

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



**ANÁLISIS DE DEFLEXIONES Y ESFUERZOS EN TUBERÍAS DE
ACERO DE PARED DELGADA ENTERRADAS BAJO VÍAS DE
ACARREO DE CAMIONES MINEROS POR EL MÉTODO DE LOS
ELEMENTOS FINITOS**

Tesis para obtener el grado académico de Magíster en Ingeniería
Mecánica que presenta:

Nicher Saúl Vilca Terrazas

Asesor:

Jorge Hernan Alencastre Miranda

Lima, 2023


Informe de Similitud

Yo, Jorge Hernán Alencastre Miranda, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada. **Análisis de deflexiones y esfuerzos en tuberías de acero de pared delgada enterradas bajo vías de acarreo de camiones mineros por el método de los elementos finitos**, del autor Nicher Saul Vilca Terrazas,dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 15.%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 28/03/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

San Miguel 12 de abril de 2023

Apellidos y nombres del asesor: Alencastre Miranda, Jorge Hernán	
DNI:10588073	Firma 
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8442-8255	

RESUMEN

El presente estudio analizó el comportamiento de las tuberías de acero de diámetros nominales desde 36" hasta 48" las cuales se encuentran enterradas en cruces de caminos mineros (*Haul Road*) sometidas a cargas superficiales de vehículos con carga bruta máxima de 625 toneladas (Peso bruto, incluye peso de material acarreado). Se desarrolló un análisis para determinar las variables más relevantes de una instalación que afectan los resultados de cálculo de esfuerzos y deflexiones por medio de un estudio paramétrico por el método de los elementos finitos.

En general las zanjas se componen de una tubería apoyada sobre una cama de arena fina o material similar, por un relleno lateral instalado por medio de capas delgadas compactadas y un relleno superior compactado sobre la tubería. Para el estudio de la investigación se propuso un modelo de elementos finitos que considera la no linealidad del material de suelo, la no linealidad del contacto entre la tubería y el suelo, la no linealidad de la geometría del suelo y las cargas laterales residuales debido a la compactación de distintas capas del suelo durante la etapa constructiva y para su validación se utilizaron datos experimentales desarrolladas en el centro de investigación de infraestructuras enterradas (CUIRE) de la Universidad de Texas Arlington (UTA).

El estudio demostró la importancia que tiene una adecuada selección de las propiedades de los materiales de suelos que componen una zanja, así como la importancia de considerar adecuadas condiciones de instalación de las tuberías a fin de obtener en lo posible menores costos de una instalación que permita tener esfuerzos en la tubería por debajo de los admisibles.

Los mejores resultados se mostraron durante la variación del ancho de la zanja y la elección de materiales de relleno lateral con mayor grado de elasticidad, sin embargo, existen otros factores que podrían llegar a incrementar las deflexiones en la tubería tales como la variación de la altura de cama de tubería o la altura del relleno superior. Adicionalmente, se verificó en dónde se ubica la mayor carga de esfuerzos en la tubería luego de la aplicación de las cargas muertas y cargas vivas. Así mismo, se determinó en qué nivel afecta la relación del diámetro y el espesor de la tubería y para cuál de estas relaciones será necesario tener un mayor cuidado durante el análisis.

El presente estudio paramétrico permitió comprender las afectaciones en los resultados de deflexión y esfuerzos de la tubería y cuyas conclusiones se pueden generalizar para instalaciones convencionales ya que dependen de las mismas variables.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	9
1. Antecedentes de métodos de cálculo de tuberías de acero enterradas	9
1.1. Introducción	9
1.2. Instalación típica en zanjas	9
1.3. Materiales de la zanja	10
1.4. Diseño de tuberías enterradas	12
1.4.1. Parámetros requeridos para el cálculo de tuberías enterradas	12
1.4.2. Carga muerta	12
1.4.3. Carga superficial	14
1.4.4. Deflexión de la tubería	17
1.4.5. Esfuerzo de flexión	22
1.4.6. Pandeo	23
CAPÍTULO 2	25
2. Características y comportamiento de las tuberías de acero y del terreno/relleno	25
2.1. Tuberías de acero	25
2.1.1. Comportamiento físico de las tuberías de acero	27
2.1.2. Modelo elástico lineal	29
2.2. Terreno - Relleno en zanjas	30
2.2.1. Comportamiento físico del suelo	30
2.2.2. Modelos de criterios de fluencia	34
CAPÍTULO 3	37
3. Bases de cálculo de tuberías enterradas por el método de los elementos finitos	37
3.1. Método de los elementos finitos (MEF)	37
3.1.1. Matriz de rigidez	37
3.1.2. Formulación de la no linealidad	38
3.1.3. No linealidad del material	38

3.1.4.	No linealidad geométrica	39
3.1.5.	No linealidad en el contacto	39
3.1.6.	Condiciones de carga y contorno	41
3.1.7.	Tipos de elementos y mallado	41
CAPÍTULO 4		43
4.	Validación de datos experimentales con el modelo de elementos finitos	43
4.1.	Análisis experimental	43
4.1.1.	Descripción general experimental	43
4.1.2.	Resultados de la prueba 1a	54
4.2.	Modelo de elementos finitos para la prueba 1a	62
4.2.1.	Geometría del modelo	63
4.2.2.	Condiciones de contorno y contacto	64
4.2.3.	Mallado y tipos de elementos	64
4.2.4.	Cargas verticales y horizontales	65
4.2.5.	Propiedades de los materiales	66
4.2.6.	Etapas constructivas	66
4.3.	Análisis de sensibilidad del modelo de elementos finitos	67
4.3.1.	Compactación	68
4.3.2.	Longitud de modelo	69
4.3.3.	Contacto	69
4.3.4.	Tamaño de la malla	70
4.4.	Resultados del modelo de elementos finitos	71
4.4.1.	Deflexiones	72
4.4.2.	Deformaciones	73
4.4.3.	Análisis de los resultados – Validación de datos experimentales con MEF	73
CAPÍTULO 5		74
5.	Análisis paramétrico del comportamiento tubería-terreno sometido a cargas superficiales de vehículos de carga pesada	74
5.1.	Generalidades para el análisis paramétrico	74
5.1.1.	Consideraciones generales	74
5.2.	Parametrización del modelo de elementos finitos	77
5.2.1.	Dimensiones de la zanja	77
5.2.2.	Propiedades de los materiales	78
5.2.3.	Diámetros de tuberías	78
5.2.4.	Material de tuberías	78

5.2.5. Altura de cama de tubería	79
5.2.6. Ancho y altura de zanja.....	79
5.2.7. Cargas superficiales.....	79
5.3. Estudio paramétrico	83
5.4. Resultados del estudio paramétrico	84
5.4.1. Análisis de resultados – Análisis paramétrico	85
5.4.2. Tendencias – Análisis paramétrico.....	90
CAPÍTULO 6.....	93
6. Conclusiones.....	93
7. Recomendaciones para futuras investigaciones	97
BIBLIOGRAFÍA	98
APÉNDICE A	101
Resultados de estudio paramétrico por el método de elementos finitos.....	101
APÉNDICE B	210
Resumen de deformaciones y esfuerzos en el tope de las tuberías de 36", 42" y 48"	210

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería. Fuente: ASTM Standard D2487-69, ASTM, Philadelphia, Pa. (1969).....	11
Tabla 1-2: Estándar de suelos para zanjas y mínimos requerimientos de compactación. Tabla 16.4B adaptada de (AASHTO, 2002).....	11
Tabla 1-3: Coeficientes de influencia para áreas rectangulares. Fuente (AWWA M11, 2005).....	15
Tabla 1-4: Valores de diseño de E' (psi). Fuente AASHTO adaptada de (AWWA M11, 2005).....	20
Tabla 1-5: Valores de diseño del módulo del suelo E_s , materiales granulares (MPa).....	21
Tabla 1-6: Valores de diseño del módulo del suelo E_s , materiales cohesivos (MPa).....	21
Tabla 2-1: Tabulation of Examples of Allowable Stresses for Reference Use in Piping Systems Table-403.2.1-1 (ASME B31.4, 2019).....	25
Tabla 2-2: Tabla resumen de espesores de pared según estándar, en pulgadas (ASME B36.10, 2004) para diámetros nominales de tuberías de acero hasta 48".....	27
Tabla 2-3: Propiedades constitutivas del acero. Fuente: (ASME B31.3, 2014).....	29
Tabla 4-1 Resumen de pruebas experimentales de referencia, adaptado de (SHARMA, 2013).....	43
Tabla 4-2 Especificaciones del material de cama de tubería - Grava, adaptado de (SHARMA, 2013).....	51
Tabla 4-3 Resumen de resultados de la prueba para la arcilla nativa B6. (Fuente: Equipo geotécnico UTA) , adaptado de (SHARMA, 2013).....	52
Tabla 4-4 Deflexiones de la tubería inmediatamente después de remover los soportes de la tubería, adaptado de (SHARMA, 2013).....	55
Tabla 4-5 Densidades de capas de suelo para la prueba 1a, adaptado de (SHARMA, 2013).....	56
Tabla 4-6 Deflexiones de la tubería para la prueba 1a, adaptado de (SHARMA, 2013).....	57
Tabla 4-7 Datos de presión de suelo de la prueba 1a, adaptado de (SHARMA, 2013).....	58
Tabla 4-8 Deformaciones en la sección sur en el interior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).....	59
Tabla 4-9 Deformaciones en la sección sur en el exterior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).....	59
Tabla 4-10 Deformaciones en la sección central en el interior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).....	60
Tabla 4-11 Deformaciones en la sección central en el exterior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).....	60
Tabla 4-12 Deformaciones en la sección norte en el interior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).....	61
Tabla 4-13 Deformaciones en la sección norte en el exterior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).....	61
Tabla 4-14 Propiedades del suelo.....	66
Tabla 4-15 Propiedades de la tubería.....	66
Tabla 5-1: Propiedades de materiales de zanja usadas en estudio paramétrico.....	78
Tabla 5-2: Tamaños de tuberías usadas en estudio paramétrico ⁽¹⁾	78
Tabla 5-3: Propiedades mecánicas de tubería usada en estudio paramétrico ⁽²⁾	78
Tabla 5-4: Propiedades mecánicas de tubería usada en estudio paramétrico.....	79
Tabla 5-5: Minimum bearing capacity and Young's modulus of haul road construction materials (Tannant & Regensburg, 2001).....	81
Tabla 5-6: Pesos de vehículos de carga pesada utilizados en minería.....	82
Tabla 5-7: Presiones superficiales de vehículos de carga pesada utilizados en minería.....	83
Tabla 5-8: Tendencia del incremento de los esfuerzos para una tubería de 36".....	90
Tabla 5-9: Tendencia del incremento de los esfuerzos para una tubería de 42".....	90
Tabla 5-10: Tendencia del incremento de los esfuerzos para una tubería de 48".....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura-a: Pipeline que retorna las aguas filtradas de la presa de relaves de una compañía minera hacia la misma presa por medio de un pipeline de 30" bombeado desde una estación "booster". La tubería cruza por varios accesos.	1
Figura-b: Imagen referencial de circulación de vehículo minero.	4
Figura-c: Pase de tubería de relaves de acero de 52" bajo tramo de aproximadamente 220 m del Haul Road.	4
Figura-d: Sección de instalación típica de tubería de acero enterrada bajo cruce de acceso de vehículos de carga pesada. .5	5
Figura 1-1: Instalación típica de tubería de acero enterrada.	10
Figura 1-2: Diagrama de aplicación de carga superficial sobre una tubería (Spangler, 1982). Fuente (AWWA M11, 2005). ..	15
Figura 1-3: Hipótesis de distribución de esfuerzos de Spangler (Spangler, 1948).	17
Figura 2-1: Diagrama Esfuerzo-Deformación (acero). Fuente: (AWWA M11, 2005).	28
Figura 2-2: Curva Esfuerzo-deformación-volumen de la Arena bajo un estudio triaxial a 138 kPa (Rao & Dutta, 2006).	31
Figura 2-3: Curva Esfuerzo-deformación-volumen de la arcilla marina de Mangalore bajo un estudio triaxial (ABRAHAM, 1993).	31
Figura 2-4: Esfuerzo cortante T como una función del esfuerzo normal σ , que muestra una serie de círculos de Mohr en el deslizamiento del suelo y las envolventes de resistencia tangentes a los círculos de Mohr (Watkins & Anderson, 2017).	35
Figura 2-5: Criterios de plastificación Mohr Coulomb y Drucker y Prager.	36
Figura 3-1: Largos desplazamientos: Pequeñas deformaciones + grandes rotaciones. Adaptada de (Bathe, 1996).	39
Figura 3-2: Largos desplazamientos: Grandes deformaciones + grandes rotaciones. Adaptada de (Bathe, 1996).	39
Figura 3-3: Esquema de algoritmo de contacto "Nodo-Superficie" Adaptada de https://abaqus-docs.mit.edu/	40
Figura 3-4: Elemento ladrillo "Brick Element" de Ocho (8) modos.	42
Figura 3-5: Elemento tipo cuña (wedge) de seis (6) nodos.	42
Figura 4-1: Caja de concreto con cama de tubería para la Prueba 1, (SHARMA, 2013).	44
Figura 4-2: Dimensiones (in ft) de la caja antes de la modificación (En mm). Adaptado de (SHARMA, 2013).	44
Figura 4-3: Dimensiones (in ft) de la caja después de la modificación (En mm). Adaptado de (SHARMA, 2013).	45
Figura 4-4: Tubería en el laboratorio de CUIRE, (SHARMA, 2013).	45
Figura 4-5: Gancho prefabricado para instalación de medidores de convergencia "convergence meter", (SHARMA, 2013).	46
Figura 4-6: Esquema de instrumentación, (SHARMA, 2013).	46
Figura 4-7: (a) Celda de presión de suelo Modelo 4810, (b) Celda de presión de suelo usado en las pruebas, (SHARMA, 2013).	47
Figura 4-8: (a) Medidor de convergencia modelo 4425, (b) Medidor de convergencia instalado dentro de la tubería. (c) Conexión del medidor de convergencia, (SHARMA, 2013).	48
Figura 4-9: (a) Galga extensométrica C2A-06-250LW-350, (b) Galga pegada a la tubería, (SHARMA, 2013).	48
Figura 4-10: Scanner Sistema 7000 usado en las pruebas, (SHARMA, 2013).	49
Figura 4-11: Configuración de la instrumentación para la prueba 1a: (a) Vista de planta, (b) sección B-B (Norte), (c) Sección A-A (Centro), (d) Sección C-C (Sur). Adaptado de (SHARMA, 2013).	50
Figura 4-12: Sección de la instalación para la Prueba 1a (En mm). Adaptado de (SHARMA, 2013).	54
Figura 4-13: Vista de planta de la instalación para la Prueba 1a (En mm). Adaptado de (SHARMA, 2013).	54
Figura 4-14: Deflexiones de la tubería en la prueba 1a.	57
Figura 4-15: Presiones de suero en diferentes etapas de la prueba 1a, adaptado de (SHARMA, 2013).	58
Figura 4-16: Procedimiento de análisis MEF de una tubería enterrada en una zanja.	62
Figura 4-17: Geometría del modelo de elementos finitos – Prueba 1a.	63
Figura 4-18: Condiciones de contacto y contorno del modelo – Prueba 1a.	64
Figura 4-19: Nodos compartidos entre las partes activas y desactivas – Prueba 1a. (a) Puntos negros , Nodos compartidos entre el suelo y la tubería y puntos grises , Nodos compartidos entre capas de suelo. (b) Resultados de análisis en software de elementos finitos.	67
Figura 4-20: Algunos resultados de análisis de sensibilidad realizados en software de elementos finitos.	67
Figura 4-21: Resultados del análisis paramétrico de sensibilidad – Compactación de la Prueba 1a.	68
Figura 4-22: Resultados del análisis paramétrico de sensibilidad – Longitud del modelo de la Prueba 1a.	69
Figura 4-23: Resultados del análisis paramétrico de sensibilidad – (a) Contacto del modelo de la Prueba 1a. (b) Desplazamientos en última etapa de construcción.	70
Figura 4-24: Resultados del análisis paramétrico de sensibilidad – (a) Tamaño de malla del modelo de la Prueba 1a. (b) Desplazamientos en última etapa de construcción.	71
Figura 4-25: Deflexión horizontal y vertical: MEF Vs Prueba 1a.	72
Figura 4-26: Deflexión en tubería en última etapa de la construcción analizada en software MEF.	72
Figura 4-27: Deformaciones circunferenciales: MEF Vs Prueba 1a (Etapa final de la construcción).	73
Figura 5-1: Sección de modelo tridimensional de elementos finitos, incluye paredes laterales de la zanja (Modelo simétrico longitudinal y transversal).	75

Figura 5-2: Comparación de resultados de esfuerzos verticales sobre una tubería de 48" STD A53 sometida a una carga superficial de 1,250 kPa, altura de relleno superior de 2.15 m, para diferentes longitudes, modelo de malla C3D8R.	77
Figura 5-3: Esquema parametrizado de sección de instalación de tubería en zanja, (dimensiones en mm).	77
Figura 5-4: Ejemplo de perfil de diseño de vía de acarreo Haul Road (Camión Komatsu 980), (dimensiones en metros).	80
Figura 5-5: Sección típica de una sección de un Haul Road para camiones de 320 t. (Tannant & Regensburg, 2001).	80
Figura 5-6: Esquema de impresión de huellas (asumida) sobre la superficie de un vehículo.	82
Figura 5-7: Flujo de datos para cálculo paramétrico por el Método de Elementos Finitos.	84
Figura 5-8: Ejemplo de sección longitudinal de modelo paramétrico desarrollado: Resultados de esfuerzos del suelo y de la tubería, para instalación de tubería de 48" para ancho de 48"+0.8m, para relleno lateral tipo EM1, altura de cama 1/12 de 48" enterrado una altura de 2 m bajo carga de presión de neumático de un camión CAT-797F.	85
Figura 5-9: Curva de esfuerzos verticales aplicadas por un camión CAT-797F y el peso del relleno superior, respecto de la profundidad.	86
Figura 5-10: Esfuerzos de una tubería de 48" STD A53-B, enterrada a 1 m con un ancho de zanja de 48"+0.8 m, módulo de elasticidad de 30,000 kPa y una altura de cama de 1/12 de 48".	86
Figura 5-11: Deflexiones y esfuerzos de tubería de 36" STD A53-B enterrada a 1 m bajo carga de camión CAT 979 F con material de EM1 y para (a) Ancho de zanja de 36"+0.6m (b) Ancho de zanja de 36"+0.8m (c) Ancho de zanja de 36"+1m .87	
Figura 5-12: Deflexiones de tubería de 42" STD A53-B enterrada a 1 m bajo carga de camión CAT 979 F para ancho de zanja de 42"+1m con (a) Altura de cama de 1/12 de 42" y (b) Altura de cama de 1/6 de 42".	88
Figura 5-13: Deflexiones de tubería de 42" STD A53-B enterrada a 1 m bajo carga de camión CAT 979 F para ancho de zanja de 42"+0.6m con (a) Modulo de elasticidad suelo lateral E1=30,000 kPa y (b) Modulo de elasticidad suelo lateral E2=60,000 kPa.	89
Figura 5-14: Esfuerzos de tubería de 36" STD A53-B bajo carga de camión CAT 979 F para ancho de zanja de 36"+0.6m; Instalado: (a) A una altura de 1 m; (b) A una altura de 2 m; (c) A una altura de 3 m.	89
Figura 5-15: Incremento de los esfuerzos por cambio de variables – Tubería de 36" STD A53 Gr.B.	91
Figura 5-16: Incremento de los esfuerzos por cambio de variables – Tubería de 42" STD A53 Gr.B.	92
Figura 5-17: Incremento de los esfuerzos por cambio de variables – Tubería de 48" STD A53 Gr.B.	92
Figura A - 1: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	102
Figura A - 2: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	103
Figura A - 3: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	104
Figura A - 4: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	105
Figura A - 5: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	106
Figura A - 6: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	107
Figura A - 7: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	108
Figura A - 8: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	109
Figura A - 9: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	110
Figura A - 10: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	111
Figura A - 11: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	112
Figura A - 12: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	113
Figura A - 13: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	114
Figura A - 14: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	115
Figura A - 15: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	116
Figura A - 16: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	117
Figura A - 17: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	118
Figura A - 18: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	119
Figura A - 19: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	120
Figura A - 20: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	121
Figura A - 21: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	122
Figura A - 22: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	123
Figura A - 23: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	124
Figura A - 24: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	125
Figura A - 25: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	126
Figura A - 26: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	127
Figura A - 27: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	128
Figura A - 28: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	129
Figura A - 29: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	130
Figura A - 30: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	131
Figura A - 31: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)	132
Figura A - 32: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)	133
Figura A - 33: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)	134

Figura A - 94: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F).....	195
Figura A - 95: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F).....	196
Figura A - 96: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F).....	197
Figura A - 97: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F).....	198
Figura A - 98: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F).....	199
Figura A - 99: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F).....	200
Figura A - 100: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F).....	201
Figura A - 101: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F).....	202
Figura A - 102: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F).....	203
Figura A - 103: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F).....	204
Figura A - 104: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F).....	205
Figura A - 105: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F).....	206
Figura A - 106: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F).....	207
Figura A - 107: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F).....	208
Figura A - 108: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F).....	209

INTRODUCCIÓN

El uso de tuberías de acero o plásticas es uno de los medios más comunes para el transporte de agua u otro tipo de fluidos para cortas y largas distancias como un “*pipeline*”(1), ya sea por sistemas de impulsión como los de bombeo o simplemente aprovechando la geología del terreno para transportarlo por gravedad. Una tubería que transporta grandes caudales de fluidos requiere de grandes diámetros a fin de compensar las menores pérdidas de carga por fricción a bajas velocidades de transporte. Sin embargo, estas tuberías de grandes diámetros tienen una relación diámetro-espesor muy grande, por lo que tienen menor resistencia a posibles vacíos por algunos eventos transitorios, sísmicos, fallas geológicas o a cargas livianas o pesadas superficiales que podrían ocasionar la falla por estabilidad de la tubería. Por otro lado, la experiencia ha llevado a conocer que, al tener que recorrer grandes distancias, es muy común y en ocasiones inevitable, que en la mayoría de su recorrido estas tuberías se encuentren enterradas (ver Figura-a) tanto en su trayecto como en los cruces de vías, por lo que algunas consideraciones adicionales deben ser tomadas al momento de diseñar.

