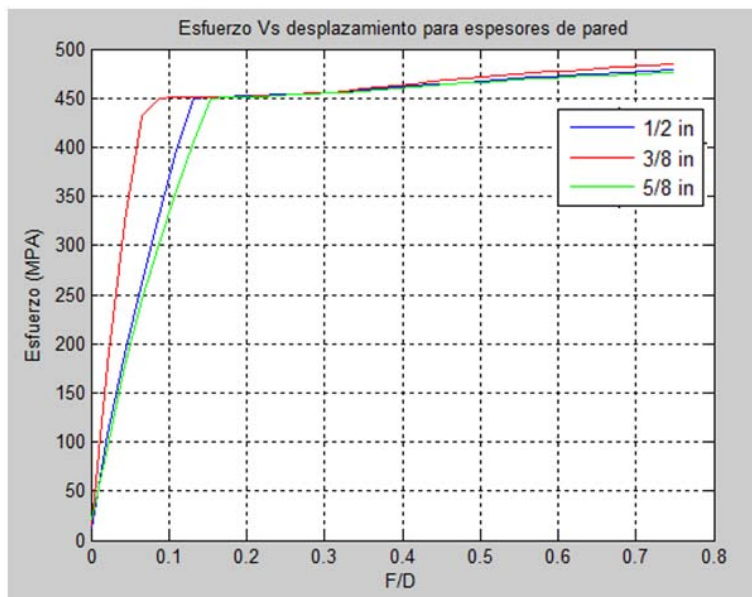
c.



6.2 TUBERÍA X65 SIN PRESURIZAR , CON DIFERENTES ESPESORES DE PARED

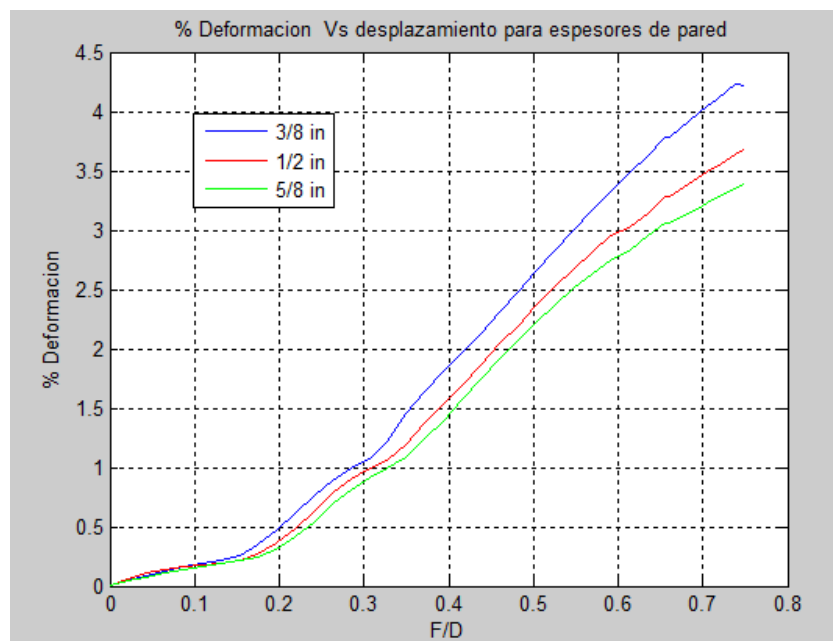
El desarrollo del esfuerzo máximo en la tubería tiene una variación directamente proporcional con el espesor de pared de la tubería, como se puede observar en la figura 29, a medida que el espesor de pared se reduce el esfuerzo máximo aumenta alcanzando el punto de deformación plástica más rápidamente cuando la falla se desplaza.

Figura 29. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes espesores de pared, tubería X65



En la figura 30, se puede observar que el espesor de la tubería también tiene un efecto significativo en el desarrollo de las deformaciones en la tubería, puesto que a medida que la falla se desplaza y el espesor disminuye la tubería se deforma más rápidamente.

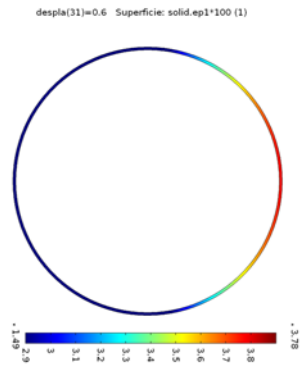
Figura 30. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes espesores de pared, tubería X65.



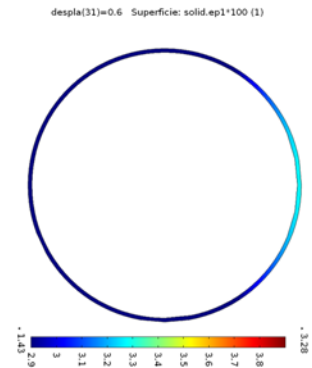
En la figura 31 se puede detallar la distribución de las deformaciones para diferentes espesores de pared en la sección transversal del punto de máxima deformación de la tubería, analizando la sección transversal se puede observar que la distribución de deformaciones en la pared de la tubería es mucho mayor a medida que el espesor se reduce.

Figura 31. Variación de deformaciones en el punto máximo para diferentes espesores de pared a) 3/8 in b) 1/2 in c) 5/8 in.

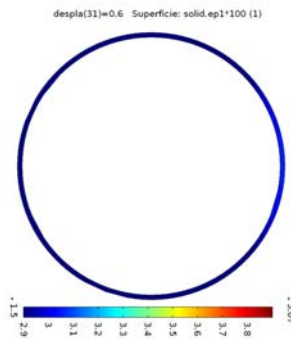
a)



b)



c)



6.3 TUBERÍA X65 SIN PRESURIZAR , DIFERENTES DIÁMETROS

El diámetro de la tubería es uno de los elementos más críticos al momento de evaluar la deformación en la línea, como se puede observar en la figura 32 el porcentaje de deformación para una tubería aumenta drásticamente al aumentar el

diámetro. Mientras que el desarrollo del esfuerzo máximo no tiene un cambio significativo con la variación del diámetro como se puede observar en la figura 33, en donde las curvas de esfuerzo para dos diferentes diámetros, tienen comportamientos similares.

Figura 32. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes diámetros de tubería X65.

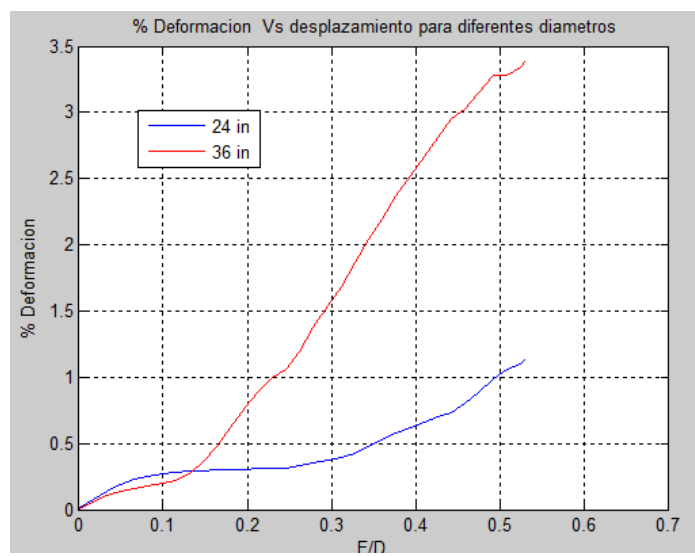
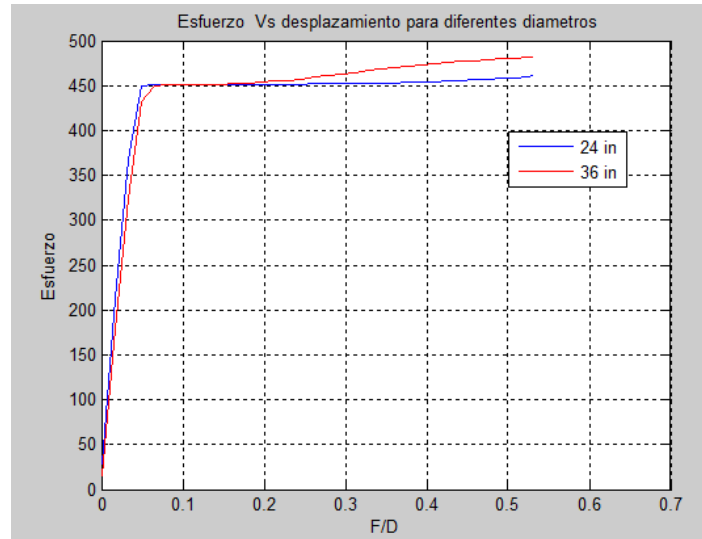


Figura 33. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes diámetros de tubería X65.



En la figura 34 se puede observar el desarrollo de la deformación máxima a medida que se desplaza la falla, para dos diferentes diámetros.

Figura 34. Desarrollo de deformación máxima para diferentes diámetros de tubería
a) 24 [in] b) 36 [in]

a)

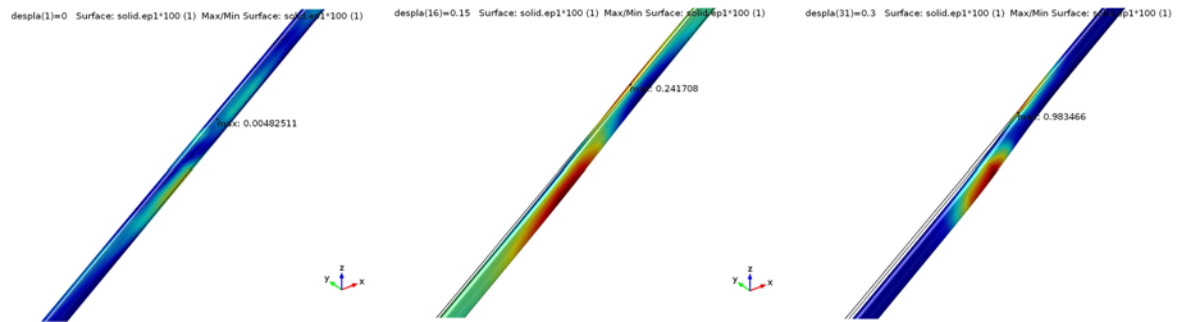
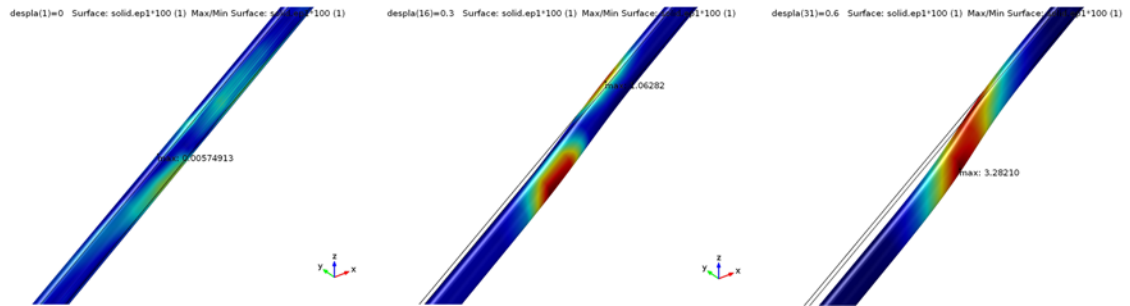


Figura 34. (continuación)

b)



6.4 TUBERÍA X65 PRESURIZADA SOMETIDA A DIFERENTES CARGAS DE SERVICIO.

Las cargas de servicio afectan directamente el nivel de esfuerzo de la tubería, como se puede observar en la figura 35, según la magnitud de la carga de servicio la tubería lleva más rápido al punto de fluencia, cuando la tubería pasa del límite elástico y entra en comportamiento plástico, el comportamiento del esfuerzo no cambia con la carga de servicio.