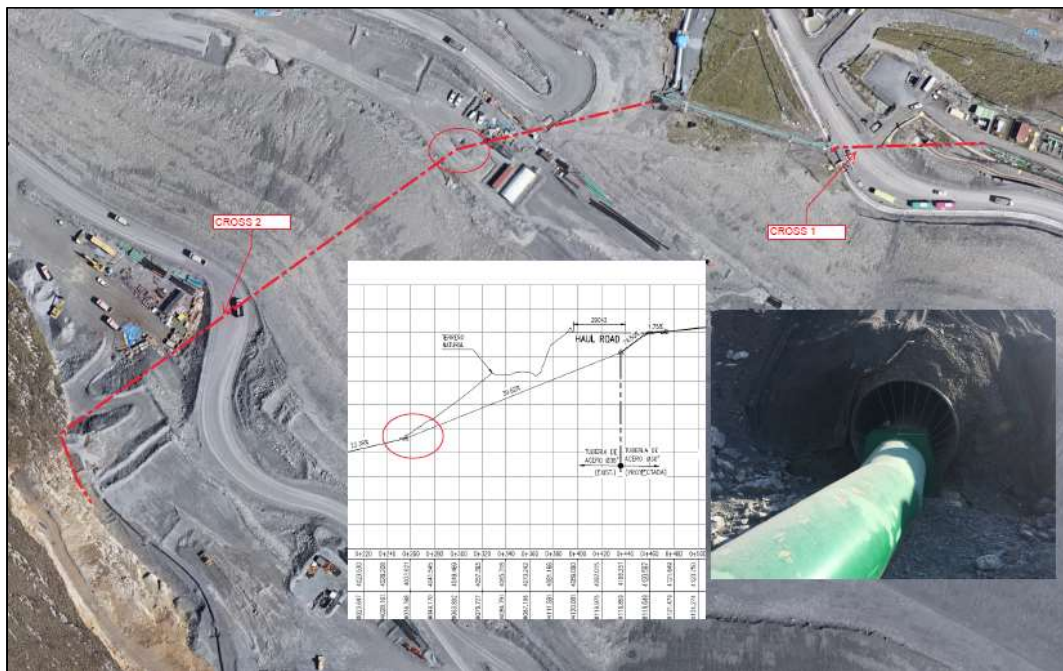


Figura-a: Pipeline que retorna las aguas filtradas de la presa de relaves de una compañía minera hacia la misma presa por medio de un pipeline de 30” bombeado desde una estación “booster”. La tubería cruza por varios accesos.

En el sector minero, el agua es el factor más importante para el procesamiento de minerales, por lo que, en ocasiones necesita ser transportados desde los puntos de captación hacia las plantas concentradoras o hacia otros puntos ubicados a largas distancias, es decir, a través de *pipelines*. Estas últimas pueden ir sobre terreno o enterradas, sobre todo en caso de que se requiera cruzar alguna vía de acceso de vehículos de carga liviana o pesada como se mostró en la Figura-a.

(1) Un Pipeline es una línea de tuberías de acero o plástica para el transporte de fluidos por largas distancias, su recorrido normalmente es por zonas no edificadas y estas pueden estar instaladas enterradas o sobre terreno.

En casos de no tener seguridad sobre la resistencia de las tuberías enterradas, es una práctica de ingeniería protegerlas por medio de tubos como *culverts* o *casings* que también suelen ser de acero, acero corrugado o plásticas (HDPE) corrugadas; no obstante, esta práctica conlleva a considerar mayores alturas de profundidad de instalación de las tuberías, y por ende, mayores costos de excavación y materiales de relleno estructural, adicionalmente a todo esto, se debe considerar los costos de los materiales de protección como se aprecia en la Figura-a.

El diseño de tuberías enterradas en zanjas es una práctica común aplicando estudios de varias investigaciones que han sido plasmados en libros, estándares, o información técnica de proveedores, con los que se ha conseguido establecer criterios que facilitan el diseño aplicando ecuaciones simplificadas que en su mayoría están orientadas al sobredimensionamiento y seguridad. Para el caso de transporte de agua por tuberías de acero, la Asociación Americana de Trabajos con el Agua, con sus siglas en inglés AWWA, ha realizado una serie de publicaciones con recomendaciones y premisas para su diseño y cálculo. Así mismo, en referencia a las tuberías enterradas, ofrece en su manual (AWWA M11, 2005) ecuaciones y criterios de diseño para seleccionar espesores adecuados para una limitada, pero usual lista de materiales de terreno que son utilizados en este tipo de aplicaciones y para determinar la presión de colapso de la tubería sometida a cargas internas y externas.

En la actualidad, los cálculos de tuberías enterradas se desarrollan a través de manuales presentados por distintos fabricantes en base a normas internacionales y su experiencia aplicando ecuaciones simplificadas que permiten estimar, con un mayor grado de seguridad, los esfuerzos a la que está sometida la tubería. Sin embargo, estas ecuaciones consideran el comportamiento del terreno y relleno de las zanjas en su rango elástico cuyos resultados se acomodan bien a la resistencia de la tubería por el efecto solamente del relleno superior, pero el suelo se comporta en su rango elástico y en ocasiones en su estado plástico con una física más compleja y poco amigable para desarrollar necesitando herramientas computacionales de cálculo numérico para poder resolverla. Una de las herramientas de cálculo que permite determinar los esfuerzos de una tubería sometida a cargas de terreno con un comportamiento elastoplástico es el método de los elementos finitos MEF.

El método de los elementos finitos (MEF) es introducido por primera vez en problemas de ingeniería por medio de (M. J. TURNER, R. W. CLOUGH, H. C. MARTIN, 1956), quienes aplicaron el método para analizar las tensiones por medio de la rigidez y desplazamientos de las estructuras complejas como las aeronaves. A partir de ello, el MEF ha sido mejorado en cuanto a los aspectos particulares de la ingeniería, especialmente en lo referente a los modelos constitutivos de los materiales, la representación del proceso constructivo y de las cargas externas.

El MEF actualmente es uno de los métodos numéricos más consolidados y con mayor aplicación en la Ingeniería encontrando entre los más comerciales softwares como *ANSYS*, *COMSOL Multiphysics*, *Altair*

HyperWorks Suite, Abaqus o AutoFEM Análisis (Autodesk) los cuales permiten realizar análisis estructurales, y alguno de estos permiten además realizar análisis de fluidos o análisis electromagnéticos entre los más comunes, sin embargo, son software especializados en la especialidad de geotécnica que permiten analizar el comportamiento tubería-terreno, como por ejemplo: *CANDE (Culverts Analysis and Design)*, presentado por (Katona, 1978), *GEO5* de la empresa *FINE, Plaxis de Bentley*.

El software *ABAQUS* de *Dassault Systèmes*, no solamente permite realizar análisis estructurales, sino que también cuenta con códigos / herramientas que permiten simular las propiedades plásticas de los suelos por medio de los criterios de fluencia de suelos de Mohr Coulomb, Drucker-Prager los cuales son explicados en la sección 2.2.2. Es importante mencionar que el software como *ANSYS* no incluyen herramientas para analizar el comportamiento de suelos, pero estas pueden ser programadas.

Un análisis más profundo en este tipo de aplicaciones, calculando los esfuerzos en las tuberías enterradas bajo accesos de vehículos de carga pesada utilizando el método de los elementos finitos, con lo cual se pueda comprender su comportamiento físico sometido a distintas solicitaciones y bajo la modificación de distintos parámetros, permitirá a los diseñadores tener herramientas y criterios efectivos y necesarios para tomar decisiones más asertivas y poder reducir los costos de instalación en la etapa de diseño.

Las tuberías enterradas pueden estar sometidas a cargas muertas, como los materiales de relleno estructural dentro de las zanjas, y a cargas vivas, como las ocasionadas por fallas estructurales del terreno, tales como sismos, asentamientos, o como las ocasionadas por cargas superficiales, tales como estructuras aledañas a la instalación o pase de vehículos livianos o pesados.

Uno de los aspectos más importantes para el procesamiento de los materiales en la gran minería es el agua y su captación es un reto importante por la lejanía de las fuentes de suministro por lo que es muy común el uso de tuberías para su transporte y por lo general a través de largas distancias. Estas tuberías suelen ser instaladas en la mayoría de su recorrido enterradas y pueden ser de materiales plásticos o de acero, y en su recorrido es inevitable cruzar por accesos de vehículos livianos y pesados (ver Figura-b y Figura-c).

En los cruces de accesos vehiculares es común la instalación de tuberías de acero por su mayor rigidez y resistencia a sobre cargas generadas por los vehículos, y para poder validar la máxima deflexión y esfuerzos en la tubería es usual utilizar ecuaciones analíticas para casos específicos y más comunes los cuales son recomendados por distintos fabricantes de tuberías y estándares internacionales que en su mayoría se reducen a ecuaciones establecidas por las teorías de (Marston, 1913) para determinar la carga sobre el terreno, (Spangler, 1964) para calcular las deflexiones y esfuerzos sobre la tubería y (Boussinesq, 1885) para determinar los efectos de cargas superficiales sobre la tubería enterrada, sin embargo, estas ecuaciones tienen limitaciones ya que dependen de factores y coeficientes calculados para ciertas condiciones de instalación, por lo que estudios desarrollados por (Masada, 2000; Tian, Liu, Jiang, & Yu,

2015; Warman, Hart, & Francini, 2009) presentan ecuaciones basadas en las anteriores y que estiman coeficientes que aproximan mejor los resultados sin embargo todas estas ecuaciones asumen el comportamiento del terreno en su rango elástico cuando en la realidad este podría llegar a comportarse en un rango elastoplástico.



Figura-b: Imagen referencial de circulación de vehículo minero.

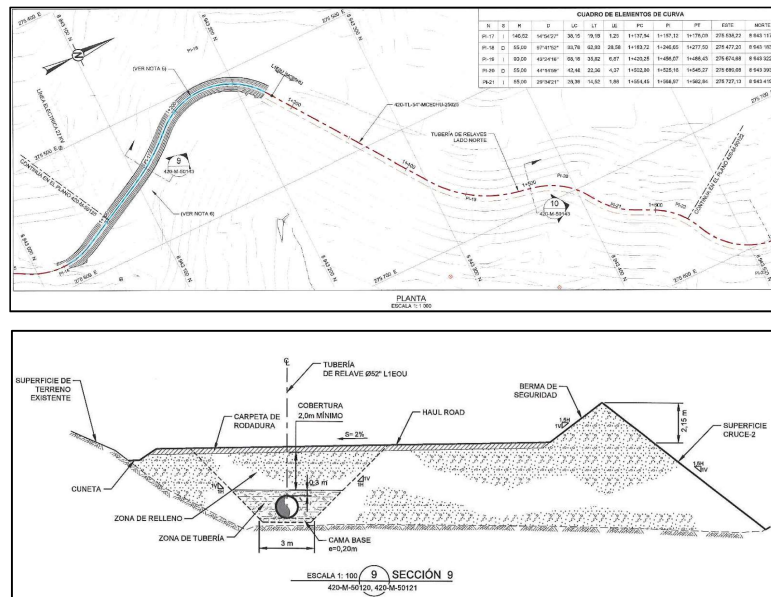


Figura-c: Pase de tubería de relaves de acero de 52" bajo tramo de aproximadamente 220 m del Haul Road

Nota: Adaptados de planos de ejecución de tuberías de proyectos desarrollados por el Autor.

El estándar (AWWA M11, 2005) considera las cargas por efecto de vehículos en carreteras para 4 clases como son la H15, H20, HS15 y HS20 (AASHTO, 2002), con pesos de vehículos de hasta 35 toneladas presentando cargas sobre la tubería para distintas profundidades y módulos de reacción del suelo, siendo estos los utilizados para diseño; sin embargo, en la minería existen vehículos como los camiones mineros con pesos brutos de hasta las 625 toneladas (para vehículo KOMATSU 980 E, peso de vehículo más peso de carga *payload*) como se muestra en la Tabla-a por lo que es necesario determinar cuáles son los efectos de estos vehículos sobre la tubería.

En general, las ecuaciones analíticas representan resultados confiables sin embargo se encuentran muy por el lado de la seguridad y para condiciones de instalación especiales con tuberías de gran diámetro y baja relación espesor-diámetro, y, además, instaladas bajo cruces de vehículos de carga pesada, es necesario realizar un análisis más profundo a fin de poder conseguir resultados más precisos y confiables y con ello plantear una instalación más económica.

Tabla-a: Lista de capacidades de carga de vehículos pesados usados en Minería (Datos tomados de base de datos de una Unidad Minera - Perú)

Descripción de vehículos	Carga Payload (t)
CATERPILLAR modelos 793 F	240
CATERPILLAR modelos 797 F	400
KOMATSU modelo 930 E	297
KOMATSU modelo 980 E	360

La presente investigación propone el uso del método de elementos finitos para que, por medio de un estudio paramétrico del comportamiento tubería-terreno en sus condiciones reales de instalación, se pueda determinar cuáles son los parámetros más influyentes y que afectan en mayor grado a la deflexión y esfuerzos de la tubería. Se plantea utilizar un método numérico confiable y por medio de simulaciones numéricas realizar un análisis de sensibilidad de aproximación para poder determinar las condiciones finales del modelo que permitan aproximar los datos experimentales extraídas de la investigación de (SHARMA, 2013), y con ello, finalmente determinar paraméricamente las deflexiones y esfuerzos máximos para tuberías de acero ERW A53 Grado B sometida a cargas superficiales. En la Figura-d se muestra un estándar de instalación típica y usada en la minería.

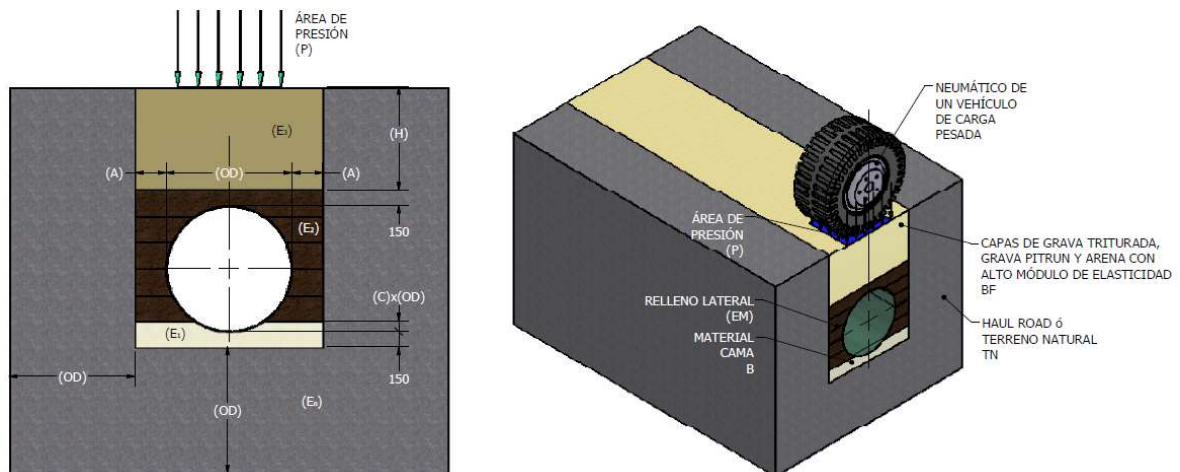


Figura-d: Sección de instalación típica de tubería de acero enterrada bajo cruce de acceso de vehículos de carga pesada.

El objetivo general de la presente tesis es desarrollar, por medio de uso de software de elementos finitos, un estudio paramétrico del comportamiento de una tubería de acero ERW A53 Grado B, de espesor de pared *Standard Weight (STD)*, según la ASME B36.10, para diámetros nominales comerciales de 36", 42"

y 48", enterrada bajo caminos mineros (*Haul Road*) sometidos a cargas superficiales de vehículos mostrados en la Tabla-a, de acuerdo con la instalación típica y usual en minería mostrada en la Figura-d; con la finalidad de comprender el comportamiento de una tubería sometida a sobre cargas no usuales en el diseño en cruces de caminos mineros y bajo qué condiciones de instalación su comportamiento es adecuado encontrando las deflexiones dentro de sus límites admisibles de deflexión y esfuerzos.

Para ello se desarrollará lo siguiente:

1. Determinar preliminarmente las variables que afectan los resultados de deflexión y esfuerzos de tuberías por medio de la verificación de ecuaciones analíticas para el cálculo de tuberías enterradas.
2. Implementar un procedimiento de cálculo para determinar las deformaciones y esfuerzos a los que está sometida una tubería enterrada por el método de los elementos finitos definiendo los modelos constitutivos del acero y del suelo.
3. Realizar un análisis de sensibilidad del modelo de elementos finitos que permita aproximar los resultados de deflexión y deformación de la tubería del análisis experimental de una tubería de acero de 84" ensayada en una caja de concreto enterrada en instalaciones del centro de investigación y educación para infraestructura enterrada con sus siglas en inglés (*CUIRE*) ubicada en la Universidad de Texas en Arlington (*UTA*). Estudio desarrollado por (SHARMA, 2013) en su tesis doctoral "*Development of a Model for Estimation of Buried Large Diameter Thin-Walled Steel Pipe Deflection due to External Loads*"
4. Desarrollar el estudio paramétrico con las variables predefinidas y determinar cuáles son las que afectan considerablemente los resultados de deflexión y esfuerzos de las tuberías enterradas bajo caminos mineros (*Haul Road*).

El desarrollo de la presente investigación consiste en un análisis cualitativo, en base a resultados cuantitativos, de las deflexiones y los esfuerzos a los que está sometido una tubería enterrada bajo accesos de vehículos de carga pesada normalmente utilizada en la gran minería, utilizando herramientas de cálculo por el método de elementos finitos.

El presente trabajo de investigación excluye el estudio y análisis de tuberías de diámetros pequeños menores a 36", así como materiales de tubería plásticos y rígidos. Así mismo, no se considera el estudio ni análisis de tuberías enterradas en zonas convencionales sin embargo las conclusiones del estudio general pueden ser escaladas para cualquier tipo de instalación. Tampoco se considera el análisis de las tuberías por efectos de fatiga.

ESTRUCTURA DE TRABAJO.

En el CAPÍTULO 1, “Antecedentes de métodos de cálculo de tuberías de acero enterradas”; Se estudian los conceptos básicos sobre los métodos de cálculo de tuberías de acero enterradas que actualmente son utilizados en el sector Minero en Perú, las recomendaciones del estándar AWWA M11 y la descripción de las teorías de cálculo de Marston, Spangler, Boussinesq y Timoshenko así como las consideraciones y limitaciones de cálculo de cada una de las ecuaciones planteadas para determinar las cargas del terreno y esfuerzos sobre la tubería por el factor de carga muerta así como los de carga superficial.

En el CAPÍTULO 2, “Características y comportamiento de las tuberías de acero y del terreno/relleno”; Se estudian las propiedades mecánicas y constitutivas en su estado elástico y lineal de tubos de acero comúnmente utilizadas para el transporte de agua. Así mismo se estudian las propiedades mecánicas y constitutivas del terreno y de los tipos de rellenos en su estado elastoplástico y no lineal usados comúnmente en instalaciones en zanjas. Finalmente se determinarán, los modelos constitutivos con el que se analizarán las tuberías y el suelo.

En el CAPÍTULO 3, “Bases de cálculo de tuberías enterradas por el método de los elementos finitos”; Se estudia el método de elementos finitos aplicados al comportamiento tubería-terreno de un modelo tridimensional evaluando los aspectos a ser utilizados en el cálculo como el contacto no lineal entre el suelo-tubería o suelo-suelo, las condiciones de carga y de contorno, la malla y los tipos de elementos de malla a usar.

En el CAPÍTULO 4, “Validación de datos experimentales con el modelo de elementos finitos”; Se describen los datos experimentales extraídos de la investigación desarrollada por (SHARMA, 2013), así como la instrumentación usada y el procedimiento constructivo desarrollado. Se establece un procedimiento para la determinación de la carga de compactación de las capas del relleno lateral durante el proceso constructivo y su efectividad. Finalmente se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar los impactos del contacto, la longitud del modelo y el tamaño de malla y definir resultados aceptables aproximados a los resultados experimentales.

En el CAPÍTULO 5, “Análisis paramétrico del comportamiento tubería-terreno sometido a cargas superficiales de vehículos de carga pesada”; con el modelo y procedimiento de análisis por el método de elementos finitos validado con datos experimentales, se establecen los parámetros variables en el estudio y se determinan las deflexiones y esfuerzos de tuberías de acero con material A53-B de espesor STD para tuberías de diámetros comerciales de 36”, 42”, y 48”. Se realiza un análisis de los resultados evaluando los parámetros y exponiendo tendencias de los esfuerzos debido al cambio de estas variables.

En el CAPÍTULO 6, “Conclusiones y recomendaciones”; Se exponen las conclusiones más relevantes del estudio realizado, así como recomendaciones para la realización de futuras investigaciones.

CAPÍTULO 1

Antecedentes de métodos de cálculo de tuberías de acero enterradas

1.1. Introducción

Las tuberías de transporte de líquidos son diseñadas considerando una serie de variables como son la cantidad de flujo a transportar (Caudal), su velocidad de transporte, su resistencia a las presiones internas, tipo de fluido, cargas ocasionales como sobre presiones o en el caso particular de tuberías enterradas también son consideradas las presiones externas debido a cargas propias del suelo o cargas superficiales actuando sobre este.