Figura 35. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes cargas de servicio, tubería X65

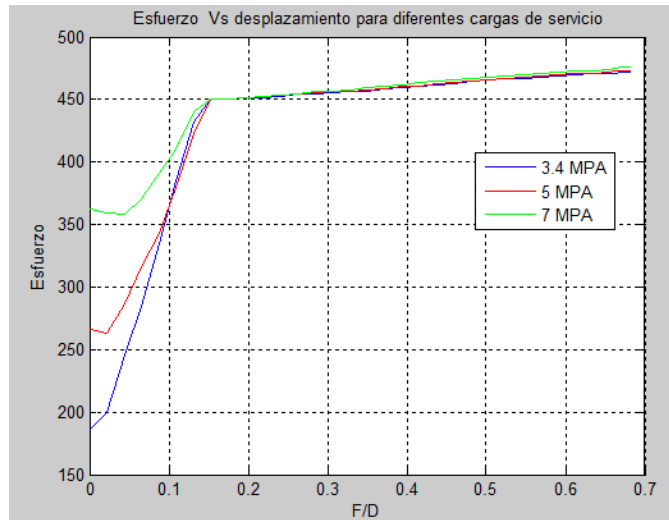
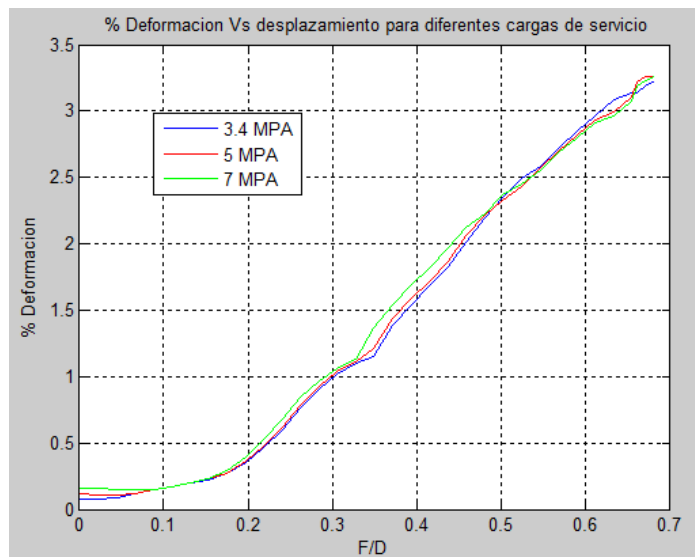


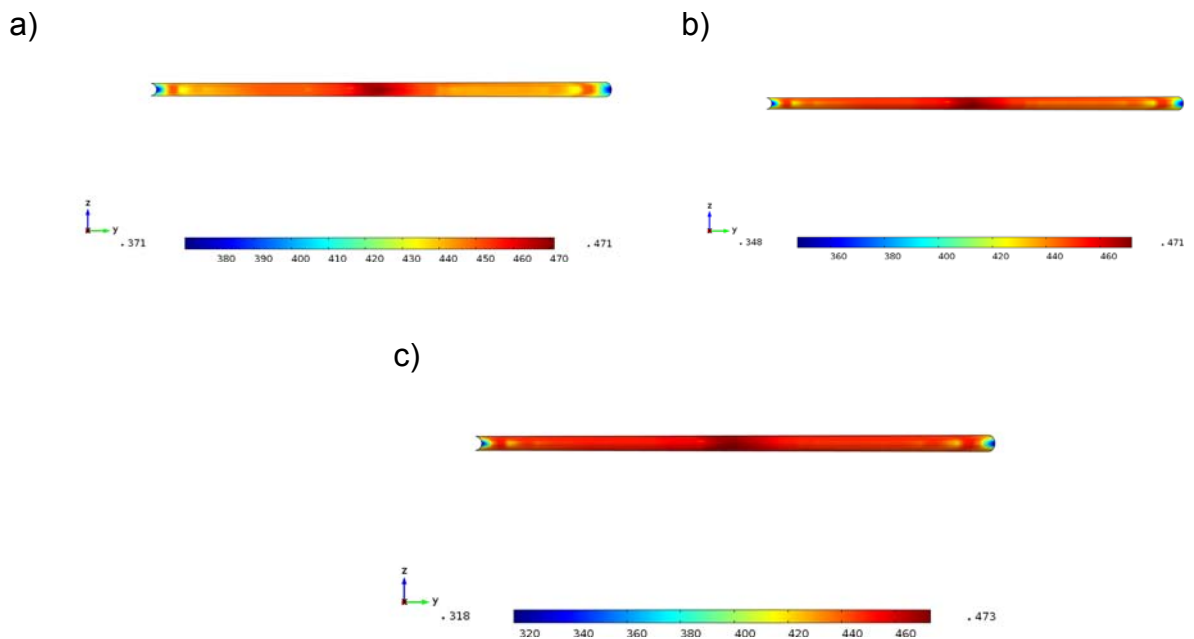
Figura 36. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes cargas de servicio tubería X65



La deformación de la tubería se ve poco alterada cuando aumenta o disminuye la carga de servicio, como se puede observar en la figura 36, donde observa que el porcentaje de deformación de la tubería tiene una variación mínima a medida que la falla se desplaza.

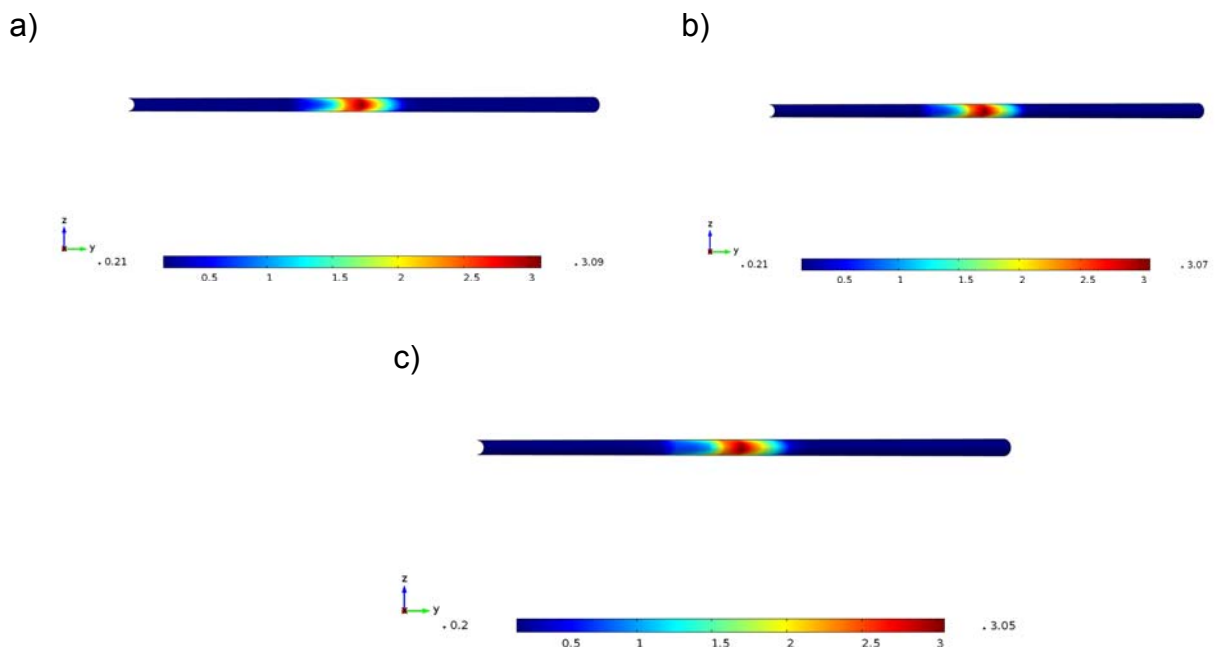
En la figura 37 podemos observar el desarrollo de los esfuerzos en la superficie interior de la tubería para diferentes cargas de servicio, y para un desplazamiento de falla de 0.6 m, como se puede ver el esfuerzo máximo se encuentra en la parte central del desplazamiento.

Figura 37. Esfuerzos en la superficie interna de la tubería a diferentes presiones a) 3.4 MPa b) 5 MPa c) 7 MPa, para un desplazamiento de falla de 0.6 m.



En la figura 38 podemos observar el desarrollo de las deformaciones para diferentes cargas de servicio, para un desplazamiento de falla de 0.6 m , como se puede ver la deformación máxima se desarrolla en el punto central de la falla, para las diferentes cargas de servicio.

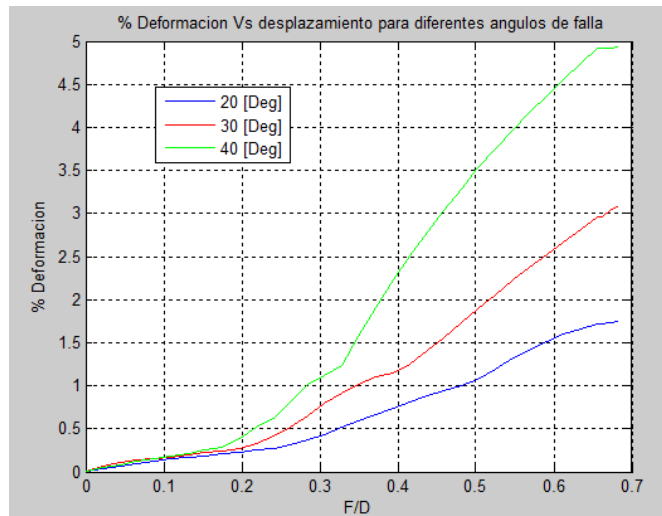
Figura 38. Deformaciones en la superficie interna de la tubería a diferentes presiones a) 3.4 [MPa] b) 5 [MPa] c) 7 [MPa], para un desplazamiento de falla de 0.6 [m].



6.5 TUBERÍA X80 SIN PRESURIZAR , SOMETIDA A DIFERENTES ÁNGULOS DE FALLA

Al igual que para la tubería fabricada en X65, el comportamiento de las deformaciones con respecto al ángulo de la falla permanece invariante, puesto que a medida que el ángulo de falla aumenta el porcentaje de deformación de la tubería también aumenta cuando la falla se desplaza como se puede observar en la figura 39.

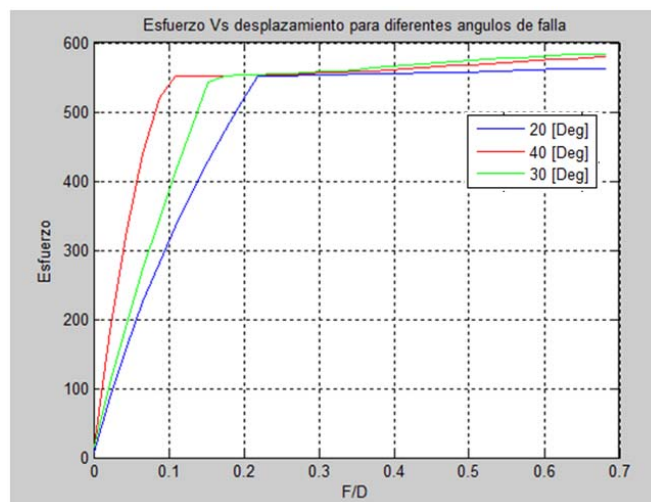
Figura 39. Porcentaje deformación máximo Vs desplazamiento para ángulos de falla tubería X80



La figura 40 muestra el comportamiento del esfuerzo máximo como función del desplazamiento de la falla para diferentes ángulos de falla, como se pudo observar a medida que el ángulo de la falla aumenta la tubería alcanza más rápidamente el