Las tuberías de acero enterradas son diseñadas según las recomendaciones técnicas del estándar (AWWA M11, 2005), así mismo, existen otros estándares internacionales que pueden ser utilizados, siendo alguno de ellos, el estándar alemán (DWA ATV127, 2000) y el estándar francés (Fascicule 70-1, 2019), sin embargo, todas estas se fundamentan en principios teóricos como son: La teoría de *Marston* (Marston, 1913) para determinar las cargas del terreno sobre la tubería; Las formulaciones de (Spangler, 1948, 1964) para la determinación de las deflexiones horizontales y verticales de la tubería y métodos para la determinación de las cargas superficiales sobre el terreno como son las presentadas por *Boussinesq* (Boussinesq, 1885) y *Timoshenko*.

La presente sección resume el fundamento teórico utilizado para el diseño de tuberías de acero enterradas, en lo que se basa la presente investigación. Para procedimientos de cálculo de tuberías plásticas como la fibra de vidrio y el HDPE utilizadas para el transporte de agua se debe considerar el estándar (AWWA M45, 1999) y (AWWA M55, 2006) respectivamente y para el caso de tuberías de hierro dúctil utilizar el procedimiento del estándar (AWWA M41, 2009), o sus versiones más recientes.

1.2. Instalación típica en zanjas

Las secciones típicas de las zanjas pueden ser muy variables en cuanto a dimensiones, sin embargo, estas se pueden resumir en variables como son el ancho, la profundidad, los materiales de relleno, los diámetros de las tuberías, entre las más importantes. Muchos diseñadores basan su diseño en función a ciertos criterios establecidos que pueden ser recomendaciones de proveedores de tuberías, normas o estándares de diseño o simplemente por experiencias adquiridas. Algunos de estos criterios se describen a continuación:

- Las zanjas deben ser construidas según lo especificado en los planos del perfil del pipeline. El perfil, que es diseñado según la topografía del terreno, debe considerar las profundidades de diseño establecidas para la tubería según la resistencia de la misma, así como el tipo de suelo como relleno de la zanja.

- Cuando las condiciones del suelo natural permitan un soporte lateral razonable, el ancho de la zanja deberá mantenerse uniforme desde la base de la tubería y debe ser lo más estrecho posible a fin de permitir un mayor respaldo lateral de la tubería. Para la compactación de la cama y el relleno de la zanja se debe considerar un ancho equivalente al diámetro de la tubería más 300 mm como mínimo a cada lado a fin de poder montar un equipo de compactación.
- En la base de la tubería, se debe considerar una cama de arena o roca triturada de 75 a 152 mm de espesor y esta debe alcanzar como mínimo 1/6 del diámetro exterior de la tubería (O.D.).
- El relleno de la zanja debe tener un grado de compactación entre 85% a 95% de acuerdo a la clase especificada de la cama de la tubería. Según el estándar (AWWA M11, 2005) se sugiere material granular compactado como arena fina o grava triturada como se muestra en el manual N°37 de la ASCE (WPCF Manual of Practice no. 9, 1969). Considerar una altura del relleno desde los 150 mm a 300 mm sobre el tope de la tubería como mínimo. Ver Figura 1-1.

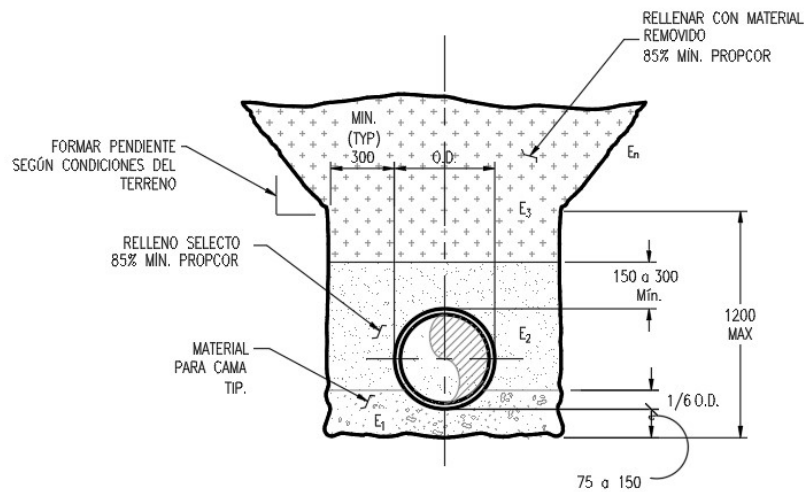


Figura 1-1: Instalación típica de tubería de acero enterrada

En la Figura 1-1 las dimensiones están en mm y las nomenclaturas E₁, E₂, E₃ y E_n significan los módulos de la cama, relleno lateral, relleno superior (suelo removido) y terreno natural respectivamente.

1.3. Materiales de la zanja

Los estudios analíticos para el diseño de tuberías enterradas han sido formulados de acuerdo a la teoría de la elasticidad donde solo son necesarias las propiedades constitutivas de los tipos de rellenos de la zanja.

El sistema unificado de clasificación de suelos, con sus siglas en inglés *USCS*, clasifica a los tipos de suelos como se muestra en la Tabla 1-1:

Tabla 1-1: Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería. Fuente: ASTM Standard D2487-69, ASTM, Philadelphia, Pa. (1969)

Symbol	Description
GW	Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
GP	Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
GM	Silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt mixtures
GC	Clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay mixtures
SW	Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines
SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines
SM	Silty sands, poorly graded sand-silt mixtures
SC	Clayey sands, poorly graded sand-clay mixtures
ML	Inorganic silts and very fine sand, silty or clayey fine sands
CL	Inorganic clays of low to medium plasticity
MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts
CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays
OL	Organic silts and organic silt-clays of low plasticity
OH	Organic clays of medium to high plasticity
Pt	Peat and other highly organic soils

Sin embargo, para el caso específico de materiales de relleno para zanjas y sus requerimientos mínimos de compactación, se recomienda usar los materiales indicados en el "Standard Specification of Highway Bridges" (AASHTO, 2002) . Ver Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Estándar de suelos para zanjas y mínimos requerimientos de compactación. Tabla 16.4B adaptada de (AASHTO, 2002)

Installation Type	Bedding Thickness	Haunch and Outer Bedding	Lower Side
Type 1	B/24" (600 mm) minimum, not less than 3" (75 mm). If rock foundation, use Bc/12" (300 mm) minimum, not less than 6" (150 mm).	95% SW	90% SW, 95% ML 100% CL, or natural soils of equal firmness
Type 2 (See Note 3.)	Bc/24" (600 mm) minimum, not less than 3" (75 mm). If rock foundation, use Bc/12" (300 mm) minimum, not less than 6" (150 mm).	90% SW or 95% ML	85% SW, 90% ML, 95% CL, or natural soils of equal firmness
Type 3 (See Note 3.)	B/24" (600 mm) minimum, not less than 3" (75 mm). If rock foundation, use B/12" (300 mm) minimum, not less than 6" (150 mm).	85% SW, 90% ML, or 95% CL	85% SW, 90% ML, 95% CL, or natural soils of equal firmness
Type 4	No bedding required, except if rock foundation, use Bc/ 12" (300 mm) minimum, not less than 6" (150 mm).	No compaction required, except if CL, use 85% CL	85% SW, 90% ML 95% CL, or natural soils of equal firmness

Notes:

1. Compaction and soil symbols 4.e. "95% SW"-refers to SW soil material with minimum standard Proctor compaction of 95%. See Table 16.4C for equivalent modified Proctor values.
2. The trench top elevation shall be no lower than 0.1H below finished grade or, for roadways, its top shall be no lower than an elevation of 1' (0.3 m) below the bottom of the pavement base material.
3. Only 'Qpe 2 and 3 installations are available for horizontal elliptical, vertical elliptical and arch pipe.
4. Soil in bedding and haunch zones shall be compacted to at least the same compaction as specified for the majority of soil in the backfill zone.
5. The trench width shall be wider than shown if required for adequate space to attain the specified compaction in the haunch and bedding zones.
6. For trench walls that are within 10 degrees of vertical, the compaction or firmness of the soil in the trench walls and lower side zone need not be considered.
7. For trench walls with greater than 10-degree slopes that consist of embankment, the lower side shall be compacted to at least the same compaction as specified for the soil in the backfill zone.

1.4. Diseño de tuberías enterradas

Los aspectos más importantes al momento de diseñar tuberías son: Considerar el fluido que transporta, la velocidad a la que se transportará, la presión interna y externa estática de transporte, las presiones transitorias como los golpes de ariete, cargas superficiales sobre la tubería o los eventos sísmicos de la zona de instalación la tubería.

El propósito de esta investigación es el análisis de los esfuerzos y deflexiones de las tuberías enterradas por lo que esta sección se centra en los siguientes aspectos:

- Las cargas externas estáticas sobre la tubería; las mismas que corresponden a las cargas del terreno de la zanja sobre la tubería.
- Las cargas externas transitorias como son las superficiales debido al paso de vehículos que para fines de este documento se establece como vehículos de carga pesada como son los camiones mineros.

Estos aspectos que intervienen en el diseño de la tubería cuentan con las siguientes solicitaciones:

- Estimación de la deflexión de la tubería.
- Estimación de los esfuerzos resultantes sobre la tubería.
- Recomendación de la profundidad de instalación.
- Selección de los materiales de la cama y rellenos de la zanja, así como los grados de compactación requeridos para los mismos.

1.4.1. Parámetros requeridos para el cálculo de tuberías enterradas

Los parámetros más relevantes para el cálculo de tuberías enterradas son los siguientes:

- Densidad del relleno o de los rellenos (ρ_r).
- Diámetro exterior de la tubería (D_e).
- Espesor de la tubería (t) – Preseleccionado de acuerdo a los cálculos hidráulicos.
- Módulo de elasticidad del material de la tubería – Preseleccionado de acuerdo a los cálculos hidráulicos (E_t).
- Módulo de reacción o módulos de elasticidad del o los rellenos de la zanja (E'_1, E'_2, \dots, E'_n).
- Los valores geométricos recomendadas en la sección típica de la tubería.

1.4.2. Carga muerta

La teoría del ingeniero Anson Marston (1864-1949), conocida como la teoría de Marston, sugiere determinar la carga muerta sobre la tubería enterrada en zanjas a través de la siguiente expresión. Ver mayor detalle en (Marston, 1913):

$$W_r = C_r \rho_r g H B_d \quad (\text{Ec. 1-1})$$

Donde:

W_r : Peso total del terreno sobre la tubería, por unidad de longitud (kN/m);

ρ_r : Densidad del relleno de la zanja (kg/m³);

B_d : Ancho de la zanja (m);

g : Aceleración de la gravedad (m/s²);

C_r : Coeficiente de carga del relleno sobre la tubería $C_r = \frac{1 - \frac{1}{e^{2Ku' \frac{H}{B_d}}}}{2Ku'}$;

u' : Coeficiente de fricción interna (Si u' es mayor usar u en su lugar);

u : Coeficiente de fricción entre el terreno natural y el relleno de la zanja.

H : Altura del relleno sobre el tope de la tubería (m);

K : Relación entre la presión del suelo lateral y vertical $K = \frac{\sqrt{u^2+1}-u}{\sqrt{u^2+1}+u}$;

Como se puede observar, la formulación de Marston puede ser muy útil al momento de realizar comparaciones con análisis numéricos con el método de elementos finitos (MEF) ya que esta se basa en datos reales del terreno para poder simular la no linealidad de la interacción Tubería-Relleno (Ver CAPÍTULO 3), sin embargo, en caso se requieran realizar estimaciones aproximadas, donde solo se conoce, la densidad del relleno, la altura de instalación y el diámetro exterior de la tubería, se puede utilizar la formulación indicada en el estándar M11 (AWWA M11, 2005) como se muestra a continuación:

$$W_r = g \rho_r H D_e \quad (\text{Ec. 1-2})$$

Donde:

W_r : Peso del relleno sobre la tubería, por unidad de longitud (kN/m);

ρ_r : Densidad del relleno de la zanja (kg/m³);

H : Altura del relleno sobre el tope de la tubería (m);

D_e : Diámetro exterior de la tubería (m);

g : Aceleración de la gravedad (m/s²).

1.4.3. Carga superficial

Existen varios métodos para determinar la carga superficial sobre una tubería enterrada, siendo uno de los más usados la formulada por el matemático y físico francés Joseph Boussinesq (1842-1929) quien determina el incremento de los esfuerzos del suelo idealizando una carga puntual sobre el terreno actuando sobre un punto bajo la superficie del terreno en función de sus coordenadas cartesianas relativas. Sin embargo, en 1935, el ingeniero Nathan M. Newmark (Newmark, 1935), en base a la teoría de Boussinesq, formula y resuelve la (Ec. 1-3) para poder encontrar el esfuerzo bajo una carga superficial distribuida bajo un área de aplicación. Ver Figura 1-2.

$$P_L = I(m, n)W_w D_e \quad (\text{Ec. 1-3})$$

Donde:

P_L : Carga transmitida a tubería, por unidad de longitud (kN/m);

W_w : Carga superficial (kN/m²);

D_e : Diámetro exterior de la tubería (m);

I : es una constante que depende de los valores $m = B/H$ y $n = L/H$ y se relacionan bajo la siguiente expresión:

$$I(m, n) = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 - m^2n^2} \right) \right] \quad (\text{Ec. 1-4})$$

B : Ancho de la cuarta parte de la sección superficial (m);

L : Longitud de la cuarta parte de la sección superficial (m);

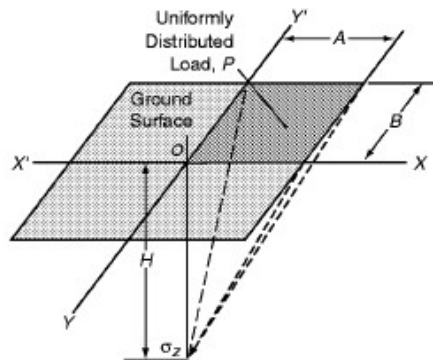
H : Altura del relleno sobre el tope de la tubería (m).

En el caso de que el denominador dentro de la tangente inversa de la expresión (Ec. 1-4) sea negativo, será necesario sumar π a la expresión dentro de los corchetes, como se muestra en la siguiente expresión:

$$I(m, n) = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 - m^2n^2} \right) + \pi \right] \quad (\text{Ec. 1-5})$$

El método precisa también que, para el cumplimiento de la ecuación, el valor de $I(m, n)$ debe estar dentro del rango de 0 a 0.25.

En 1982, Merlin Spangler y Richard Handy, publican en su libro Soil Engineering, una tabla del coeficientes de influencia para áreas rectangulares $I(m, n)$ para distintos valores de m y n los cuales en la actualidad son todavía utilizados.



Source: Spangler, M.G. & Handy, R.L. Soil Engineering, Harper and Row, New York (4th ed., 1982).

Figura 1-2: Diagrama de aplicación de carga superficial sobre una tubería (Spangler, 1982). Fuente (AWWA M11, 2005)
Sin embargo, los valores mostrados en la Tabla 1-3, han sido obtenidos después de la aplicación de las ecuaciones (Ec. 1-4) y (Ec. 1-5).

Tabla 1-3: Coeficientes de influencia para áreas rectangulares. Fuente (AWWA M11, 2005).

$m = A/H$ or $n=B /H$	$n = B/H$ or $m =A/H$								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	0.005	0.009	0.013	0.017	0.020	0.022	0.024	0.026	0.027
0.2	0.009	0.018	0.026	0.033	0.039	0.043	0.047	0.050	0.053
0.3	0.013	0.026	0.037	0.047	0.056	0.063	0.069	0.073	0.077
0.4	0.017	0.033	0.047	0.060	0.071	0.080	0.087	0.093	0.098
0.5	0.020	0.035	0.056	0.071	0.084	0.095	0.103	0.110	0.116
0.6	0.022	0.043	0.063	0.080	0.095	0.107	0.117	0.125	0.131
0.7	0.024	0.047	0.069	0.087	0.103	0.117	0.128	0.137	0.144
0.8	0.026	0.050	0.073	0.093	0.110	0.125	0.137	0.146	0.154
0.9	0.027	0.053	0.077	0.098	0.116	0.131	0.144	0.154	0.162
1.0	0.028	0.055	0.079	0.101	0.120	0.136	0.149	0.160	0.168
1.2	0.029	0.057	0.083	0.106	0.126	0.143	0.157	0.168	0.178
1.5	0.030	0.059	0.086	0.110	0.131	0.149	0.164	0.176	0.186
2.0	0.031	0.061	0.089	0.113	0.135	0.153	0.169	0.181	0.192
2.5	0.031	0.062	0.090	0.115	0.137	0.155	0.170	0.183	0.194
3.0	0.032	0.062	0.090	0.115	0.137	0.156	0.171	0.184	0.195
5.0	0.032	0.062	0.090	0.115	0.137	0.156	0.172	0.185	0.196
10.0	0.032	0.062	0.090	0.115	0.137	0.156	0.172	0.185	0.196

α	0.032	0.062	0.090	0.115	0.137	0.156	0.172	0.185	0.196
	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	10.0	α
0.1	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.032	0.032	0.032
0.2	0.055	0.057	0.059	0.061	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062
0.3	0.079	0.083	0.086	0.089	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090
0.4	0.101	0.106	0.110	0.113	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115
0.5	0.120	0.126	0.131	0.135	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137
0.6	0.136	0.143	0.149	0.153	0.155	0.156	0.156	0.156	0.156
0.7	0.149	0.157	0.164	0.169	0.170	0.171	0.172	0.172	0.172
0.8	0.160	0.168	0.176	0.181	0.183	0.184	0.185	0.185	0.185
0.9	0.168	0.178	0.186	0.192	0.194	0.195	0.196	0.196	0.196
1.0	0.175	0.185	0.193	0.200	0.202	0.203	0.204	0.205	0.205
1.2	0.185	0.196	0.205	0.212	0.215	0.216	0.217	0.218	0.218
1.5	0.193	0.205	0.215	0.223	0.226	0.228	0.229	0.230	0.230
2.0	0.200	0.212	0.223	0.232	0.236	0.238	0.239	0.240	0.240
2.5	0.202	0.215	0.226	0.236	0.240	0.242	0.244	0.244	0.244
3.0	0.203	0.216	0.228	0.238	0.242	0.244	0.246	0.247	0.247
5.0	0.204	0.217	0.229	0.239	0.244	0.246	0.249	0.249	0.249
10.0	0.205	0.218	0.230	0.240	0.244	0.247	0.249	0.250	0.250
	0.205	0.218	0.230	0.240	0.244	0.247	0.249	0.250	0.250

Fuente: Vewmanb, N.M., *Simplified Computation of Vertical Pressures in Elastic Foundations*. Circ. £4. Engrg. Exp. Stn., Univ. of Illinois (1935).

Existe otro método propuesto por Timoshenko para estimar las cargas superficiales la cual define la aplicación de una carga distribuida sobre un área ubicado sobre la tubería enterrada a una altura específica y en base al radio equivalente de contacto.

$$P_L = \frac{I_f W_w}{a_c} \left(1 - \frac{H^3}{(r_t^2 + H^2)^{1.5}} \right) D_e \quad (\text{Ec. 1-6})$$

Donde:

P_L : Carga transmitida a tubería, por unidad de longitud (kN/m);

I_f : Factor de impacto;

W_w : Carga superficial (kN/m²);

a_c : Área equivalente de contacto de neumático, $a_c = \pi r_t^2$ (m²);

r_t : Radio de contacto, equivalente a ancho de neumático (m);

D_e : Diámetro exterior de la tubería (m);

H : Altura sobre tubería (m).

Ambas ecuaciones encuentran valores muy similares por lo que para la aplicación de cargas superficiales concentradas en la huella del neumático del vehículo de carga pesada se pueden usar cualquiera de ellas. Sin embargo, es importante precisar que ambas ecuaciones, la de Boussinesq modificada y de Timoshenko, dan resultados muy precisos dentro del campo elástico lineal, lo cual ha sido validado con cálculos por el MEF (Helwany, 2007) obteniéndose resultados de aproximación muy similares y aceptables.

1.4.4. Deflexión de la tubería

Como se indicó anteriormente, uno de los aspectos más importantes a la hora de diseñar tuberías enterradas es la verificación de la deflexión de la tubería.

Según las recomendaciones de varias bibliografías como (Watkins & Anderson, 2017), (Moser & Folkman, 2008), así como recomendaciones de fabricantes de tuberías de acero, es conservador considerar, a la hora de diseñar tuberías de acero enterradas, una deflexión máxima menor al 5% o que el esfuerzo sobre la tubería este dentro de los valores admisibles, sin embargo, la deflexión de diseño deberá ser menor al 2% puesto que debe considerarse la deformación de la pintura exterior de la tubería. La deflexión se mide de la razón entre la deformación y el diámetro exterior de la tubería.

La ecuación más utilizada para determinar la deflexión en el rango elástico lineal del suelo y de la tubería es la llamada "Formula de IOWA" basada en la teoría de la elasticidad y que fue presentada por primera vez por el ingeniero Merlin Spangler (Spangler, 1948), la misma fue modificada por el mismo autor en (Spangler, 1964) considerando las cargas superficiales sobre el terreno. En la actualidad esta ecuación ha sido modificada tanto para obtener la deflexión horizontal como la vertical por distintos autores como el mismo autor (Spangler, 1964), y otras nuevas investigaciones como (Warman et al., 2009), (Masada, 2000).

La solución de (Spangler, 1948) parte desde la formulación esquemática como se muestra en la Figura 1-3.

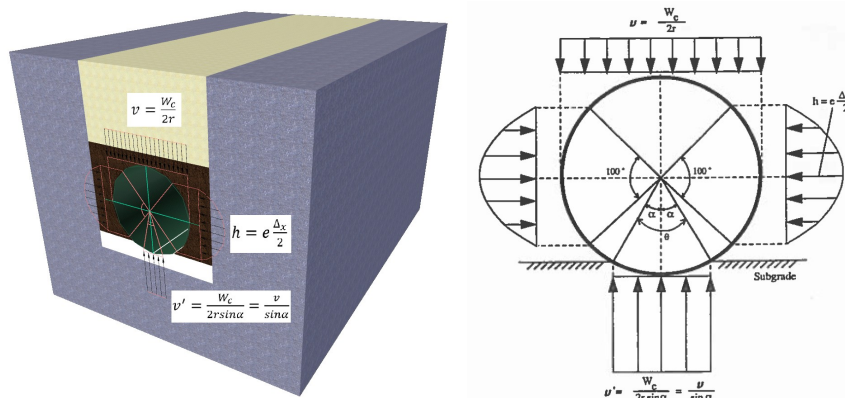


Figura 1-3: Hipótesis de distribución de esfuerzos de Spangler (Spangler, 1948)

1.4.4.1. Ecuación para determinar la deflexión horizontal

Llamada como la ecuación modificada de IOWA y la cual es la más utilizada se muestra a continuación:

$$\frac{\Delta X}{D_e} \% = \frac{K_z [D_L (W_r + P_L)] r^3}{EI + 0.061 E' r^3} \quad (\text{Ec. 1-7})$$

Donde:

ΔX : Deflexión horizontal de la tubería (m);

D_e : Diámetro exterior de la tubería (m);

K_z : *Bedding constant* (constante del efecto de la cama de la tubería);

D_L : Factor de deflexión por tiempo instalado (30% en 40 años = 1.5) (1 - 1.5);

W_r : Peso del relleno sobre la tubería, por unidad de longitud (kN/m);

P_L : Carga superficial transmitida a tubería, por unidad de longitud (kN/m);

r: Radio medio de la tubería (m);

E: Módulo de elasticidad de la tubería (kPa);

I: Momento de inercia de la tubería, $\sim t^3/12$ (m³);

t: Espesor de la tubería (m);

E': Módulo de reacción del suelo (kPa).

La (Ec. 1-7) relaciona la carga vertical sobre la tubería con: la rigidez de la tubería (EI) y con la rigidez del suelo ($0.061E'r^3$); la rigidez del suelo está basada en el llamado módulo de reacción del suelo (E'), lo cual no es una propiedad intrínseca del suelo por que depende de la presión lateral del suelo sobre la tubería y el radio de la tubería ($E'=er$) siendo este el producto del módulo de resistencia pasiva del suelo (e) con el radio medio de la tubería (r) y su valor es variable a diferentes profundidades.

ΔX , Deflexión horizontal: Como se mencionó anteriormente, la tubería de acero está diseñada como un componente flexible, por lo que se puede producir una deflexión significativa sin dañar la tubería. En la práctica se ha limitado la deflexión calculada al 5%, aunque las deflexiones más grandes pueden que no afecten la estabilidad de la tubería. Las limitaciones de deflexión son una función de la rigidez del revestimiento que se utilizan, por lo que el valor del 5% será menor cuando se considera no dañar el revestimiento alcanzando hasta un 2%.

D_L , Factor de deflexión por tiempo instalado: Este factor es un multiplicador subjetivo que se utiliza para definir la deflexión proyectada a largo plazo de una tubería en función de la deflexión calculada en el momento de la instalación. Con un relleno bien compactado es común usar un factor de 1.0,

particularmente cuando se tiene una tubería presurizada cuya presión interna tenderá a redondear la tubería mientras está en servicio.

K_z , Bedding constant: Esta constante depende de la medida del ángulo entre los puntos de intersección entre la línea circunferencial media de la tubería con la línea horizontal superior de la cama donde la tubería se entierra parcialmente y se denota como (2α) . Mientras mayor es el valor del ángulo, con una cama mejorada, el soporte a la tubería mejora y se reduce la deflexión. El rango de K_z es de 0.110 para tubería tendida sobre un fondo plano de zanja (sin cama) a 0.083 para la tubería apoyada en la zona lateral de la tubería. Para las condiciones típicas que se encuentran en la instalación de tubería de acero, un valor de diseño conservador de K es 0.10 para un ángulo de 30° . Es importante precisar que este valor tiene mayor influencia al momento que la tubería es colocada sobre la cama de suelo preparado y justo después del retiro de los *struts* o soportes internos de la tubería colocados para su transporte.

Este valor puede ser calculado empíricamente por el desarrollo de la siguiente ecuación, la cual depende de la mitad del ángulo (2α) y se denota como (α) :

$$K_z = 0.5 \sin(\alpha)^2 - 0.082 \sin(\alpha)^2 + 0.08 \left(\frac{\alpha}{\sin(\alpha)} \right) - 0.16 \sin(\alpha) (\pi - \alpha) - 0.04 \left(\frac{\sin(2\alpha)}{\sin(\alpha)} \right) + 0.318 \cos(\alpha) - 0.208 \quad (\text{Ec. 1-8})$$

W_T : Peso total del terreno sobre la tubería. Es la carga estática producida por el relleno aplicado al tope de la tubería y su valor se calcula a partir de la (Ec. 1-1) o (Ec. 1-2).

W_L : Carga transitoria superficial. Es la carga superficial sobre la zanja. A menos que se consideren infraestructuras próximas a la zanja, este valor es transitorio y puede ser debido al cruce de vehículos sobre la zanja o por la falla propia del relleno o suelo próximo a la zanja.

Para el caso de la carga superficial debido a vehículos se considera la aplicación de una fuerza del neumático distribuida a lo largo de la huella de contacto con la zanja y para obtener su valor se aplican las ecuaciones (Ec. 1-3) o (Ec. 1-6).

E' : Módulo de reacción del suelo. Es una medida empírica de la resistencia al movimiento de un suelo compactado dado. La modificación del valor de E' , la cual es conseguida mejorando el material de relleno y/o mejorando el nivel de compactación, es la forma más común y más rentable de mejorar la rigidez del sistema de tubería / relleno. En los últimos años, los diseñadores han tomado nota del aumento inherente del valor E' en relación con el aumento de la profundidad de cobertura. En particular, (Hartley, Asce, Duncan, & Asce, 1988) de la Universidad de California, Berkeley, publicaron la Evaluación del módulo de reacción del suelo, E' , y su variación con la profundidad. Su investigación definió E' como una función

del tipo de suelo, el grado de compactación y la profundidad de cobertura, H, como se muestra a continuación. Sus resultados se enumeran en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: Valores de diseño de E' (psi). Fuente AASHTO adaptada de (AWWA M11, 2005)

Type of soil	Depth of Cover		85%		90%		95%		100%	
	ft	(m)	psi	(kPa)	psi	(kPa)	psi	(kPa)	psi	(kPa)
Fine-grained soils with less than 25% sand content (CL, ML, CL-ML)	2-5	(0.06-0.5)	500	(3,450)	700	(4,830)	1,000	(6,895)	1,500	(10,340)
	5-10	(1.5-3.1)	600	(4,140)	1,000	(6,895)	1,400	(9,655)	2,000	(13,790)
	10-15	(3.1-4.6)	700	(4,830)	1,200	(8,275)	1,600	(11,030)	2,300	(15,860)
	15-20	(4.6-6.1)	800	(5,520)	1,300	(8,965)	1,800	(12,410)	2,600	(17,930)
Coarse-grained soils with fines (SM, SC)	2-5	(0.06-1.5)	600	(4,140)	1,000	(6,895)	1,200	(8,275)	1,900	(13,100)
	5-10	(1.5-3.1)	900	(6,205)	1,400	(9,655)	1,800	(12,410)	2,700	(18,615)
	10-15	(3.1-4.6)	1,000	(6,895)	1,500	(10,340)	2,100	(14,480)	3,200	(22,065)
	15-20	(4.6-6.1)	1,100	(7,585)	1,600	(11,030)	2,400	(16,545)	3,700	(25,510)
Coarse-grained soils with little or no fines (SP, SM, GP, GW)	2-5	(0.06-1.5)	700	(4,830)	1,000	(6,895)	1,600	(11,030)	2,500	(17,235)
	5-10	(1.5-3.1)	1,000	(6,895)	1,500	(10,340)	2,200	(15,170)	3,300	(22,750)
	10-15	(3.1-4.6)	1,050	(7,240)	1,600	(11,030)	2,400	(16,545)	3,600	(24,820)
	15-20	(4.6-6.1)	1,100	(7,585)	1,700	(11,720)	2,500	(17,235)	3,800	(26,200)

Estos valores resultan ser conservativos y aplicables para la etapa de diseño cuando se quieren estimar valores de deflexión, sin embargo, es limitativo a algunos tipos de suelos lo cual, para realizar diseños más confiables resultan ser poco aplicables. Por este motivo, (Krizek, Parmelee, Kay, & Elnaggar, 1971) sugiere el uso del *Constrained Modulus* (M_s) el cual ha sido usado con mayor frecuencia debido a que su valor es una propiedad constitutiva del material y se mide como la pendiente de la secante del diagrama tensión-deformación obtenido de una prueba de compresión confinada del suelo. También se puede calcular a partir del módulo de Young E_s , y la relación de Poisson del suelo ν_s mediante la siguiente expresión:

$$M_s = \frac{E_s(1 - \nu_s)}{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)} \quad (\text{Ec. 1-9})$$

Donde:

M_s : Constrained Modulus (kPa);

E_s : Módulo de elasticidad del suelo (kPa);

ν_s : Coeficiente de poisson del suelo.

Debido a que M_s es tomado como el módulo secante, este toma en parte la no linealidad del suelo desde un diagrama de esfuerzo-deformación producto de un análisis triaxial en laboratorio.

La determinación de M_s está basada en la carga aplicada sobre la tubería. De acuerdo a las conclusiones de varias investigaciones se conoce que E' se encuentra en el rango de $0.7M_s$ y $1.5M_s$. El estándar (AWWA M11, 2005) sugiere considerar $E'=M_s$.

Valores típicos del módulo de suelo E_s basado en (Obrzud & Truty, 2018) se muestran valores para suelos granulares (Tabla 1-5) y suelos cohesivos (Tabla 1-6).

Tabla 1-5: Valores de diseño del módulo del suelo E_s , materiales granulares (MPa)

USCS	DESCRIPTION	LOOSE	MEDIUM	DENSE
GW, SW	Gravels/Sand well-graded	30-80	80-160	160-320
SP	Sand, uniform	10 - 10	30-50	50-80
GM, SM	Sand/Gravel silty	7-12	12-20	20-30

Tabla 1-6: Valores de diseño del módulo del suelo E_s , materiales cohesivos (MPa)

USCS	DESCRIPTION	VERY SOFT	SOFT TO MEDIUM	STIFF TO VERY STIFF	HARD
ML	Silts with slight plasticity	2.5 - 8	10-15	15 -40	40 - 80
ML, CL	Silts with low plasticity	1.5 - 6	6-10	10-30	30 -60
CL	Clays with low-medium plasticity	0.5 - 5	5-8	8-30	30 - 70
CH	Clays with high plasticity	0.35 - 4	4-7	7-20	20 - 32
OL	Organic silts	-	0.5 -5	-	-
OH	Organic clays	-	0.5 -4	-	-

1.4.4.2. Ecuación para determinar la deflexión vertical

Al igual que la ecuación (Ec. 1-7), también fue originalmente planteada por (Spangler, 1948), sin embargo, una investigación formulada por el ingeniero Teruhisa Masada (Masada, 2000) de la universidad de OHIO plantea la siguiente ecuación para determinar la deflexión vertical la cual se muestra a continuación:

$$\frac{\Delta Y}{D_e} \% = \frac{0.119hr^4}{EI} + \frac{J(W_r + P_L)r^3}{EI} \quad (\text{Ec. 1-10})$$

Donde,

ΔY : Deflexión vertical de la tubería (m),

D_e : Diámetro exterior de la tubería (m).

J : Coeficiente de deflexión vertical;

h : Presión lateral del suelo ejercido sobre la tubería;

W_r : Peso del relleno sobre la tubería, por unidad de longitud (kN/m);

P_L : Carga superficial transmitida a tubería, por unidad de longitud (kN/m);

r: Radio medio de la tubería (m);

E: Módulo de elasticidad de la tubería (kPa);

I: Momento de inercia de la tubería, $\sim t^3/12$ (m³);

t: Espesor de la tubería (m);

J: Coeficiente de deflexión vertical. Esta nueva constante, así como la constante K_z , depende también del ángulo de la cama de la tubería (2α) y su valor es aproximadamente similar al coeficiente K_z , por lo que para propósitos prácticos se pueden considerar iguales, sin embargo, para obtener valores mas precisos se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$J = -0.434 + 0.25\alpha + 0.318\cos\alpha + \frac{0.08\alpha}{\sin\alpha} + \frac{0.167(\cos\alpha - 1)}{\sin\alpha} - \frac{\sin 2\alpha}{\sin\alpha}(0.04 + 0.125\sin\alpha) + \sin\alpha(-0.25 + 0.159\alpha + 0.333\cos\alpha) \quad (\text{Ec. 1-11})$$

h: Presión lateral del suelo. Se le conoce como la presión lateral ejercida por el suelo compactado sobre la zona lateral de la tubería como se muestra en la Figura 1-3 y cuyo valor se puede calcular desde el valor de la deflexión horizontal de la tubería ΔX , el módulo de reacción del suelo (E') y el radio medio de la tubería (r). Ver la siguiente ecuación:

$$h = 0.5 \frac{E'}{r} \Delta X \quad (\text{Ec. 1-12})$$

1.4.5. Esfuerzo de flexión

Se tiene muchas limitaciones para determinar el esfuerzo de flexión en una tubería enterrada. Un método aproximativo para determinar el esfuerzo circunferencial en la base de la tubería fue desarrollado por (Spangler, 1964) por medio de la teoría de la elasticidad, sin embargo, investigaciones posteriores, complementan un componente adicional el cual es la rigidez del suelo por medio del módulo de reacción del suelo (Warman et al., 2009). La ecuación propuesta es la mostrada a continuación:

$$\sigma = \frac{6K_b(W_r + P_L)Etr}{Et^3 + 24K_zpr^3 + 0.732E'r^3} \quad (\text{Ec. 1-13})$$

Donde:

K_b : Parámetro de momento;

K_z : Bedding constant;

W_r : Peso del relleno sobre la tubería, por unidad de longitud (kN/m);

P_L : Carga superficial transmitida a tubería, por unidad de longitud (kN/m);

r : Radio medio de la tubería (m);

E : Módulo de elasticidad de la tubería (kPa);

t : Espesor de la tubería (m);

p : Presión interna en la tubería (kPa).

La (Ec. 1-13) tiene como limitación que solo determina el esfuerzo de flexión en la base de la tubería y su valor podría ser un índice para verificación de la tubería, sin embargo, no es muy práctico para diseño puesto que no necesariamente es el valor máximo al cual está sometido a la tubería en su circunferencia ya que fue planteada a partir del diagrama mostrado en la Figura 1-3. Para efectos de esta investigación, podría ser útil como estimaciones comparativas con los resultados experimentales y con los obtenidos por el FEM, motivo por el cual se describe en este documento.

1.4.6. Pandeo

Uno de los métodos más aplicables para el diseño de tuberías enterradas es aproximando su valor límite al pandeo y compararlo con la carga máxima a la que está sometida la tubería por efectos del relleno, las cargas superficiales, y para algunos casos considerar la presión de vacío. El método se encuentra descrito en el estándar (AWWA M11, 2005) y se resume a continuación determinando la presión de pandeo disponible q_a , ver (Ec. 1-14), cuyo valor debe ser mayor a la sumatoria de las cargas externas estáticas con las cargas superficiales, ver (Ec. 1-15).

$$q_a = \left(\frac{1}{FS} \right) \left(32R_w B' E' \frac{EI}{D_e^3} \right)^{1/2} \quad (\text{Ec. 1-14})$$

Donde:

q_a : Presión de pandeo disponible (kPa);

FS : 2;

D_e : Diámetro exterior de la tubería (m);

R_w : Factor del nivel freático del agua;

$$R_w = 1 - 0.33 \left(\frac{h_w}{H} \right), 0 \leq h_w \leq H$$

h_w : Altura desde el tope de la tubería al nivel freático (m);

H: Altura del relleno sobre el tope de la tubería (m).

B': Coeficiente empírico de soporte elástico.

$$B' = \frac{1}{1 + 4e^{-0.213H}}$$

E': Módulo de reacción del suelo (kPa).

E: Módulo de elasticidad de la tubería (kPa);

I: Momento de inercia de la tubería, $\sim t^3/12$ (mm³);

$$\rho_r H g + R_w \frac{W_r}{D_e} + \frac{P_L}{D_e} \leq q_a \quad (\text{Ec. 1-15})$$

Donde:

ρ_r : Densidad del relleno de la zanja (kg/m³);

g : Aceleración de la gravedad (m/s²);

W_r : Peso del relleno sobre la tubería, por unidad de longitud (kN/m);

P_L : Carga superficial transmitida a tubería, por unidad de longitud (kN/m).

La presente investigación no considera el análisis de pandeo de tuberías enterradas por el método de elementos finitos, sin embargo, se describe en el presente documento como informativo para cálculos aproximativos.

CAPÍTULO 2

Características y comportamiento de las tuberías de acero y del terreno/relleno

2.1. Tuberías de acero

Las tuberías son conductos circulares a través del cual se transportan fluidos como los newtonianos como el agua y no newtonianos como lubricantes o relaves, todos ellos muy utilizados en minería. En minería, el acero es uno de los materiales más utilizados para tuberías, siguiéndole las tuberías de HDPE como las más importantes.

Los materiales de tuberías más comunes son seleccionados según el tipo de fluido a transportar, presión y temperatura de transporte, y en minería es común definirlos como una determinada clase de servicio, teniendo para distintas condiciones de operación y fluidos distintos materiales y espesores de pared pre establecidos para el diseño. Para el caso del transporte de agua, los materiales comúnmente utilizados en minería son los mostrados en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Tabulation of Examples of Allowable Stresses for Reference Use in Piping Systems Table-403.2.1-1 (ASME B31.4, 2019)

SPECIFICATION	GRADE	SPECIFIED YIELD STRENGTH, PSI (MPA)	MIN. STRENGTH, PSI (MPA)	WELD JOINT FACTOR, E	ALLOWABLE STRESS VALUE, S, -20°F TO 250°F (-30°C TO 120°C) PSI (MPA)
<i>Seamless</i>					
API 5L	A25	25,000 (172)		1	18,000 (124)
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 106	A	30,000 (207)		1	21,600 (149)
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 106	B	35,000 (241)		1	25,200 (174)
API 5L	X42	42,000 (289)		1	30,250 (208)
API 5L	X46	46,000 (317)		1	33,100 (228)
API 5L	X52	52,000 (358)		1	37,450 (258)
API 5L	X56	56,000 (386)		1	40,300 (278)
API 5L	X60	60,000 (413)		1	43,200 (298)
API 5L	X65	65,000 (448)		1	46,800 (323)
API 5L	X70	70,000 (482)		1	50,400 (347)
API 5L	X80	80,000 (551)		1	57,600 (397)
ASTM A 106	C	40,000 (278)		1	28,800 (199)
ASTM A 333	6	35,000 (241)		1	25,200 (174)
ASTM A 524	I	35,000 (241)		1	25,200 (174)
ASTM A 524	H	30,000 (207)		1	21,600 (149)
<i>Electric Resistance Welded and Electric Flash Welded</i>					
API 5L	A25	25,000 (172)		1	18,000 (124)
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 135	A	30,000 (207)		1	21,600 (149)
API 5L, ASTM A 53, ASTM A 135	B	35,000 (241)		1	25,200 (174)
API 5L	X42	42,000 (289)		1	30,250 (208)

SPECIFICATION	GRADE	SPECIFIED YIELD STRENGTH, PSI (MPA)	MIN. STRENGTH, PSI (MPA)	WELD JOINT FACTOR, E	ALLOWABLE STRESS VALUE, S, -20°F TO 250°F (-30°C TO 120°C) PSI (MPA)
API 5L	X46	46,000 (317)		1	33,100 (228)
API 5L	X52	52,000 (358)		1	37,450 (258)
API 5L	X56	56,000 (386)		1	40,300 (279)
API 5L	X60	60,000 (413)		1	43,200 (297)
API 5L	X65	65,000 (448)		1	46,800 (323)
API 5L	X70	70,000 (482)		1	50,400 (347)
API 5L	X80	80,000 (551)		1	57,600 (397)
ASTM A 333	6	35,000 (241)		1	25,000 (174)

Para determinar la selección adecuada del tipo de material, se consideran como parámetros de diseño la presión interna, temperatura de operación, presiones transitorias como vacíos, sismos y cargas externas.

En el transporte de agua o agua con bajo contenido de sólidos, el proceso de diseño y selección común de los espesores de pared de tuberías se muestra en el estándar (AWWA M11, 2005), sin embargo, es común usar también de referencia el estándar (ASME B31.4, 2019) para transporte de largas distancias de líquidos y lodos, lo cual se resume en la siguiente ecuación.

$$t = \frac{P_i D_e}{2S} \quad (\text{Ec. 2-1})$$

Donde:

t: Mínimo espesor de tubería, seleccionar espesor nominal mayor (m);

P_i : Presión interna de diseño (kPa);

D_e : Diámetro exterior de la tubería (m);

S: Esfuerzo de diseño admisible de la tubería, considerar factores de desgaste (kPa).

La (Ec. 2-1) no considera los efectos transitorios ni los factores externos ocasionales sobre la tubería, por lo que el diseñador deberá verificar el espesor nominal seleccionado. Los valores nominales de espesores se resumen en la Tabla 2-2 los cuales están basados en las dimensiones estandarizadas en la norma (ASME B36.10, 2004).