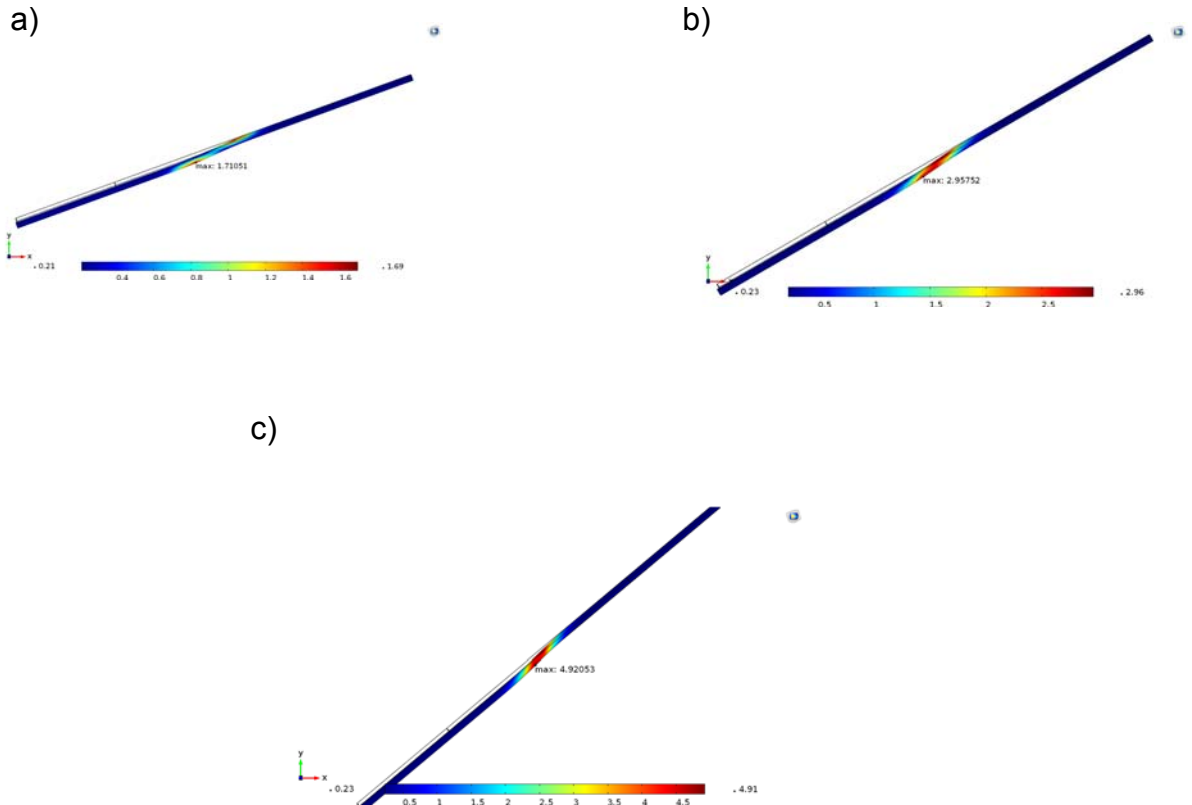
punto de deformación plástica, una vez alcanzado el punto de deformación plástica la tubería sufre una elevada deformación como se pudo notar al comparar las figuras 39 y 40, donde al alcanzar valores superiores a 0.15 [m] la tubería se deforma rápidamente.

Figura 40. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes ángulos de falla X80



En la figura 41, se puede detallar el desarrollo de las deformaciones a lo largo de la tubería, entre más bajo es el ángulo de la falla las deformaciones en la zona central de la tubería se encuentran menos concentradas que cuando se aumenta el ángulo de la falla.

Figura 41. Deformaciones para diferentes ángulos de falla a) 20 grados b) 30 c) 40, con un desplazamiento de falla de 0.6 m.

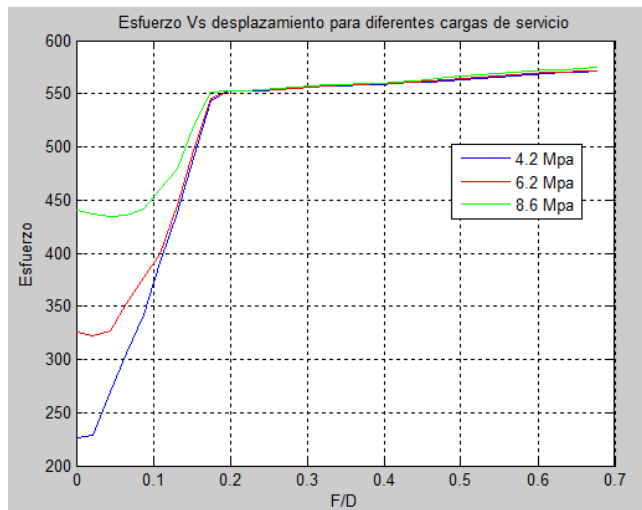


6.6 TUBERÍA X80 PRESURIZADA SOMETIDA A DIFERENTES CARGAS DE SERVICIO.

Las cargas de servicio afectan directamente el nivel de esfuerzo de la tubería, al igual que en la tubería fabricada en x65, como se puede observar en la figura 42, según la magnitud de la carga de servicio la tubería lleva más rápido al punto de

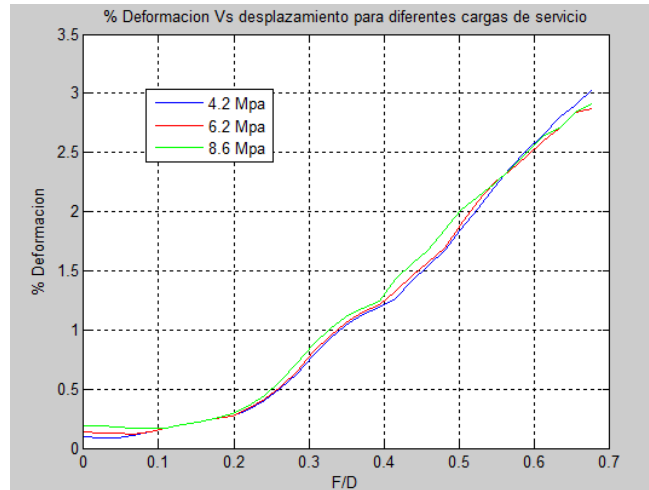
fluencia, cuando la tubería pasa del límite elástico, el comportamiento del esfuerzo no cambia con la carga de servicio.