Tabla 2-2: Tabla resumen de espesores de pared según estándar, en pulgadas (ASME B36.10, 2004) para diámetros nominales de tuberías de acero hasta 48"

NPS		SCHEDULE											WEIGHT		
[mm]	[in]	5	10	20	30	40	60	80	100	120	140	160	STD	XS	XXS
80	3	0.083	0.120		0.188	0.216		0.300				0.438	0.216	0.300	0.600
90	3 1/2	0.083	0.120		0.188	0.226		0.318					0.226	0.318	
100	4	0.083	0.120		0.188	0.237		0.337		0.438		0.531	0.237	0.377	0.674
125	5	0.109	0.134			0.258		0.375		0.500		0.625	0.258	0.375	0.750
150	6	0.109	0.134			0.280		0.432		0.562		0.719	0.280	0.432	0.864
200	8	0.109	0.148	0.250	0.277	0.322	0.406	0.500	0.594	0.719	0.812	0.906	0.322	0.500	0.875
250	10	0.134	0.165	0.250	0.307	0.365	0.500	0.594	0.719	0.844	1.000	1.125	0.365	0.500	1.000
300	12	0.156	0.180	0.250	0.330	0.406	0.562	0.688	0.844	1.000	1.125	1.312	0.375	0.500	1.000
350	14	0.156	0.250	0.312	0.375	0.438	0.594	0.750	0.938	1.094	1.250	1.406	0.375	0.500	
400	16	0.165	0.250	0.312	0.375	0.500	0.656	0.844	1.031	1.219	1.438	1.594	0.375	0.500	
450	18	0.165	0.250	0.312	0.438	0.562	0.750	0.938	1.156	1.375	1.562	1.781	0.375	0.500	
500	20	0.188	0.250	0.375	0.500	0.594	0.812	1.031	1.281	1.500	1.750	1.969	0.375	0.500	
550	22	0.188	0.250	0.375	0.500		0.875	1.125	1.375	1.625	1.875	2.125	0.375	0.500	
600	24	0.218	0.250	0.375	0.562	0.688	0.969	1.219	1.531	1.812	2.062	2.344	0.375	0.500	
650	26		0.312	0.500									0.375	0.500	
700	28		0.312	0.500	0.625								0.375	0.500	
750	30	0.250	0.312	0.500	0.625								0.375	0.500	
800	32		0.312	0.500	0.625	0.688							0.375	0.500	
850	34		0.312	0.500	0.625	0.688							0.375	0.500	
900	36		0.312	0.500	0.625	0.750							0.375	0.500	
950	38												0.375	0.500	
1000	40												0.375	0.500	
1050	42												0.375	0.500	
1100	44												0.375	0.500	
1150	46												0.375	0.500	
1200	48												0.375	0.500	

En el caso de las tuberías enterradas, para la validación del espesor de la tubería ver el CAPÍTULO 1.

2.1.1. Comportamiento físico de las tuberías de acero

El acero es uno de los materiales de las tuberías más utilizadas en la industria. Las especificaciones que cubren la mayor parte de las tuberías utilizadas son publicadas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) y la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME).

La especificación del Material para tuberías de Acero al Carbono ASTM A106 sin costura está disponible en grados, A, B, y C. Estos grados se refieren a la resistencia a la tracción del acero, el grado C es el que tiene la mayor resistencia. Es práctica común fabricar la tubería como A106 Grado B.

ASTM A53 también se especifica comúnmente para tubería galvanizada o revestida o como una alternativa a la A106. Los requisitos de pruebas para ASTM A53 son menos estrictas que para el A106. Tres tipos de tubería de acero al carbono están cubiertos por ASTM A53. Estos son el tipo ERW (soldadas por resistencia eléctrica), de tipo F (con costura), y el tipo S (sin costura).

Los espesores comúnmente utilizados para diseño de tuberías para transporte de fluidos líquidos son las denominaciones *Extra Strong (XS)* o *Schedule (SCH) 80* para tuberías menores a 3" y de las denominaciones *Standard Weight (STD)* o *Schedule (SCH) 40* para tuberías mayores e iguales a 3", para diámetros mayores a 36" se utiliza solo espesores de la designación STD o XS.

La Figura 2-1 muestra varias partes de una curva tensión-deformación (prueba de tensión pura) para acero. El cambio de forma de la pieza durante la prueba está indicado por las barras dibujadas debajo de la curva. A medida que la barra se estira, la sección transversal disminuye en área hasta la máxima resistencia a la tracción, en cuyo punto tiene lugar la reducción local del área (estrechamiento).

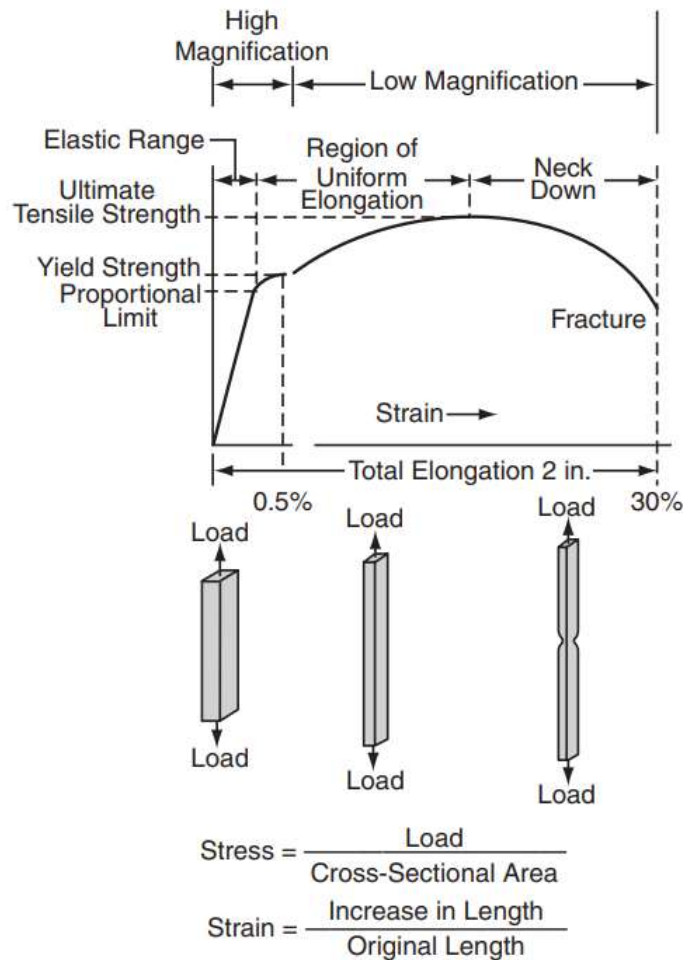


Figura 2-1: Diagrama Esfuerzo-Deformación (acero). Fuente: (AWWA M11, 2005)

Las tuberías de acero, son materiales elastoplásticos con comportamiento isotrópico y homogéneo a lo largo de toda la sección de la tubería. Como se mencionó en el CAPÍTULO 1, se recomienda para diseño considerar una operación de la tubería en su rango elástico considerando un factor de diseño de 2 o no superar el 50% del esfuerzo de fluencia o estar por debajo del esfuerzo admisible de la tubería.

2.1.2. Modelo elástico lineal

EL comportamiento elástico se modela dentro de su comportamiento lineal e isotrópico y su expresión matemática es la siguiente:

$$\sigma = D\varepsilon \quad (\text{Ec. 2-2})$$

Donde:

σ : Vector de tensiones elásticas;

D : Matriz constitutiva elástica;

ε : Vector de deformaciones elásticas.

La matriz constitutiva se constituye por los parámetros que definen el material en su rango elástico: Módulo de Young o módulo elástico (E) y el coeficiente de Poisson (ν). La expresión de la (Ec. 2-2) resume la primera parte de la curva mostrada en la Figura 2-1 ya que su comportamiento se encuentra dentro de las pequeñas deformaciones y es donde se encuentran los cálculos de dimensionamiento que se requiere realizar (Abaqus, 2013).

Las propiedades constitutivas de las tuberías más comunes para uso de transporte de fluidos líquidos se resumen en la Tabla 2-3. El análisis paramétrico propuesto y desarrollado en el CAPÍTULO 6 utilizará el material A53 Gr.B.

Tabla 2-3: Propiedades constitutivas del acero. Fuente: (ASME B31.3, 2014)

Materiales Tubería	Esfuerzo Tensión	Esfuerzo Fluencia	Esfuerzo Admisible	Módulo de elasticidad	de	Coficiente de Poisson
	MPa	MPa	S (Mpa) Hasta 40°C	A 21°C MPa		
A53 Gr.B	414	241	138	2.0340E+05		0.3
A106 Gr.B	414	241	138	2.0340E+05		0.3

2.2. Terreno - Relleno en zanjas

Los materiales más comunes para su uso como relleno de una zanja se resumen en la sección 1.3. Los cálculos analíticos más utilizados para tuberías enterradas en zanjas simplifican el comportamiento del relleno en su estado elástico lineal, sin embargo, en la realidad, los suelos tienen un comportamiento elastoplástico y además de las propiedades constitutivas del material, este es afectado por varios factores como la temperatura, la humedad, entre otros. Existen modelos matemáticos que permiten aproximar el comportamiento plástico del suelo y para poder resolverlos se utilizan comúnmente el método de los elementos finitos. Los modelos constitutivos elastoplásticos comúnmente usados son el modelo de Mohr-Coulomb así como el modelo de Drucker y Prager, los cuales son modelos que consideran el factor rozamiento interno y dan resultados con una precisión aceptable (Kawabata et al., 2008) (Liu, Zheng, Zhang, & Shi, 2010) (Moser & Folkman, 2008); existen también otros modelos los cuales no forman parte de la presente investigación. Mayor detalle sobre los modelos mencionados se puede revisar en el libro “*Plasticity and Geotechnics*” (Yu, 2006) o el libro “*Continuum mechanics for engineers, theory and problems*” (Oliver, 2017) de los cuales se hace un resumen a continuación.

2.2.1. Comportamiento físico del suelo

El comportamiento del suelo, dentro del campo elastoplástico, es distinto al tipo del suelo, su grado de saturación, de la evolución de su estado con el tiempo, de la carga aplicada y de su estado crítico. A continuación, se resumen dos de las más grandes categorías de suelos que son los arenosos (SW) y los arcillosos (CL).

En las Figura 2-2 y Figura 2-3 se muestran el comportamiento de la arena y de la arcilla, y a pesar de ser estudios de suelos compuestos, estos resumen adecuadamente el estado de deformaciones debido a cambios en los esfuerzos y deformación volumétrica del suelo.

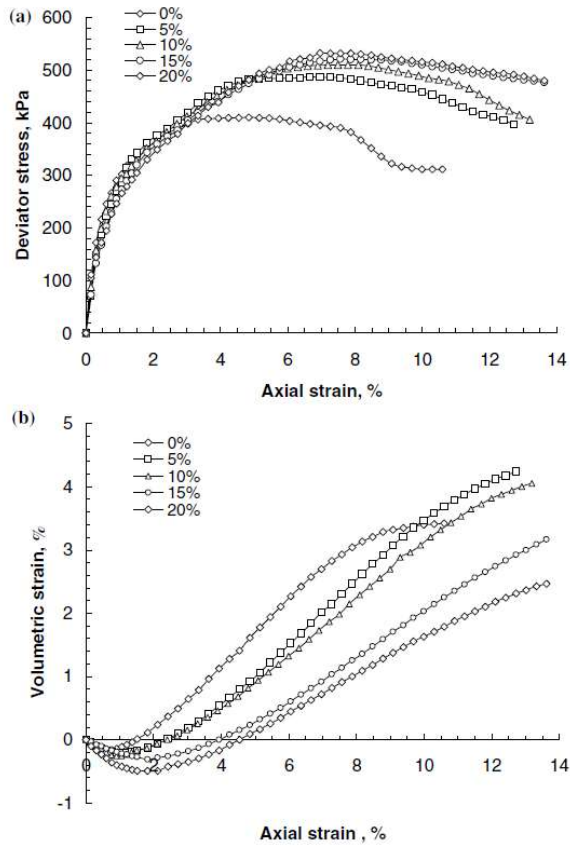


Figura 2-2: Curva Esfuerzo-deformación-volumen de la Arena bajo un estudio triaxial a 138 kPa (Rao & Dutta, 2006)

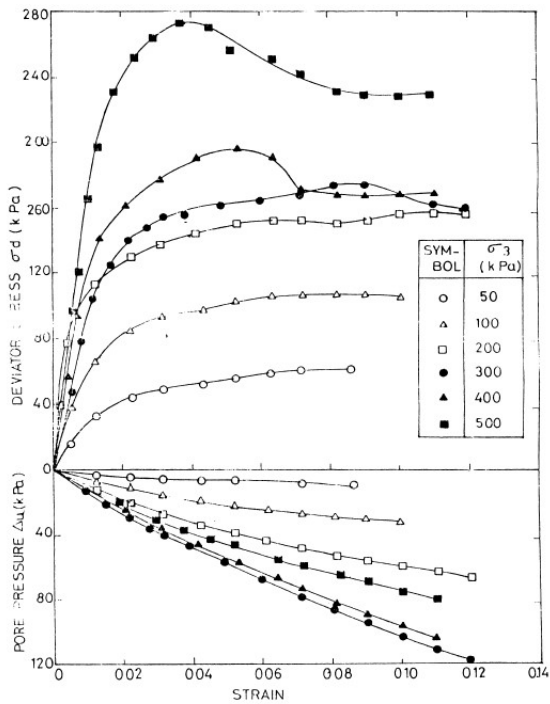


Figura 2-3: Curva Esfuerzo-deformación-volumen de la arcilla marina de Mangalore bajo un estudio triaxial (ABRAHAM, 1993)

Como se puede observar de la Figura 2-2 y de la Figura 2-3, en la curva de esfuerzo-deformación, la arena en su zona plástica no muestra muchos cambios en forma que lo que muestra la arcilla, sin embargo, esto no sucede en los cambios volumétricos donde la arena tiende a disminuir en volumen en la zona elástica mientras que, cuando pasa a la zona plástica el volumen incrementa, y por lo contrario, la arcilla disminuye su volumen tanto en su zona elástica como en la zona plástica y esto debido a que en el proceso de compresión, la arcilla pierde humedad.

Algunas propiedades de la plasticidad se describen a continuación:

2.2.1.1. Criterio de fluencia

La condición que define el límite elástico y el comienzo de la plastificación de un material sometido a una combinación de esfuerzos es conocida como condición de fluencia o criterio de fluencia.

Para un caso de carga en una-dimensión, el criterio de fluencia es definido por un valor de esfuerzo bajo el cual ocurrirá la deformación plástica, es decir, el criterio de fluencia es gráficamente representado por un punto. Para el caso de cargas en dos-dimensiones, la fluencia ocurrirá cuando la combinación de esfuerzos en el plano alcance a tocar una curva; finalmente, para el caso de aplicación de esfuerzos en tres dimensiones, la fluencia ocurrirá cuando se alcance una superficie en el espacio de esfuerzos, y de acuerdo a lo último, cuando el estado de esfuerzos se encuentra dentro de la superficie, el comportamiento del material es elástico y si se encuentra fuera del espacio de la superficie ocurre la plastificación.

La forma del criterio de fluencia tridimensional puede ser expresado en función al tensor de esfuerzos o las invariantes de esfuerzos.

$$f(\sigma_{ij}) = f(I_1, I_2, I_3) = 0 \quad (\text{Ec. 2-3})$$

2.2.1.2. Potencial plástico y la regla de flujo plástico

Una de las preguntas clave necesaria a responder es cómo determinar la deformación plástica una vez el estado de esfuerzos esté sobre la superficie de fluencia. La teoría más usada es asumir que la ratio de deformación plástica (o incremento) puede ser determinado por la siguiente fórmula (Von Mises, 1928; Melan, 1938; Hill, 1950):

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{Ec. 2-4})$$

Donde:

$d\lambda$: es un escalar positivo y,

$$g = g(\sigma_{ij}) = g(I_1, I_2, I_3) = 0.$$

“g” es conocido como el potencial plástico y puede o no ser igual a la superficie de fluencia. Según las observaciones de Saint-Venant (1870), para metales, el eje principal del ratio de deformación plástica coincide con el de los esfuerzos. Esto último es también conocido como la “asunción coaxial”, sin embargo, datos experimentales sugieren que esta asunción coaxial es generalmente no válida para suelos (Hau-Sui Yu; 2006).

Si el potencial plástico es igual a la superficie de fluencia, la regla de flujo plástico es llamada regla de flujo asociado, de lo contrario es llamado regla de flujo no asociado.

2.2.1.3. **Endurecimiento por deformación y plasticidad perfecta**

La deformación elástica lleva al endurecimiento del material y al incremento de su límite elástico, es decir, la superficie de fluencia generalmente no será fija en el espacio de esfuerzos, ya que este se expandirá o contraerá dependiendo de deformaciones plásticas previas al historial de carga.

Un endurecimiento isotrópico considera una deformación plástica con cambio en su tamaño de forma similar en todas sus direcciones, sin cambiar de forma. Si la superficie de fluencia se expande, el material se endurece, haciendo difícil la fluencia y, por lo contrario, si la superficie de fluencia se contrae en tamaño, el material está sometido a un ablandamiento, haciendo más fácil la fluencia.

La superficie de fluencia, para un material con endurecimiento o ablandamiento por deformación es también llamado “La superficie de carga”. Matemáticamente, la superficie de carga, la cual cambia con la deformación plástica, puede ser expresada matemáticamente como:

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0 \quad (\text{Ec. 2-5})$$

Donde:

ε_{ij}^p : Denota el tensor de deformación plástica.

Si la superficie de fluencia no cambia de forma bajo un histórico de esfuerzos, el material es conocido como un sólido perfectamente plástico. Este es un caso especial de materiales con endurecimiento por deformación, para un material perfectamente plástico, el comportamiento es elástico cuando el estado de esfuerzos descansa dentro de la superficie de fluencia y la deformación plástica ocurrirá cuando el estado de esfuerzos esté sobre o a lo largo de la superficie de fluencia. La condición de esfuerzos para comportamiento plástico y elástico puede ser definido como:

$$\text{Elastica: } f(\sigma_{ij}) < 0 \text{ o } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \partial \sigma_{ij} < 0 \quad (\text{Ec. 2-6})$$

$$\text{Plástica: } f(\sigma_{ij}) = 0 \text{ y } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \partial \sigma_{ij} = 0 \quad (\text{Ec. 2-7})$$

La completa condición de esfuerzos para el comportamiento plástico y elástico para materiales con endurecimiento por deformación son:

$$\text{Elástica: } f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) < 0 \text{ o } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \partial \sigma_{ij} \leq 0 \quad (\text{Ec. 2-8})$$

$$\text{Plástica: } f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0 \text{ y } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \partial \sigma_{ij} > 0 \quad (\text{Ec. 2-9})$$

Para resolver los problemas con valores de contorno que involucran el comportamiento elastoplástico, es esencial determinar claramente qué comportamiento resultará desde un incremento de esfuerzo adicional cuando el estado de esfuerzos se encuentre sobre la superficie de fluencia, Tres posibles condiciones existen y son:

$$\text{Descarga: } f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0 \text{ y } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \partial \sigma_{ij} < 0 \quad (\text{Ec. 2-10})$$

$$\text{Carga neutral: } f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0 \text{ y } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \partial \sigma_{ij} = 0 \quad (\text{Ec. 2-11})$$

$$\text{Con carga: } f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0 \text{ y } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \partial \sigma_{ij} > 0 \quad (\text{Ec. 2-12})$$

Es comúnmente asumido que, para la descarga y carga neutral, el comportamiento del material es completamente elástico. El comportamiento plástico ocurre solo cuando la condición de carga es satisfecha.

2.2.2. Modelos de criterios de fluencia.

Para cada modelo de plasticidad, es necesario la definición de diferentes parámetros como el criterio de fluencia, la regla de endurecimiento y la regla de flujo, los mismos que se explican en la sección 0.

Respecto a los criterios de fluencia, el comportamiento de los materiales es diferente cuando están sujetos a condiciones de carga multiaxial. Los materiales pueden ser dependientes de la presión o independientes de la misma. Para materiales que no dependen de la presión el criterio de fluencia está definido en términos de la segunda invariante del desviador de tensiones (J2) y son independientes de la primera invariante de esfuerzos (I1). La presión hidrostática afectaría la fluencia en algunos modelos de materiales como Rankin, Mohr-Coulomb, y Druker-Prager en el cual el comportamiento del material

depende de la presión. Los materiales los cuales son independientes de (I1) son sensibles al desviador de tensiones. Los criterios de fluencia los cuales son independientes de (I1) son el criterio de Tresca y el de Von Mises.

2.2.2.1. Criterio de fluencia de Mohr Coulomb.

Propuesto por el matemático-físico francés Charles-Augustin de Coulomb en 1776 y por las posteriores aportaciones del ingeniero alemán Christian Otto Mohr en 1882. El criterio relaciona los esfuerzos triaxiales máximo y mínimo con el ángulo de fricción ϕ y la cohesión c del material cuya expresión se muestra en la ecuación (Ec. 2-13) y la representación gráfica es una circunferencia perpendicular al eje hidrostático el cual es la mitad del primer invariante del tensor de tensiones como se muestra en la Figura 2-5.

$$F = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sin\phi(\sigma_1 + \sigma_3) - 2c(\cos\phi) \quad (\text{Ec. 2-13})$$

Cuando no se considera el ángulo de fricción, es decir, $\phi = 0$, la expresión se resume en el conocido criterio de Tresca.

Este criterio es el más utilizado ya que los valores del el ángulo de fricción ϕ y la cohesión c son fácilmente obtenidos por medio de los esfuerzos máximos y mínimos obtenidos de un suelo sometido a diferentes cargas. Estos valores pueden ser obtenidos geoméricamente y gráficamente en un círculo de Mohr en un diagrama esfuerzo normal vs esfuerzo cortante por medio de la trazabilidad de una recta tangencial a los diferentes círculos de Mohr obtenidos de un ensayo de compresión triaxial como se muestra en la Figura 2-4.

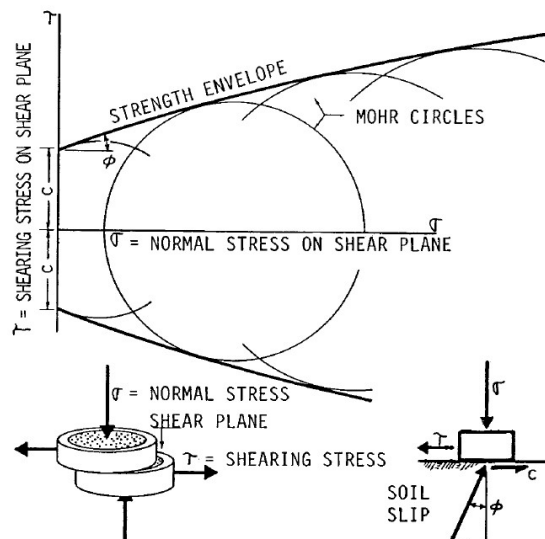


Figura 2-4: Esfuerzo cortante τ como una función del esfuerzo normal σ , que muestra una serie de círculos de Mohr en el deslizamiento del suelo y las envolventes de resistencia tangentes a los círculos de Mohr (Watkins & Anderson, 2017)

En la presente tesis se considera el uso del criterio de Mohr Coulomb ya que los ensayos de compresión triaxial son más comunes en el desarrollo de un estudio de suelos convencional en proyectos mineros.