Figura 42. Esfuerzo máximo Vs desplazamiento para diferentes cargas de servicio, tubería X80



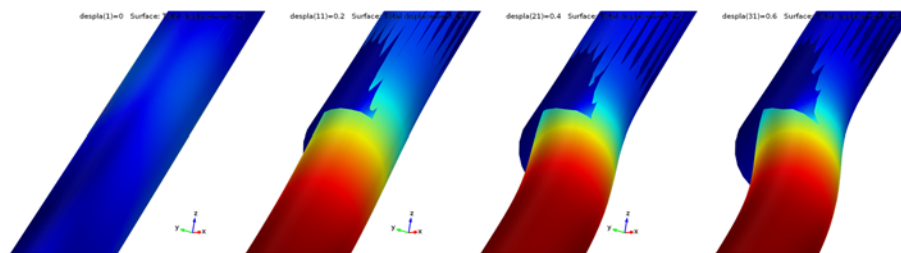
La deformación de la tubería no tiene ningún cambio con la carga de servicio, su comportamiento es igual para las diferentes cargas de servicio como se puede observar en la figura 43, donde se puede notar que el porcentaje de deformación es igual en la tubería a medida que se desplaza la falla.

Figura 43. Porcentaje de deformación máximo Vs desplazamiento para diferentes cargas de servicio tubería X80



En la figura 44 se puede observar el desarrollo del gap para una tubería a medida que se desplaza la falla, como se puede observar a medida que la falla se desplaza la tubería también lo hace lo que provoca que la tubería deje el espacio donde se encontraba anteriormente.

Figura 44. Desarrollo del gap para una presión de 8.6 Mpa



7. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo de los elementos finitos, se realizó mediante el modelo de análisis numérico desarrollado por Trifonov y Cherniy [17][18], quienes desarrollaron un algoritmo para el análisis numérico de tuberías a través de fallas activas que se aproxima en buena medida al comportamiento real de la tubería, tal y como se presentó en el estado del arte del presente documento.

Mediante este modelo numérico se desarrolló una simulación numérica del modelo, asimismo se realizó la comprobación de los resultados obtenidos a través del modelado mediante elementos finitos y el software COMSOL Multiphysics®.

Para el desarrollo de la simulación para la validación se asume una tubería de diámetro de $D=0.9144$ m (36 in) y un espesor de pared de $t=0.0119$ m (0.469 in). La tubería es de acero X65 PSL 1 es caracterizada en la curva de esfuerzo y deformación con las siguientes características; esfuerzo de fluencia $\sigma_y = 448$ MPa, módulo elástico de Young $E = 210$ GPa, módulo de endurecimiento $E_2 = 1.088$ GPa. La interacción suelo - tubería está determinada por las propiedades establecidas en el anexo B de la norma ALA –ASCE [9], además de los factores establecidos en el anexo C de la norma CSA - Z662-07 [6] (Oil and gas pipeline systems), como se muestra en la Tabla 13. La tubería se encuentra enterrada 1,3 m a partir de la superficie, además se le aplicó una carga de servicio de 3.67 Mpa y un ángulo de falla de 30°.

Tabla 13. Propiedades mecánicas suelo.

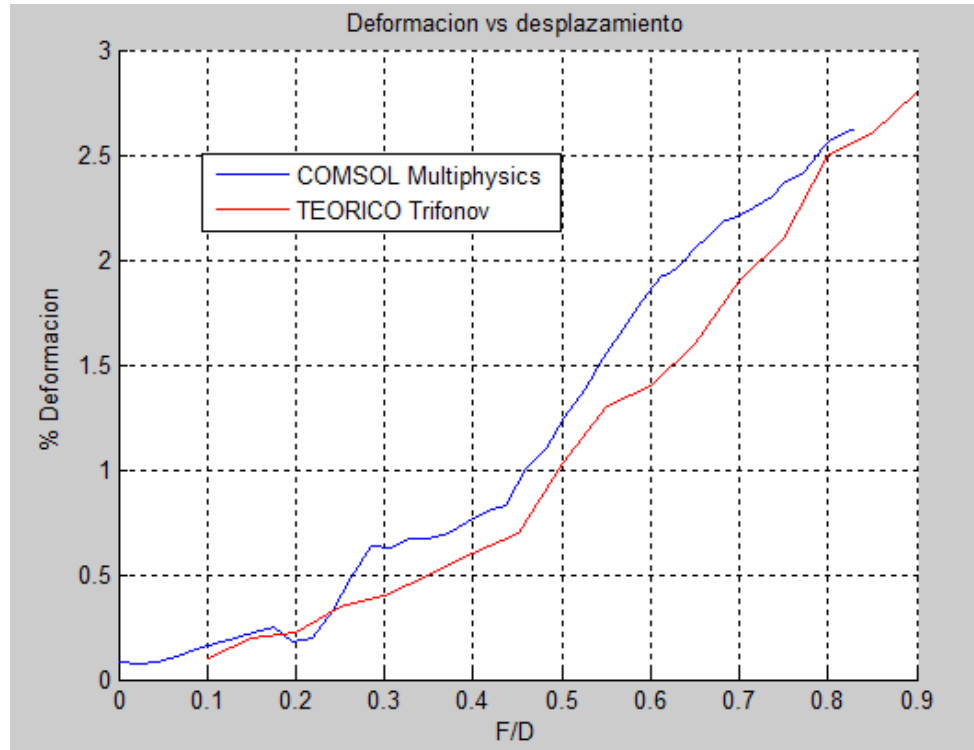
Material	Propiedad	Valor
Suelo	Módulo de Young	25 [MPa]
	Razón de Poisson	0,5
	Densidad	1400 [kg/m ³]
	Cohesión	50 [kPa]
	Ángulo fricción interna	0 [deg]
	Ángulo de dilatación	0 [deg]

En la tabla 14 y figura 45 se observan los valores de deformación en diferentes puntos de desplazamiento de la falla, asimismo podemos apreciar la diferencia entre los valores y el porcentaje de error de cada una de las diferentes medidas en la figura 45.

Tabla 14. Comparación de los valores teóricos y simulados

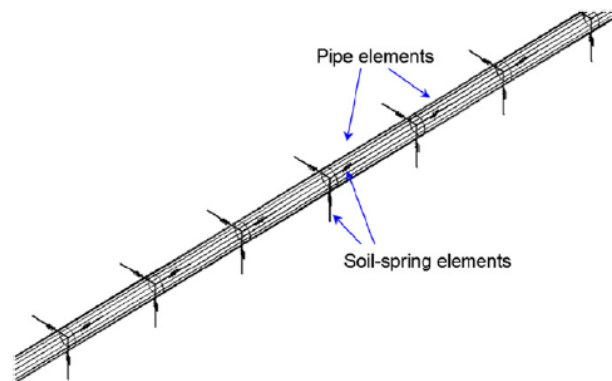
Desplazamiento de la falla [m]	Deformación datos teóricos	Deformación simulación COMSOL	Diferencia	% Error
0,15	0,2012	0,2217	0,0205	10,18887
0,25	0,3548	0,3285	0,0263	7,412627
0,35	0,5214	0,7125	0,1911	36,65132
0,45	0,7254	1,0840	0,3586	49,43479
0,55	1,3254	1,5336	0,2082	15,70847
0,65	1,7541	2,0529	0,2988	17,03438
Error Promedio				22,73841

Figura 45. Comparación de los valores de porcentaje de deformación teóricos y simulados



Analizando los resultados se encuentra que el error cambia para cada uno de los puntos analizados, el promedio de este error se encuentra alrededor del 22 %, esto se debe a la diferencia entre las condiciones físicas de los suelos, ya que en el modelo teórico de Trifonov y Cherniy [17][18], el suelo es analizado como una serie de resortes alrededor de la tubería como se muestra en la figura 46, motivo por el cual la deformación de la tubería es mucho menor debido a la baja rigidez de los resortes. En cambio en la simulación en el software COMSOL Multiphysics el suelo fue tomado como un elemento sólido, motivo por el cual el porcentaje de deformación es más alto debido a la alta rigidez de este tipo de elemento.

Figura 46. Diagrama del modelo de análisis desarrollado por Trifonov y Cherniy



Fuente: [TrifonovOV, CherniyVP]

En la tabla 15 se observa los valores de esfuerzo en diferentes puntos de desplazamiento de la falla, asimismo podemos apreciar la diferencia entre los valores y el porcentaje de error de cada una de las diferentes medidas.

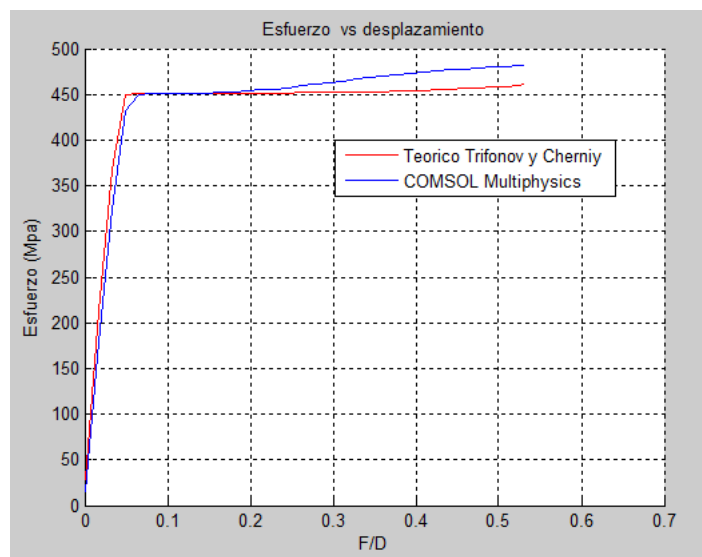
Tabla 15. Comparación de los valores de esfuerzo teóricos y simulados

Desplazamiento de la falla [m]	Esfuerzo datos teóricos	Esfuerzo simulacion COMSOL	Diferencia	% Error
0,15	451,1853573	451,2790608	0,093703522	0,0207683
0,25	451,608897	457,4673298	5,858432799	1,29723591
0,35	452,7176489	468,3912776	15,67362868	3,46212009
0,45	456,2669337	477,9322851	21,66535137	4,74839393
0,55	460,971394	481,6338876	20,66249361	4,48238088
Error Promedio				2,80217982

Analizando los resultados se encuentra que el error cambia para cada uno de los puntos analizados, el promedio de este error se encuentra alrededor del 2.8%, el cual nos muestra la buena aproximación entre el modelo teórico de Trifonov y Cherniy [17],[18] y el modelo simulado mediante COMSOL Multiphysics®.

Como se pudo observar en la figura 47, la respuesta del modelo de análisis por el método de los elementos finitos se ajusta en buena medida a la respuesta del modelo analítico de análisis estructural desarrollado por Trifonov y Cherniy [17],[18], ambos modelos se comportan igual en la zona elástica como se puede observar en la figura 47 solo hay una diferencia en los resultados en el comportamiento plástico debido a que el modelo teórico se basa en ecuaciones lineales, mientras que el software utiliza sistemas de ecuaciones no lineales durante el comportamiento plástico.

Figura 47. Comparación de los valores de esfuerzo teóricos y simulados



De acuerdo a esto se valida la respuesta obtenida a través del modelado mediante elementos finitos y el software COMSOL Multiphysics®, permitiendo así el análisis de casos más complejos y diferentes configuraciones geométricas de la tubería.