2.2.2.2. Criterio de fluencia de Drucker-Prager.

Este modelo fue propuesto por los ingenieros Daniel Charles Drucker y Willi Prager en 1952. Relaciona los términos de ángulo de fricción ϕ y cohesión c del material dentro de los coeficientes α y K mostrados en las ecuaciones (Ec. 2-16) y (Ec. 2-17). Así mismo es expresado por la primera invariante del tensor de tensiones I_1 y la segunda invariante del desviador de tensiones J_2 los cuales se expresan en las ecuaciones (Ec. 2-14) y (Ec. 2-15).

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (\text{Ec. 2-14})$$

$$J_2 = 1/6[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (\text{Ec. 2-15})$$

$$\alpha = \frac{tg\phi}{\sqrt{(9 + 12tg^2\phi)}} \quad (\text{Ec. 2-16})$$

$$K = \frac{3c}{\sqrt{(9 + 12tg^2\phi)}} \quad (\text{Ec. 2-17})$$

La formulación matemática se expresa en la ecuación (Ec. 2-18) y el límite elástico es gráficamente representado por un hexaedro perpendicular al eje hidrostático representado por la mitad de la suma de los esfuerzos triaxiales como se muestra en la Figura 2-5.

$$F = \alpha I_1 + J_2^{1/2} - K \quad (\text{Ec. 2-18})$$

Nótese que este criterio depende del ángulo de fricción y cohesión de Mohr Coulomb por lo que los coeficientes α y K vendrían a ser el ángulo de fricción y cohesión de Drucker y Prager los cuales son obtenidos de forma indirecta desde un ensayo de compresión triaxial.

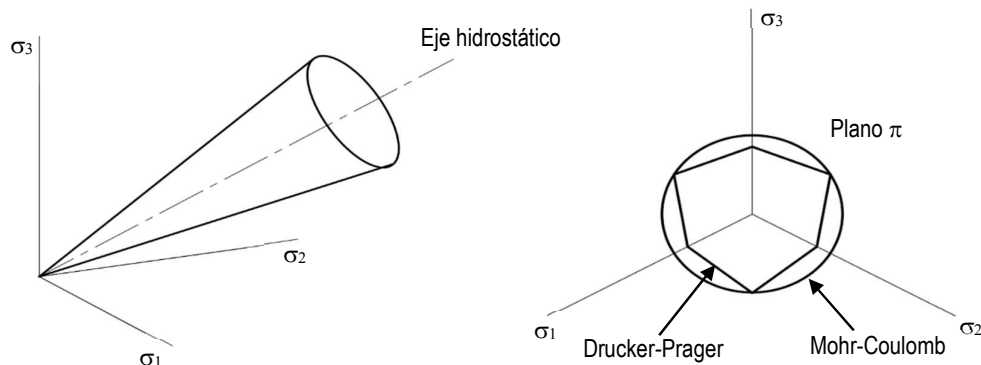


Figura 2-5: Criterios de plastificación Mohr Coulomb y Drucker y Prager

CAPÍTULO 3

Bases de cálculo de tuberías enterradas por el método de los elementos finitos

3.1. Método de los elementos finitos (MEF)

El método de los elementos finitos asociados a la ingeniería se debe a la investigación de (M. J. TURNER, R. W. CLOUGH, H. C. MARTIN, 1956), donde se analizaban las tensiones en estructuras complejas para aeronaves, es así que el método fue tomando notoriedad en el campo de todas las especialidades de la ingeniería, teniendo mayor influencia en las especialidades de mecánica y civil.

En las especialidades de la geotécnica y de la ingeniería de pipelines, de acuerdo a las distintas publicaciones recientes realizadas en investigaciones de (Dezfooli, Abolmaali, Park, Razavi, & Bellaver, 2015; Gálvez, 2011; Liu et al., 2010; Sharma, Najafi, Marshall, Jain, & Rahjoo, 2011; Webb, Trebicki, & Smulders, 2002), quienes analizan tuberías enterradas bajo distintas condiciones de instalación y materiales, el MEF aproxima adecuadamente los valores de estudios experimentales.

De acuerdo con las investigaciones realizadas por (Watkins & Anderson, 2017) y publicadas en el libro Structural Mechanics Buried Pipes, algunas de las principales ventajas del uso del método de los elementos finitos respecto al uso de procedimientos de cálculo usuales, se describen a continuación:

- El método permite considerar la no-linealidad y heterogeneidad del suelo.
- Consideración de la interface entre la tubería y el terreno, es decir, el deslizamiento o la adherencia entre ambas superficies.
- Mayor precisión en el análisis de los desplazamientos verticales y horizontales de la tubería.
- Uso de modelos matemáticos que permiten caracterizar los materiales del terreno y de la tubería.

Este capítulo presenta la metodología y descripción del MEF que permitirán modelar el comportamiento de la tubería de acero con el terreno o relleno en una zanja, así como, los algoritmos que permiten evaluar el comportamiento de los materiales, el deslizamiento entre superficies, los tipos de elementos que componen la malla del modelo geométrico y sus características.

3.1.1. Matriz de rigidez

La formulación adoptada para el análisis de una tubería enterrada en una zanja es similar a los adoptados para resolver cualquier problema mecánico. Se tiene que el modelo se representa por una malla conformada por varios nodos, luego se desarrolla la función aproximada para resolver las ecuaciones formuladas en cada nodo utilizando métodos para la minimización de errores para obtener valores más próximos a los reales. Se establecen las ecuaciones energéticas o las ecuaciones diferenciales que rigen el problema de estudio y en base a ello es posible establecer la siguiente ecuación de equilibrio:

$$Ka = f$$

(Ec. 3-1)

Donde:

K : es la matriz de rigidez,

a : es el vector de desplazamientos,

f : es el vector de fuerzas equivalentes.

3.1.2. Formulación de la no linealidad

Es conocido que los problemas mecánicos siempre tienen un tipo de no linealidad en el análisis y los tres tipos posibles de no linealidad en cada problema son: **El material, la geometría y el contacto**.

En el material, la ecuación constitutiva, la cual relaciona el esfuerzo y las deformaciones, **es no lineal**. Además, los materiales se comportan linealmente hasta alcanzar cierto punto, el cual es llamado límite elástico, después de este punto el comportamiento es no lineal. Existen diferentes modelos matemáticos que evalúan el comportamiento de los materiales en su estado no lineal; algunos de ellos se explican en la sección 0.

La segunda posible **no linealidad** es **la geométrica**. En un análisis geométrico no lineal, la relación entre los desplazamientos y las deformaciones es no lineal. Las grandes rotaciones y grandes deformaciones, así como, los grandes desplazamientos son diferentes tipos de no linealidades geométricas. Los métodos como la “Lagrangiana” y la “Euleriana” pueden aplicarse para resolver una no linealidad geométrica.

Desde el punto de vista “Lagrangiano”, los puntos del material y la malla son acoplados para que se desplacen y deformen juntos. Sin embargo, en una malla “Euleriana”, los puntos estarán en su posición inicial durante el análisis y los nodos del material se moverán independientemente de los nodos de la malla.

El último tipo de no linealidad posible es la **no linealidad en el contacto** de dos superficies. Esta no linealidad ocurre cuando las condiciones de contorno del problema son cambiadas, también cuando la ruta de la carga pasa por el contacto de dos superficies. Se aplican dos restricciones a la no linealidad del contacto; La primera es que No debería ocurrir penetración entre dos superficies en contacto lo cual es conocido como desplazamiento restringido, y la segunda es que las superficies no deberían mantenerse unidas sin la aplicación de alguna fuerza o carga, lo cual es conocida como fuerza restringida.

3.1.3. No linealidad del material

La no linealidad de materiales se explica en la sección 0.

3.1.4. No linealidad geométrica

Como se explica a mayor detalle en el libro “*Finite Element Procedures*” de (Bathe, 1996); tanto las pequeñas deformaciones con largas rotaciones, así como, las largas deformaciones con largas rotaciones son considerados como “Largas Deformaciones”. Las formulaciones “Total Lagrangian” y “Updated Lagrangian” fueron usadas para tomar en cuenta las largas deformaciones.

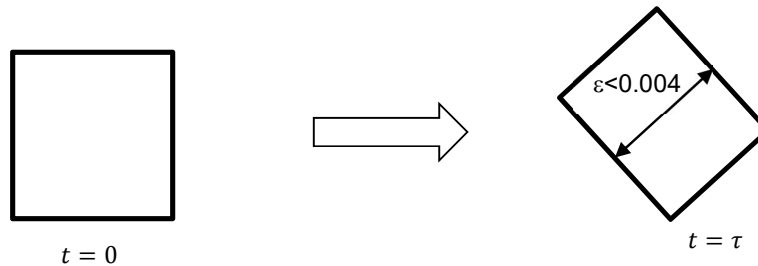


Figura 3-1: Largos desplazamientos: Pequeñas deformaciones + grandes rotaciones. Adaptada de (Bathe, 1996).

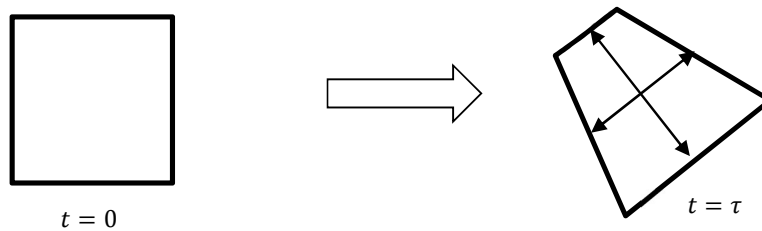


Figura 3-2: Largos desplazamientos: Grandes deformaciones + grandes rotaciones. Adaptada de (Bathe, 1996).

El método de solución para un problema geoméricamente no lineal comienza con la linealización de ecuaciones de equilibrio no lineales como las ecuaciones del principio de trabajos virtuales mediante el uso de la solución de los elementos finitos. Mayores detalles de desarrollan en (Bathe, 1996).

3.1.5. No linealidad en el contacto

Para contactos definidos, se disponen de dos algoritmos; “Nodo-Superficie”, y “Superficie-Superficie”. Para ambos algoritmos, Se deben definir dos superficies incluyendo una superficie maestra y la otra esclava. Generalmente, si hay contacto entre una superficie pequeña con una superficie más grande, lo mejor es usar la superficie pequeña como la superficie esclava. Si no se puede distinguir entre ambas, la superficie maestra debe ser elegida como la superficie del cuerpo más rígido o como la superficie con la malla menos densa, si las dos superficies están sobre estructuras con rigideces compatibles. Por ejemplo, una hoja fina de metal puede ser menos rígida que un bloque grande de goma, aunque el metal tenga un módulo más grande que el de la goma. Si la rigidez y la densidad de la malla son iguales para ambas superficies, la elección no siempre es obvia.

Los roles de selección de cuál es la superficie maestra o esclava típicamente tiene mucho menos efecto en los resultados con la formulación en un contacto “Superficie-Superficie” que con la formulación para contacto “Nodo-Superficie”, sin embargo, la asignación de superficies maestras o esclavas tendría un efecto significativo sobre el comportamiento con un contacto “Superficie-Superficie” si las dos superficies tienen diferente densidad y configuración de malla; la solución puede ser bastante costosa computacionalmente si la superficie esclava es mucha más densa que la superficie maestra.

3.1.5.1. Contacto Nodo-Superficie

Para este algoritmo, cada contacto involucra un simple nodo sobre la superficie esclava y un grupo de nodos cercanos sobre la superficie maestra desde valores los cuales son interpolados para la proyección del punto de contacto. La Figura 3-3 ilustra el contacto “Nodo-Superficie”.

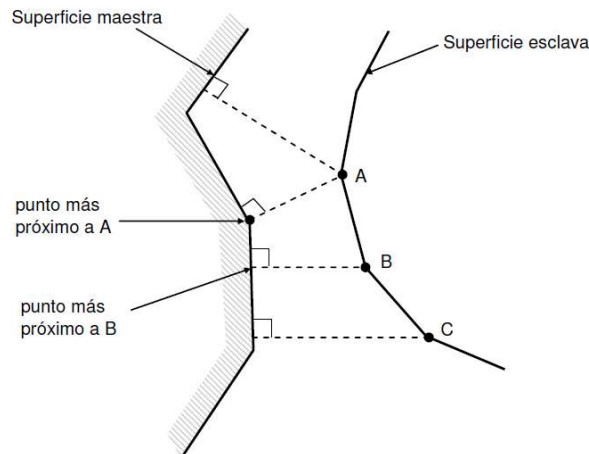


Figura 3-3: Esquema de algoritmo de contacto “Nodo-Superficie” Adaptada de <https://abaqus-docs.mit.edu/>

3.1.5.2. Contacto Superficie-Superficie

La formulación “Superficie-Superficie” refuerza las condiciones de contacto en un sentido promedio en las regiones cercanas a los nodos esclavos en lugar de solo en los nodos esclavos individuales.

3.1.5.3. Formulación del deslizamiento

Se consideran dos procedimientos al considerar el movimiento relativo entre dos superficies que entran en contacto (Abaqus, 2013).

- Formulación del deslizamiento finito: Es el procedimiento más general y permite, para una separación arbitraria, el deslizamiento y la rotación de las superficies en contacto. Para este modelo la conectividad de las restricciones activas cambia en función del movimiento tangencial relativo de las superficies en contacto.
- Formulación en pequeños deslizamientos: Se asume que se produce un pequeño desplazamiento relativo de una de las superficies con respecto a la otra y está basado en las aproximaciones lineales

de la superficie maestra por cada restricción. Los grupos de nodos con restricciones individuales son fijados durante todo el análisis, aunque la situación de activo/inactivo de esta restricción puede cambiar durante el tiempo.

En general, con la discretización “Superficie-Superficie” se obtienen mejores resultados los cuales son más ajustados en la presión y tensión que los que se obtienen en la discretización “Nodo-Superficie”. Adicionalmente, como la discretización “Nodo-Superficie” resiste simplemente las penetraciones de los nodos esclavos dentro de la superficie maestra, las fuerzas tienden a concentrarse en los nodos esclavos. Esta concentración produce un resultado de picos y valles en la distribución de tensiones a lo largo de la superficie, mientras que la discretización “Superficie-Superficie” resiste penetraciones sobre regiones finitas de la superficie esclava en el sentido medio, lo que tiene un efecto de suavización en la distribución de tensiones. Si se reduce la densidad de la malla haciéndola más fina, las diferencias entre las discretizaciones disminuyen, pero para una malla determinada, la aproximación de la discretización “Superficie-Superficie” proporciona mejor aproximación, sin embargo, debido a que esta discretización involucra más nodos por cada restricción es posible el incremento computacional, pero puede llegar a ser pequeño y poco significativo para condiciones especiales y complejas. (Gálvez, 2011).

Por lo indicado, para el desarrollo de la presente tesis se selecciona la formulación de contacto “Superficie-Superficie” para el contacto entre la tubería y el suelo. Así mismo, como en el modelo propuesto no hay un deslizamiento entre las superficies de contacto, o si sucede es muy pequeño, se considerará la formulación de deslizamientos pequeños.

3.1.6. Condiciones de carga y contorno

Las condiciones de contorno corresponden a los límites geométricos del modelo en los cuales se restringen los grados de libertad. Para el caso de la base del modelo se considera restricción del desplazamiento en los tres ejes, mientras que en las paredes solo se restringe el desplazamiento lateral permitiendo el desplazamiento vertical y longitudinal, y finalmente, a fin de reducir la cantidad de elementos posibles en el cálculo, se considera un modelo simétrico al eje vertical central de la zanja y de la tubería por lo que las condiciones de contorno en dicho eje directriz impide el desplazamiento lateral así como las rotaciones de los ejes vertical y longitudinal. Esto se explica con mayor detalle en la sección 0.

3.1.7. Tipos de elementos y mallado

Los elementos sólidos tridimensionales son elegidos para representar la malla por medio de bloques infinitesimales en diferentes componentes del modelo. Se utilizó también la integración reducida (integración de orden inferior de la matriz de rigidez) para aliviar la rigidez intrínseca del modelo debido a la aproximación de elementos finitos. Para los análisis realizados en la presente investigación se

seleccionó un método estático de integración directa que utiliza la técnica de solución de newton completa. Los elementos utilizados son los elementos tipo ladrillo (brick element) lineal de ocho (8) nodos y elementos del tipo cuña (wedge element) de seis (6) nodos con integración reducida y "hourglass control" tanto para el suelo como para los materiales de acero. Además, la opción "hourglass control" también se utilizó para mejorar la distorsión de la malla debido a una gran deformación geométrica y para mejorar la respuesta no lineal. La Figura 3-4 y Figura 3-5 ilustran los elementos que se utilizaron en la presente investigación.

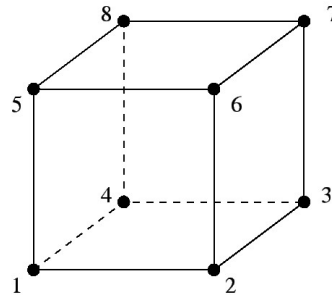


Figura 3-4: Elemento ladrillo "Brick Element" de Ocho (8) nodos

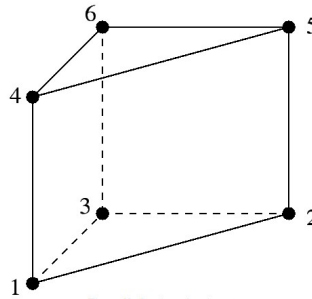


Figura 3-5: Elemento tipo cuña (wedge) de seis (6) nodos

CAPÍTULO 4

Validación de datos experimentales con el modelo de elementos finitos

4.1. Análisis experimental

En la presente sección se considera validar el procedimiento de análisis por el método de elementos finitos del comportamiento de una tubería enterrada en base al análisis experimental y resultados de la tesis doctoral “*Development of a Model for Estimation of Buried Large Diameter Thin-Walled Steel Pipe Deflection due to External Loads*” desarrollada por (SHARMA, 2013).

4.1.1. Descripción general experimental

Se detalla el procedimiento y metodología adoptada para la prueba experimental la cual será utilizada en la presente investigación. Esta describe los detalles de las pruebas de una tubería enterrada en una caja de concreto, propiedades del suelo y relleno, instrumentos usados para la adquisición de datos y sus respectivas ubicaciones sobre la tubería, la configuración de las pruebas y el procedimiento paso a paso para diferentes pruebas realizadas.

La prueba experimental fue desarrollada en el laboratorio del centro de investigación de infraestructuras enterradas con sus siglas en inglés (CUIRE) ubicada en la universidad de Texas en Arlington en EEUU y fue ejecutada por el ahora Dr. JWALA RAJ SHARMA y presentada en su tesis doctoral publicada en el 2013. En la Tabla 4-1 se muestran todas las pruebas experimentales realizadas en la referencia mencionada, de las cuales, para la validación del procedimiento desarrollado, para analizar las tuberías enterradas en zanjas por el método de los elementos finitos, se utilizará la prueba 1a.

Tabla 4-1 Resumen de pruebas experimentales de referencia, adaptado de (SHARMA, 2013)

Pruebas	Descripción	Duración de la construcción
Prueba 1	Cama de grava, arcilla nativa (B6) encamado hasta 1 pie por encima de la tubería, duración de construcción larga.	18/01/2011 – 02/05/2011 (15 semanas)
Prueba 2	Cama de material (B6) tratado con 6% de limo, encamado hasta la mitad de la tubería, arcilla nativa (B6) hasta 1 pie por encima de la tubería	19/09/2011 – 02/11/2011 (6 semanas)
Prueba 1a	Cama de grava, arcilla nativa (B6) encamado hasta 1 pie por encima de la tubería, duración de construcción corta.	27-02-2012 – 02-03-2012 (5 días)
Prueba 3	Cama de piedra caliza triturada, encamado de piedra caliza triturada hasta 1 pie por encima de la tubería, corta duración de la construcción.	24/04/2012 – 26/06/2012 (3 días)
Prueba 4	Cama de piedra caliza triturada, encamado de piedra caliza triturada hasta 0.3 veces el diámetro de la tubería, arcilla nativa (B6) hasta 1 pie por encima de la tubería, duración de construcción contar.	19/06/2012 – 22/06/2012 (4 días)

Nota: Esta sección tiene como objetivo mostrar los materiales, instalaciones y procedimientos realizados por el autor y se transcriben y/o adaptan de la tesis original (SHARMA, 2013).

4.1.1.1. Caja de concreto

La caja de concreto construida en el laboratorio de CIURE consiste en paredes y losa de concreto reforzado de 3,000 psi. Sus dimensiones son 7.62 m (25 ft) de longitud por 3.81 m (12.5 ft) de ancho y 3 m (10 ft) de altura. Basado en los requerimientos de las pruebas, se le realizaron algunas modificaciones a la caja de concreto. Se construyó un mamparo (*bulkhead*) de madera para reducir la longitud de la zona de instalación de la tubería a 6.4 m (21 ft) dentro de la caja de concreto. Esto generó 1.22 m (4 ft) de espacio de trabajo en el lado norte de la caja de concreto. Gracias a esta modificación fue posible la entrada al interior de la tubería para instalación de los instrumentos. Se construyó un marco de madera para proporcionar paredes de 2.43 m (8 ft) de altura en los lados para facilitar las cargas estáticas adicionales de relleno suelto sobre el nivel del terreno. La Figura 4-1 ilustra la caja de concreto después de haberla rellenado con la cama de arena para la Prueba 1. La Figura 4-2 y la Figura 4-3 muestran las dimensiones de la caja antes y después de las modificaciones respectivamente.