8. CONCLUSIONES

- Se realizó una validación del modelo simulado a partir de los datos del modelo teórico de Trifonov y Cherniy [17][18], obteniendo un porcentaje de error de 22.7 % debido a las diferencia entre las condiciones del suelo del modelo teórico y el modelo simulado en COMSOL Multiphysics ®.
- Se realizó un modelo de tubería enterrada atravesando una falla transversal de tipo strike-slip, utilizando el programa de simulación COMSOL Multiphysics ® con el fin de poder realizar variaciones en el modelo para analizar el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones a lo largo de la tubería.
- Mediante la comparación del modelo teórico de Trifonov y Cherniy [13][14],y las simulaciones en el software COMSOL Multiphysics ®, se encontró que las propiedades mecánicas del suelo juegan un papel importante en la deformación de la tubería , pero el nivel de esfuerzo no presenta grandes variaciones como se pudo analizar mediante la comparación de los valores de esfuerzo para diferentes puntos de desplazamiento.
- Durante el análisis de datos se mostró que al ser un modelo no lineal, el incremento de la deformación y el incremento de los esfuerzos en la tubería, son eventos que se desarrollan independientemente. Además se encontró que las cargas de servicio no generan cambios en el comportamiento mecánico de la tubería durante el desarrollo de la falla geotécnica.

- Durante el análisis de datos se evidenció que uno de los factores críticos es el diámetro de la tubería, las tuberías con diámetros considerables se deforman rápidamente durante el desarrollo de la falla geotécnica, motivo por el cual alcanzan los límites del falla del 3% de deformación con pequeños desplazamientos de la falla.
- Se mostró que el ángulo de falla es un factor crítico durante el desarrollo de la falla geotécnica, a medida que el ángulo de la falla aumenta, la deformación de la tubería también aumenta llegando a la condición crítica más rápidamente. Asimismo, el espesor de la pared juega un papel importante sobre el desarrollo de las deformaciones en la tubería, a medida que el espesor de la pared aumenta la tubería tiende a deformarse más lentamente, por este motivo es recomendable que las tuberías de grandes diámetros sean de espesores considerables para que el desarrollo de las deformaciones se haga más lentamente.
- Se observó durante el análisis de los recursos consumidos y el tiempo de computo de las simulaciones, que para poder describir la formación de arrugas en la tubería, es necesario incrementar el número de elementos de malla cerca de la zona de falla, teniendo como consecuencia el aumento en tiempo y recursos de computación, para lo cual sería necesario un equipo de mayor capacidad de procesamiento

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABDOUN, TH, et al. Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting. En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2009; 29:415–27.

- [2] AMERICAN LIFELINES ALLIANCE — ASCE. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, July 2001 (with addenda through February 2005).

- [3] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for line pipe, 44th ed. ANSI/API Spec 5L, 2007.

- [4] ARIMAN, T y MULESKI, G. A review of the response of buried pipelines under seismic excitations. En: Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1981; 9:133–51.

- [5] ASCE TECHNICAL COUNCIL ON LIFELINE EARTHQUAKE ENGINEERING. Differential Ground Movement Effects on Buried Pipelines. En: Guidelines Seismic Des Oil Gas Pipeline Syst 1984:150–228.

- [6] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. Z662-07 Oil and gas pipeline systems. 2007. 808 p.

- [7] EERI. The Izmit (Kocaeli), Turkey Earthquake of August 17, 1999. En: EERI Special Earthquake Report, 1999.
- [8] EGIG. 7th Report of the European gas pipeline incident data group; 2007.
- [9] Ha D, et al. Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strike-slip faulting a centrifuge investigation. En: Canadian Geotechnical Journal 2008; 45:1733–42.
- [10] KARAMITROS, DK; BOUCKOVALAS, GD y KOURETZIS, GP. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings. En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2007; 27:200–11.
- [11] KENNEDY, RP; CHOW, AW y WILLIAMSON, RA. Fault movement effects on buried oil pipeline. En: Transport Eng J ASCE 1977; 103:617–33.
- [12] LIANG, J y SUN, S. Site effects on seismic behavior of pipelines: a review. En: ASME Journal of Pressure Vessel Technology 2000; 122 (4):469–75.
- [13] MOHAREB, ME, et al. Deformational behavior of line pipe. En: Structural engineering report no. 202, Univ. of Alberta ,Edmonton, Alberta, Canada, 1994.

- [14] MOHITPOUR, M; GOLSHAN, H Y MURRAY, A. Pipeline design and construction: a practical approach. Ed. 3. New York: ASME Press ;2007.
- [15] NEWMARK, NM y HALL, WJ. Pipeline design to resist large fault displacement. En: Proceedings of the US National Conference on Earthquake Engineering. Ann Arbor: University of Michigan; 1975. p. 416–25.
- [16] PHMSA – PIPELINE SAFETY COMMUNITY. Pipeline incidents and mileage reports. <<http://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports/safety/PSI.html>> [accessed on 2010].
- [17] TRIFONOV, OV y CHERNIY, VP. A semi-analytical approach to a nonlinear stress–strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults. En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2010; 30:1298–308.
- [18] TRIFONOV, OV y CHERNIY, VP. Elastoplastic stress–strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads . En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2012; 33:54–62.
- [19] UZARSKI, J y ARNOLD, C. Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of September 21, 1999, Reconnaissance Report. En: Earthquake Spectra, Professional J EERI 2001; 17(Suppl. A).

- [20] VAZOURAS, P; KARAMANOS, SA Y DAKOULAS, P. Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements. En: Soil Dynamics and Earth-quake Engineering 2010; 30:1361–76.
- [21] VAZOURAS, P; KARAMANOS, SA Y DAKOULAS, P. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults. En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 41, October 2012, p. 164-180.
- [22] WANG, LRL y YEH, Y. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement. En: Earthquake Eng Struct Dyn 1985; 13:75–96.