Figura 4-1: Caja de concreto con cama de tubería para la Prueba 1, (SHARMA, 2013).

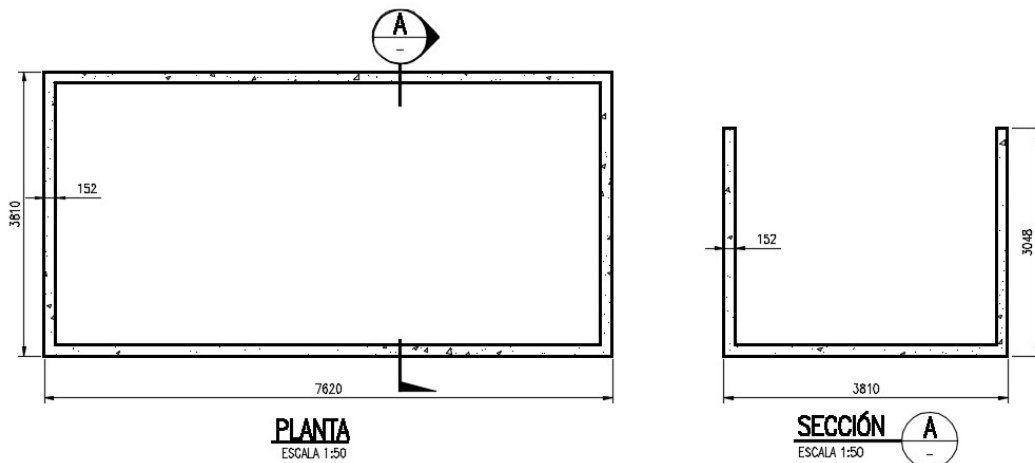


Figura 4-2: Dimensiones (in ft) de la caja antes de la modificación (En mm). Adaptado de (SHARMA, 2013).

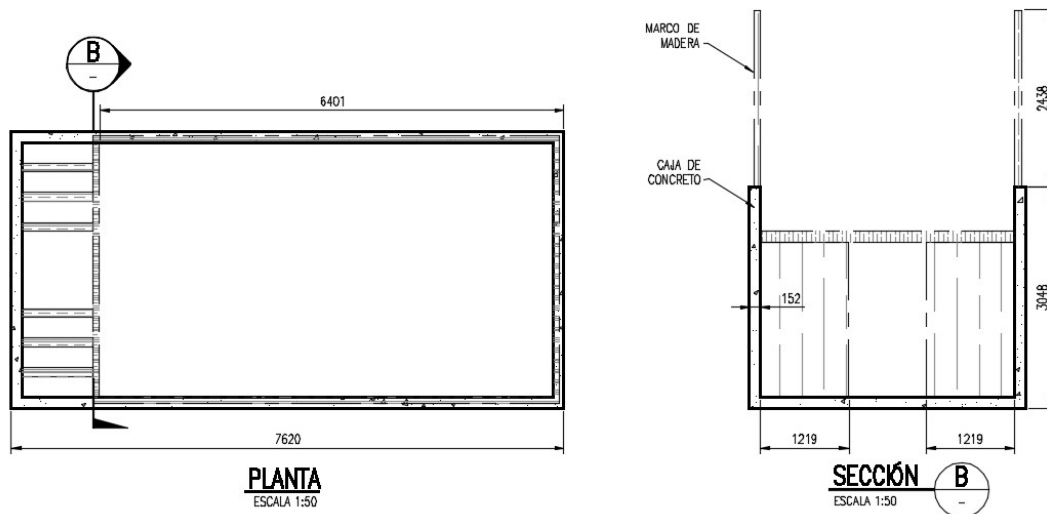


Figura 4-3: Dimensiones (in ft) de la caja después de la modificación (En mm). Adaptado de (SHARMA, 2013).

4.1.1.2. Tubería

Un tramo de tubería de acero fue proporcionado por una compañía de manufactura de tuberías en Saginaw, Texas. La misma fue usada para todas las pruebas debido a que la tubería no fue evaluada a falla o fluencia en ninguna de las pruebas, es decir, siempre se trabajó en su estado elástico. El tubo tiene una longitud de 5,988 mm (19 ft y 7.75 in) y un diámetro nominal de 72", el diámetro (D) exterior fue de 1,873.25 mm (73.75 in) y el espesor de pared (t) fue de 7.95 mm (0.313 in), (D/t de 235). La Figura 3-3 muestra la tubería de acero en el laboratorio de CUIRE. El peso total de la tubería fue de 2,188 kg. La tubería no contaba con ningún recubrimiento o forro interno. Se instalaron orejas prefabricadas para facilitar la instalación de instrumentos de medida de desplazamiento vertical y horizontal (Convergence meter) como se muestra en la Figura 4-5.



Figura 4-4: Tubería en el laboratorio de CUIRE, (SHARMA, 2013).



Figura 4-5: Gancho prefabricado para instalación de medidores de convergencia “convergence meter”, (SHARMA, 2013).

4.1.1.3. Instrumentación

Se usaron celdas de presión de suelo, medidores de convergencia y galgas extensométricas para adquirir datos en las pruebas. Estos instrumentos fueron conectados a “data loggers” y estos últimos fueron conectados a una computadora para el registro de los datos. El esquema de instrumentación se muestra en la Figura 4-6.

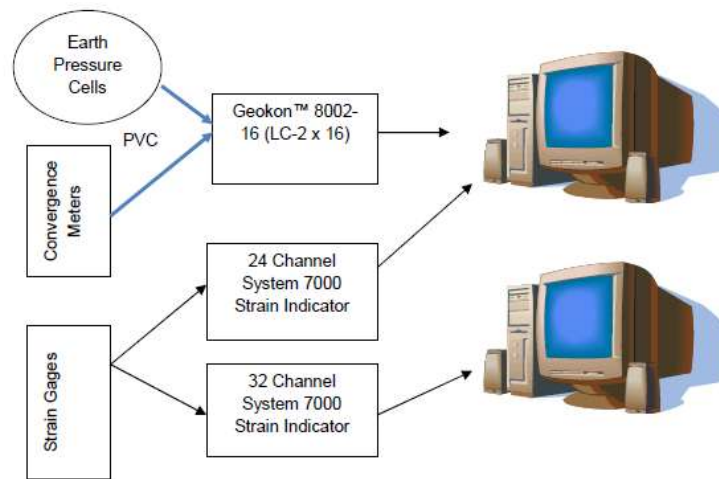
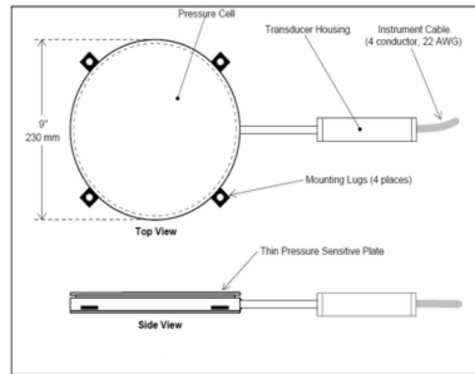


Figura 4-6: Esquema de instrumentación, (SHARMA, 2013).

CELDA DE PRESIÓN DEL SUELO

Se usaron celdas de presión de suelo de alambre vibratorio Geokon TM modelo 4810 (ver Figura 4-7), para medir las presiones horizontales y verticales del suelo. Las celdas de presión del suelo son construidas desde dos placas de acero inoxidable soldados juntos alrededor de su perímetro y separados por un estrecho espacio lleno de fluido hidráulico. Las presiones externas comprimen las dos placas juntas creando una presión igual en el fluido interno. Un *tubing* de acero inoxidable conecta la cavidad del fluido entre placas con un transductor de presión que convierte la presión del fluido en una señal eléctrica

transmitida por un cable a la ubicación de la lectura. (*Geokon Datasheet*). El rango de las celdas de presión usadas fue de 51 psi con una precisión del 0.1%.



(a)



(b)

Figura 4-7: (a) Celda de presión de suelo Modelo 4810, (b) Celda de presión de suelo usado en las pruebas, (SHARMA, 2013).

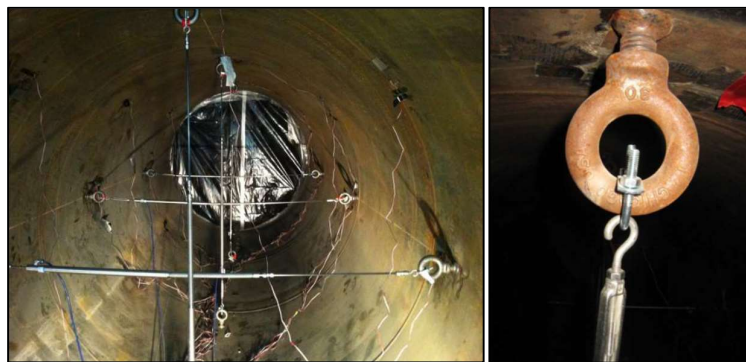
MEDIDORES DE CONVERGENCIA

Se usaron medidores de convergencia de alambre vibratorio Geokon TM Modelo 4425 (Ver Figura 4-8), para la medición de las deflexiones horizontales y verticales de la tubería, como es indicado por Geokon TM, el medidor de convergencia modelo 4425 está diseñado para detectar deformaciones en túneles y cavernas enterradas por medio de la contracción (o elongación) entre dos puntos anclados en las paredes del túnel o la caverna. El modelo 4425 consta de un conjunto de transductores de cuerda vibrante tensado por resorte, tensor, 0.24 in de diámetro conectado por varillas (de acero inoxidable, fibra de vidrio o grafito), abrazadera de varilla, y un par de puntos de anclaje. Los cambios en la distancia entre los dos anclajes son transportados por las varillas y medidos por el transductor. El modelo 4425 puede operar en configuraciones horizontales, verticales e inclinados. El rango de los medidores de convergencia fue de 4 in de desplazamiento con 0.1% de precisión.



● Model 4425 Convergence Meter.

(a)



(b)

(c)

Figura 4-8: (a) Medidor de convergencia modelo 4425, (b) Medidor de convergencia instalado dentro de la tubería. (c) Conexión del medidor de convergencia, (SHARMA, 2013).

GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Para la medición de las deformaciones se usaron galgas extensométricas uniaxiales Vishay TM modelo C2A-06-250LW-350. Ver Figura 4-9.

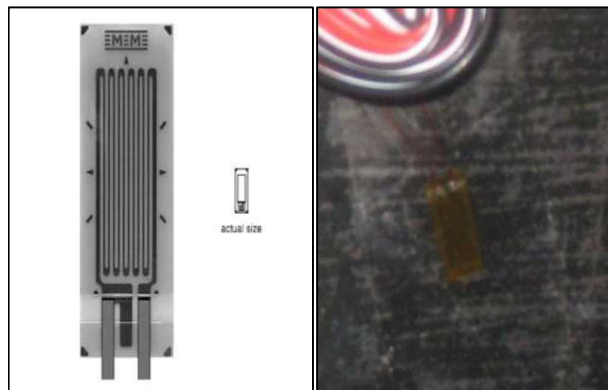


Figura 4-9: (a) Galga extensométrica C2A-06-250LW-350, (b) Galga pegada a la tubería, (SHARMA, 2013).

SCANNER VISHAY TM SYSTEMA 7000

Para coleccionar y grabar los datos de las galgas extensométricas se usaron dos *scanners Vishay TM Systema 7000*. Para las pruebas 1 y 2, se usaron 24 canales del scanner. Para las pruebas 1a, 3 y 4, se usó un escáner adicional con 32 canales debido a que se usaron muchas más galgas en estas pruebas. Los scanners fueron conectados a computadoras para el registro de los datos. Se usó el *software Strain Smart TM versión 4.7* para coleccionar los datos recolectados por el scanner. Ver Figura 4-10.



Figura 4-10: Scanner Sistema 7000 usado en las pruebas, (SHARMA, 2013).

INSTRUMENTOS DE CALIBRACIÓN

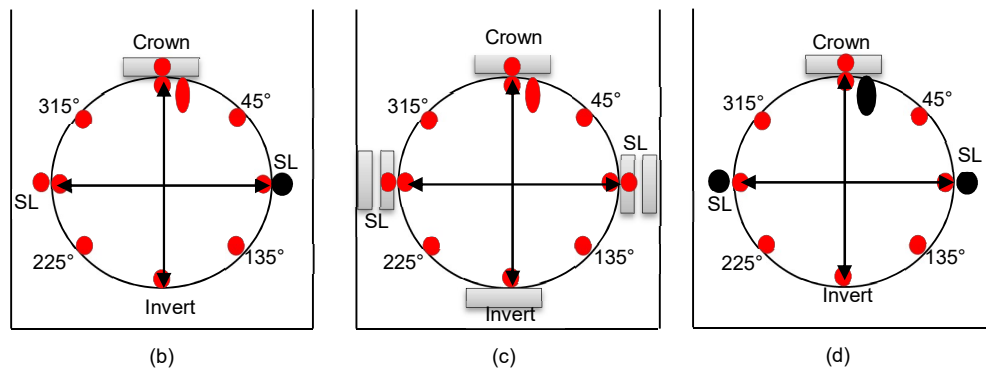
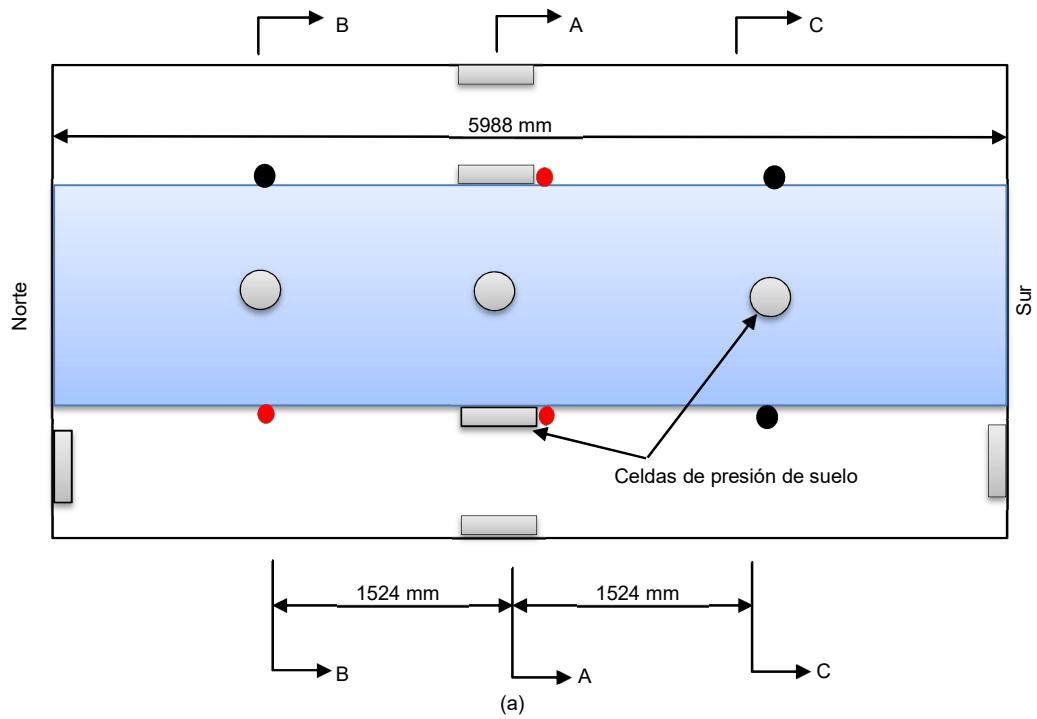
Todos los instrumentos fueron calibrados. Las hojas de calibración de los instrumentos se muestran en el Apéndice A de la tesis doctoral de (SHARMA, 2013).

4.1.1.4. Ubicación de instrumentos

Como se hace referencia en la tabla Tabla 4-1, se desarrollaron varias pruebas experimentales con una tubería enterrada de gran diámetro en cajas de concreto enterrada. Sin embargo, a fin de validar el procedimiento de análisis por el método de elementos finitos propuesto en la presente tesis, se utilizará la prueba 1a, el cual, como es indicado por su autor (SHARMA, 2013), se considera que es la más completa de acuerdo a recomendaciones de un grupo de estructurales de la universidad de Texas Arizona (UTA).

PRUEBA 1A

De acuerdo a las recomendaciones de un grupo de estructurales de la UTA, se consideró la inclusión de galgas adicionales. Se usaron en total 6 medidores de convergencia, 10 celdas de presión de suelo y 36 galgas extensométricas. La Figura 4-11 muestra la ubicación de estos instrumentos sobre la tubería y la zanja (caja de concreto). Todos los datos de los medidores de convergencia y las celdas de presión fueron recolectados satisfactoriamente, sin embargo, solo se lograron recolectar los datos de 32 de las 36 galgas durante la duración de toda la prueba la cual duró 5 días.



Legenda:

	Celdas de presión del suelo
	Medidor de convergencia (Vertical / Horizontal)
	Galga extensométrica circunferencial
	Galga extensométrica circunferencial (Falló)
	Galga extensométrica longitudinal
	Galga extensométrica longitudinal (Falló)
SL	Eje central horizontal de tubería (<i>Springline</i>)
Crown	Parte superior de tubería
Invert	Parte inferior de tubería

Figura 4-11: Configuración de la instrumentación para la prueba 1a: (a) Vista de planta, (b) sección B-B (Norte), (c) Sección A-A (Centro), (d) Sección C-C (Sur). Adaptado de (SHARMA, 2013).

4.1.1.5. **Propiedades del suelo (prueba experimental)**

Se usaron un total de cuatro tipos de suelos para la cama de tubería y el relleno para las 5 pruebas experimentales. Estos suelos incluyen Grava, arcilla magra nativa (arcilla de baja plasticidad, CL) (arcilla nativa), arcilla magra estabilizada con cal (arcilla modificada) y piedra caliza triturada.

GRAVA

La grava fue proporcionada por un fabricante local de concreto y la tubería en *Grand Prairie, Texas*. El análisis por tamizado de la grava se proporciona en la Tabla 4-2 que muestra la conformidad con las especificaciones para TX367-ASTM # 8 (¾ pulg. A # 4) Grava lavada. Se utilizó la grava como cama de tubería en las Pruebas 1 y 1a y como carga superficial estática en todas las pruebas.

Tabla 4-2 Especificaciones del material de cama de tubería - Grava, adaptado de (SHARMA, 2013).

SIEVE TEST	SPECIFICATION (% PASSING)	TEST	AVERAGE (% PASSING)	MINIMUM (% PASSING)	MAXIMUM (% PASSING)	RANGE	TARGET
1/2 in (12.5mm)	100 – 100	1	100	100	100	0	-
3/8 in (9.5 mm)	85 – 100	1	91	91	91	0	-
1/4 in (6.3 mm)	-	1	42	42	42	0	-
#4 (4.75 mm)	10 – 30	1	15	15	15	0	-
#8 (2.36 mm)	0 – 10	1	1	1	1	0	-
#16 (1.18 mm)	0 – 5	1	1	1	1	0	-
#200 (75 µm)	0 – 1.5	1	0.3	0.3	0.3	0	0 – 1
PAN (0 µm)	-	1	0.0	0.0	0.0	0	-

ARCILLA NATIVA

La arcilla nativa fue importada desde el material escavado en el desarrollo de la construcción del proyecto IPL. El suelo nativo designado como B6 fue usado en la prueba 1a, este se utilizó como suelo de relleno lateral de la tubería desde la parte superior de la cama hasta 304.8 mm (1 ft) por encima de la tubería y también como carga de sobrecarga superficial como una capa de 609.6 mm (2 ft) de relleno superior.

La arcilla nativa fue analizada y probada por el equipo geotécnico de UT Arlington dirigido por el Dr. Anand Puppala. Las pruebas incluyeron análisis de tamaño de grano, pruebas de índice, prueba *proctor* estándar, prueba triaxial UU, prueba de resistencia a la compresión no confinada, pruebas químicas y análisis mineralógico del suelo. La muestra de suelo para estas pruebas se seleccionó a una profundidad de 3.048 m (10 ft) a 4.572 m (15 ft). Se realizaron pruebas triaxial UU y de resistencia a la compresión no confinada

en muestras remoldeadas a la máxima densidad seca. La Tabla 4-3 presenta el resumen de los resultados de las pruebas para arcilla nativa B6 presentado por el Equipo Geotécnico de UT Arlington.

Tabla 4-3 Resumen de resultados de la prueba para la arcilla nativa B6. (Fuente: Equipo geotécnico UTA), adaptado de (SHARMA, 2013).

Sample location ID				B6
Selected sample depth range (ft)				10 – 15
INDEX TESTS	Grain size analysis	Sieve Analysis	% Gravel	0
			% Sand	22
		Hydrometer	% Silt	62
			% Clay	16
	Atterberg's limits	Liquid Limit (%)		40
		Plastic Limit (%)		14
		PI (%)		26
Soil Classification			CL	
ENGINEERING TESTS	Standard Proctor	MDD* (pcf)		108.1
		OMC** (%)		16.2
	UU Triaxial	*Undrained Cohesion, C_u , Psi		14.2
		*Angle of internal friction, ϕ		5.7°
		**Undrained Cohesion, C_u , Psi		14.5
		**Angle of internal friction, ϕ		8.1°
	UCS	Unconfined compression strength, Psi		22.8
SOIL MINERALOGY	Monmorillonite			18%
	Kaolinite			61%
	Illite			21%
ELASTIC MODULUS, Psi	Confining pressure = 7.25 psi			1,257
	Confining pressure = 14.50 Psi			3,537
	Confining pressure = 21.75 Psi			6,285
50% SECANT MODULUS, Psi	Confining pressure = 7.25 psi			968
	Confining pressure = 14.50 Psi			1,380
	Confining pressure = 21.75 Psi			2,114

Nota: + 10% Strain; ++ 15% Strain

4.1.1.6. Procedimiento de la prueba 1a

La prueba 1a inició el 27.02.2012. La construcción duró 5 días hasta el 03.03.2012. La Figura 4-12 y la Figura 4-13 presentan la configuración de la instalación de la tubería para esta prueba. Se consiguió un ritmo de construcción más rápido, se tuvo el apoyo de un contratista profesional (Rudy Renda Contracting) para la construcción de la instalación de esta prueba, se ubicaron soportes de madera (*struts*) dentro de la tubería al inicio de la construcción y se consideró instrumentación adicional que las pruebas previas desarrolladas por el autor.

El procedimiento de la construcción para esta prueba se describe a continuación:

1. La arcilla nativa utilizada para la Prueba 1a se almacenó para su eliminación. El Distrito regional de agua de Tarrant entregó 76.46 m³ (100 CY) adicionales de suelo de relleno lateral al laboratorio CUIRE desde la ubicación B6 de la alineación del pipeline del proyecto IPL (*Integrated Pipeline*). En el sitio de perforación B6, se retiraron primero los primeros 1.524 m (5 ft) de tierra y se tomó tierra de entre 1.905 m (5 ft y 15 in) de profundidad y se entregó a CUIRE.
2. Se colocó un lecho de grava de 304.8 mm (1 ft) de grosor en el piso de la caja de concreto como encamado.
3. La ubicación central de la tubería se marcó cuidadosamente y se colocó una celda de presión de tierra en esta ubicación marcada.
4. La tubería de acero se colocó longitudinalmente a lo largo de la zona de enterramiento y centralmente a lo largo del ancho de la caja de concreto. Mientras que, a lo largo del lado longitudinal, se proporcionó un espacio de 152.4 mm (6 in) en la ubicación sur y un espacio de 1.22 m (4 ft) en la ubicación norte para el espacio de trabajo. El espacio entre el marco de madera y la tubería en la ubicación norte era de aproximadamente 152.4 mm (6 in).
5. La pieza de tubería fue instrumentada en tres secciones transversales.
6. Los soportes de madera (*struts*) verticales se colocaron en cuatro secciones transversales a 1,524 mm entre centros.
7. La tubería instrumentada fue embebida con material nativo utilizando un equipo de contratistas profesionales para la compactación. La cuadrilla de Oscar Renda *Contracting* consistió en dos trabajadores, un operador de retroexcavadora y un supervisor. El relleno lateral se colocó en capas de aproximadamente 203.2mm (8 in) compactadas por encima del 90% de la densidad estándar *proctor*. La medición de la densidad se realizó mediante un medidor de densidad nuclear.
8. La sobrecarga adicional (relleno superior) se logró mediante 609.6 mm (2 ft) de material nativo compactado y 2.438 m (8 ft) de grava colocada sobre el nivel del suelo.
9. El registro de datos continuó durante cuatro semanas después de completar el relleno.

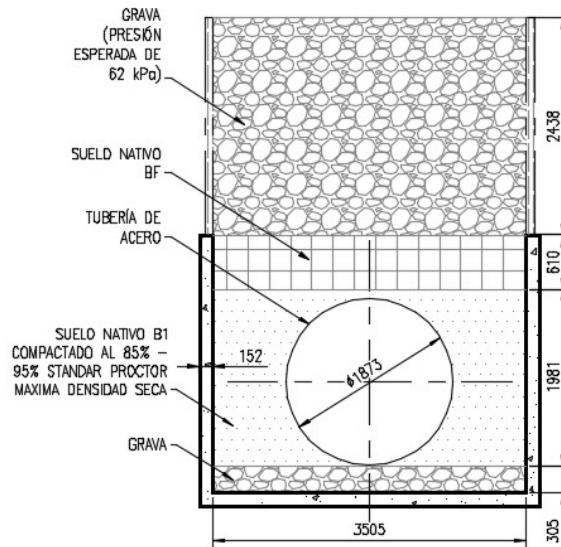


Figura 4-12: Sección de la instalación para la Prueba 1a (En mm). Adaptado de (SHARMA, 2013).

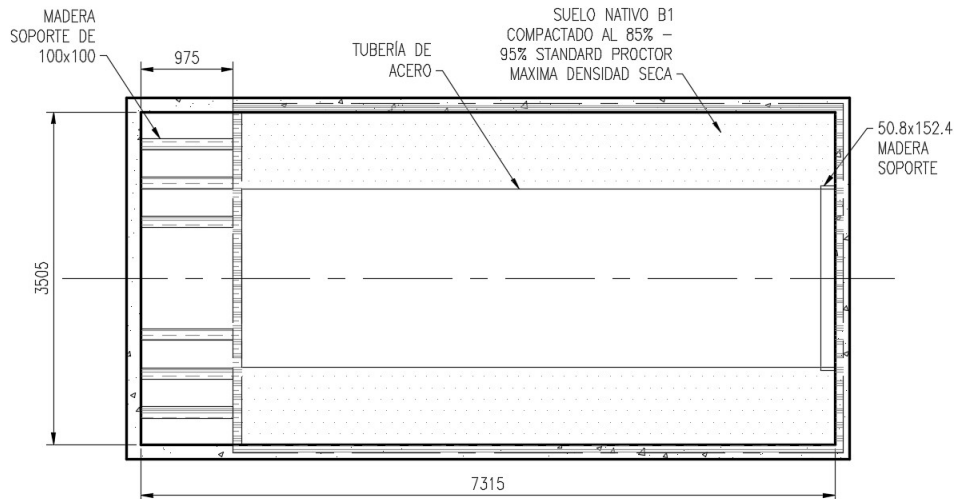


Figura 4-13: Vista de planta de la instalación para la Prueba 1a (En mm). Adaptado de (SHARMA, 2013).

4.1.2. Resultados de la prueba 1a

Esta sección presenta los resultados de las pruebas de laboratorio de la prueba 1a. Se presentan los datos adquiridos y las observaciones importantes de la prueba. Los datos levantados son resultados de deflexión, lecturas de la presión del suelo y las deformaciones de las paredes de la tubería.

4.1.2.1. Convención de signos

La convención de signos considerada para los datos obtenidos en las pruebas realizadas será positivo (+) para las tensiones y negativo (-) para las compresiones. Un decremento del diámetro será reportado como negativo (-) y los incrementos en el diámetro serán considerados positivos (+). Por lo contrario, cuando se reporten las deformaciones de las paredes de la tubería, las deformaciones comprimidas serán negativas (-) mientras que las deformaciones por tensión serán consideradas como positivo (+).

4.1.2.2. Deflexiones debido al propio peso de la tubería

La tubería testeada fue transportada al laboratorio con dos sets de soportes de madera (struts) ubicados dentro de la tubería para proporcionarle rigidez en contra de las tensiones debidos a la manipulación en el transporte. Durante la preparación de la prueba 1a, la tubería fue instrumentada con medidores de convergencia con los soportes de madera (struts) dentro de la tubería. Los soportes fueron retirados de la tubería para poder registrar la deflexión de la tubería debido a su propio peso. Los datos obtenidos son presentados en la Tabla 4-4. Dos de los medidores de convergencia fueron dañados durante la remoción de los soportes por lo que sus lecturas no fueron registradas y por ello se indica con NA en la tabla.

Tabla 4-4 Deflexiones de la tubería inmediatamente después de remover los soportes de la tubería, adaptado de (SHARMA, 2013).

Vertical Deflections (in.)			Horizontal Defection (in.)		
South	Center	North	South	Center	North
N/A	-0.517	-0.62	0.534	N/A	0.517

Se calcularon las deflexiones de la tubería debido a su propio peso utilizando la ecuación de IOWA modificada (Ec. 1-7). Los cálculos se presentan en el ejemplo líneas abajo. En este cálculo, el valor de E' se consideró como 0 puesto que la tubería no se encuentra enterrada aún; el lag de deflexión como 1; la constante de cama de tubería como 0.1; y el peso sobre la tubería como 3.5 kN/m (gravedad de 9.81 m/s²), lo cual es el peso de la tubería. Se obtuvo una deflexión teórica de 33.3 mm (1.31 in) y como se puede observar en la Tabla 4-4 este valor es un poco más de dos veces el valor real, sin embargo, se puede plantear la hipótesis de que la forma de la tubería era ovalada durante y después del proceso de fabricación, adicionalmente, puede ser que la constante de cama de tubería elegida no era correcta por lo que de ser menor podría predecir mejor la deformación de la tubería.

Ejemplo de cálculo de deflexión de tubería usando la formula modificada de IOWA.

ΔX : Deflexión horizontal de la tubería (m)

D_L : Factor de deflexión por tiempo instalado = 1

K_z : Bedding constant = 0.1

W_r : Peso del relleno sobre la tubería = 3,5 kN/m.

r: Radio medio de la tubería = 0.937 m

E: Módulo de elasticidad de la tubería = 2.07E+08 kPa

I: Momento de inercia de la tubería, $\sim t^3/12$ (m³) = 7.95³/12 = 41.872 m³

EI = 86.675E+08 kN-m

E' : Módulo de reacción del suelo (kPa) = 0

Aplicando la fórmula modificada de IOWA (Ec. 1-7) la deflexión $\Delta X = 33.3$ mm.

Adicionalmente a los datos presentados, se asumirá la forma inicial de la tubería como la inmediatamente después de la deformación debida a su propio peso, por lo que se trabajará con una deflexión de valor cero de los diámetros horizontal y vertical que es el estado en el que la tubería ya se ha deformado debido al peso propio.

4.1.2.3. Capas de suelo

Se ubicaron nueve capas de suelo durante la prueba 1a para cubrir la tubería. Las densidades de estas capas compactadas fueron medidas por un medidor de densidad nuclear. La Tabla 4-5 muestra los espesores y densidades de compactación de cada capa.

Tabla 4-5 Densidades de capas de suelo para la prueba 1a, adaptado de (SHARMA, 2013).

Layer No.	Average Layer Thickness (in.)	Embedment Height (in.)	Average Dry Density (pcf)	Average Water Content (%)	Average wet Density (pcf)	Percent Compaction (%)
1	7	7	99.5	18.1	117.5	92.0
2	8	15	98.7	21.8	120.2	91.3
3	9	24	99.7	19.0	118.7	91.6
4	9	33	100.2	18.2	118.4	92.7
5	7	40	99.7	18.6	118.2	92.2
6	8	48	100.7	16.4	117.2	93.2
7	10	58	99.8	15.7	115.4	92.3
8	9	67	99.9	10.6	110.5	92.4
9	11	78	98.7	12.0	110.5	91.3

4.1.2.4. Deflexión de tubería

Los datos de deflexión registrados en la prueba 1a se resumen en la Tabla 4-6. La Figura 4-14 ilustra la representación gráfica de las deflexiones. Se observa un incremento del diámetro vertical hasta la capa 9. Las cargas superficiales agregadas sobre la capa 9 causa la mayor deflexión de la tubería reduciendo el diámetro vertical. Además, se observa que durante los picos de deflexión hasta la capa 9, las deflexiones vertical y horizontal fueron aproximadamente iguales en magnitud. Finalmente, la deflexión horizontal debido a la carga superficial fue menor que un 40% de la deflexión vertical.

4.1.2.5. Presión del suelo

Se midieron las presiones del suelo en diez ubicaciones como se describe en la sección 4.1.1.4. Las presiones verticales fueron medidas en la parte central bajo la tubería y en tres ubicaciones (Sur, Centro y norte) en la parte superior de la tubería. Las presiones horizontales fueron medidas en la zona lateral de la tubería (*springline*) y en las paredes de la caja de concreto. La Tabla 4-7 muestra las presiones

registradas en estas ubicaciones en diferentes etapas de montaje de la tubería. La Figura 4-15 ilustra gráficamente los datos de presión de suelo registrados.

Tabla 4-6 Deflexiones de la tubería para la prueba 1a, adaptado de (SHARMA, 2013).

Description	Vertical Deflection (in.)			Horizontal Deflection (in.)		
	South	Center	North	South	Center	North
Strut Placement	0.41	0.41	0.38	-0.39	-0.38	-0.36
Layer 1	0.41	0.41	0.38	-0.39	-0.38	-0.36
Layer 2	0.41	0.41	0.38	-0.39	-0.38	-0.36
Layer 3	0.83	0.85	0.74	-0.8	-0.87	-0.72
Layer 4	1.13	1.12	1.03	-1.15	-1.09	-1.07
Layer 5	1.57	1.51	1.33	-1.66	-1.59	-1.48
Layer 6	1.82	1.75	1.59	-2.00	-1.88	-1.75
Layer 7	2.08	2.09	1.86	-2.20	-2.04	-1.96
Layer 8	2.17	2.13	1.95	-2.20	-2.06	-1.96
Layer 9	2.22	2.17	1.99	-2.20	-2.05	-1.95
Backfill Complete	1.84	1.73	1.57	-2.07	-1.99	-1.78
Week 1	1.75	1.65	1.48	-2.03	-1.94	-1.75
Week 2	1.72	1.62	1.46	-2.02	-1.94	-1.74
Week 3	1.71	1.61	1.45	-2.02	-1.93	-1.73
Week 4	1.72	1.61	1.45	-2.02	-1.93	-1.72
Immediate Deflections Due to Surcharge Load	-0.38	-0.44	-0.42	0.13	0.06	0.17
Total Deflections Due to Surcharge Load	-0.5	-0.56	-0.54	0.18	0.12	0.23

Nota: Ver Figura 4-11 para las ubicaciones Norte, central y sur .

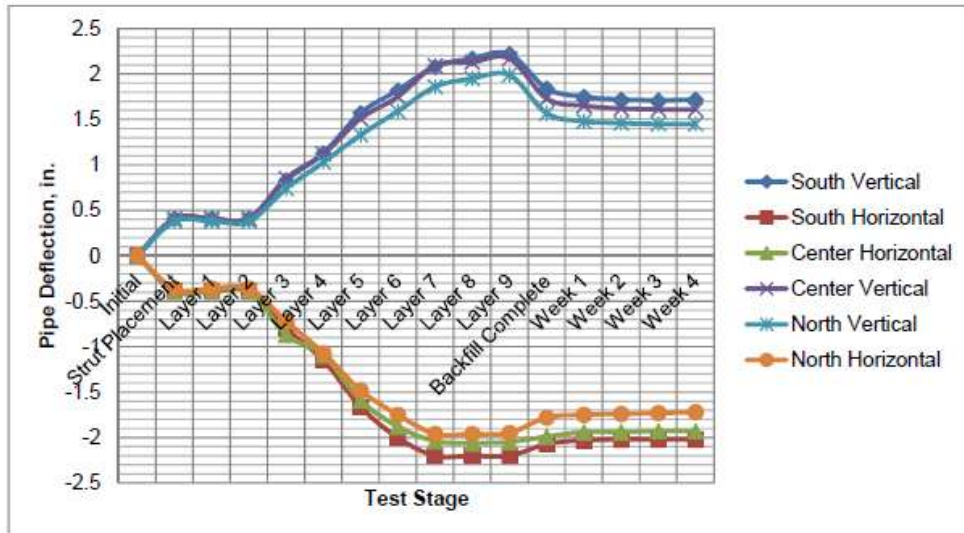


Figura 4-14: Deflexiones de la tubería en la prueba 1a.

Tabla 4-7 Datos de presión de suelo de la prueba 1a, adaptado de (SHARMA, 2013).

Description	Horizontal/Vertical (Springline) Pressures, psi									
	Pipe South	Pipe Center						Pipe North	Soil-box Walls	
	Top	Bottom	Sprin. East	East Wall	Spring. West	West Wall	Top	Top	South	North
Initial	N/A	27.7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Layer 1	N/A	26.8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Layer 2	N/A	24.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Layer 3	N/A	23.3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Layer 4	N/A	21.6	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Layer 5	N/A	21.6	3.7	1.4	2.8	0.8	N/A	N/A	0.4	0.5
Layer 6	N/A	21.3	3.8	1.5	2.1	0.8	N/A	N/A	0.4	0.5
Layer 7	N/A	21.2	3.1	1.1	0.5	0.7	N/A	N/A	0.6	0.4
Layer 8	N/A	21.3	1.5	0.9	0.8	0.5	N/A	N/A	0.6	0.4
Layer 9	N/A	21.3	2.1	0.9	1.3	0.6	N/A	N/A	0.6	0.4
Backfill Complete	15.5	24.7	4.9	2.5	5.4	2.2	9.6	9.2	1.1	0.7
Week 1	13.0	24.8	4.1	2.8	5.4	2.7	8.8	8.9	1.5	1.1
Week 2	12.5	25.4	3.6	2.6	5.2	2.5	8.7	8.9	1.4	0.9
Week 3	12.8	25.6	3.4	2.5	5.3	2.5	8.9	9.1	1.5	0.9
Week 4	9.4	25.7	2.9	2.1	5.3	2.2	6.8	8.8	1.3	0.8

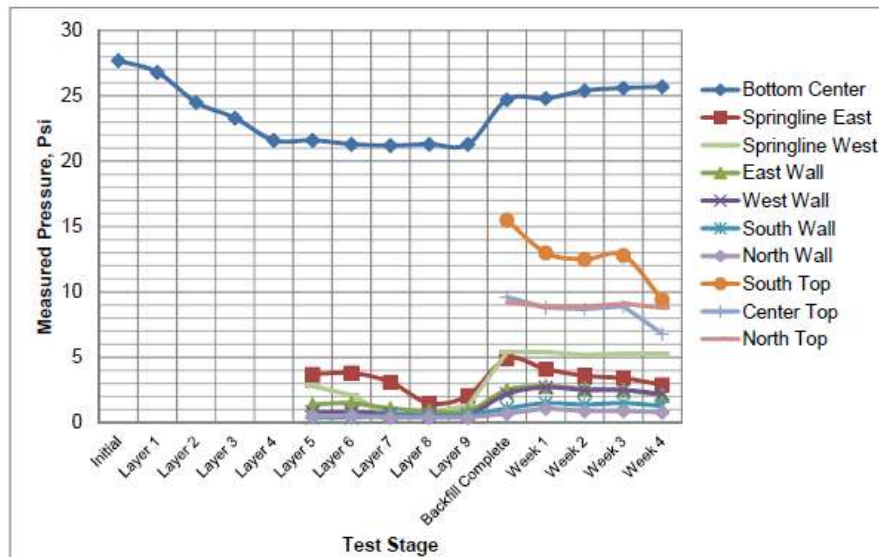


Figura 4-15: Presiones de suero en diferentes etapas de la prueba 1a, adaptado de (SHARMA, 2013).

4.1.2.6. Deformaciones de la pared de la tubería

Galgas extensométricas fueron instaladas en 36 posiciones de forma circunferencial, como se describe en la sección 4.1.1.4; las deformaciones fueron medidas satisfactoriamente en 32 puntos. Las Tablas

desde la Tabla 4-8 a la Tabla 4-13 presentan las deformaciones en las paredes de la tubería en las diferentes etapas de la prueba 1a.

Tabla 4-8 Deformaciones en la sección sur en el interior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).

Description	Strain (Micro Strain, $\mu\epsilon$)								
	Crown	45	SL	135	Invert	225	SL	315	Crown Longitudinal
Initial/Strut Placement	-96	11	72	5	-101	25	58	41	-396
Layer 1	-56	-2	61	75	-144	75	51	29	-363
Layer 2	-15	-7	45	123	-177	128	48	10	-316
Layer 3	-90	-37	125	47	-222	87	132	0	-366
Layer 4	-133	-59	159	31	-263	58	213	6	-368
Layer 5	-243	-80	331	-32	-283	26	329	6	-357
Layer 6	-330	-64	424	-74	-291	14	329	29	-344
Layer 7	-477	-43	391	-99	-276	-6	260	243	-345
Layer 8	-591	110	369	-116	-250	-15	257	338	-350
Layer 9	-639	128	359	-128	-224	-24	260	338	-242
Backfill Complete	-242	80	382	-257	86	-152	255	262	N/A
Week 1	-426	80	372	-278	133	-201	250	259	N/A
Week 2	-586	79	369	-283	141	-197	250	259	N/A
Week 3	-585	77	360	-289	151	-209	247	257	N/A
Week 4	-581	76	354	-295	169	-204	245	261	N/A

Tabla 4-9 Deformaciones en la sección sur en el exterior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).

Description	Strain (Micro Strain, $\mu\epsilon$)		
	SL	Top	SL
Initial/Strut Placement	-65	97	-62
Layer 1	-51	68	-46
Layer 2	-69	79	-73
Layer 3	-80	112	-123
Layer 4	-165	154	-175
Layer 5	N/A	262	-404
Layer 6	N/A	355	N/A
Layer 7	N/A	517	N/A
Layer 8	N/A	642	N/A
Layer 9	N/A	672	N/A
Backfill Complete	N/A	515	N/A
Week 1	N/A	507	N/A
Week 2	N/A	506	N/A
Week 3	N/A	504	N/A
Week 4	N/A	499	N/A

Tabla 4-10 Deformaciones en la sección central en el interior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).

Description	Strain (Micro Strain, $\mu\epsilon$)								
	Crown	45	SL	135	Invert	225	SL	315	Crown Longitudinal
Initial/Strut Placement	-75	7	70	14	-85	27	65	27	6
Layer 1	-83	-8	81	16	-108	37	67	22	7
Layer 2	-90	-15	57	22	-126	42	86	3	9
Layer 3	-99	-37	132	31	-209	55	129	1	4
Layer 4	-107	-72	180	52	-369	70	205	-1	8
Layer 5	-217	-93	352	-11	-389	38	321	-1	19
Layer 6	-304	-77	445	-53	-397	26	321	22	32
Layer 7	-451	-56	412	-78	-382	6	252	236	31
Layer 8	-565	97	390	-95	-356	-3	249	331	26
Layer 9	-613	115	380	-107	-330	-12	252	331	134
Backfill Complete	-506	-18	372	-216	-258	168	268	272	60
Week 1	-516	-16	366	-236	-260	221	268	273	64
Week 2	-509	-16	363	-239	-258	230	268	273	60
Week 3	-503	-15	362	-244	-260	242	265	275	63
Week 4	-501	-15	354	-249	-261	264	264	276	59

Tabla 4-11 Deformaciones en la sección central en el exterior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).

Description	Strain (Micro Strain, $\mu\epsilon$)		
	SL	Top	SL
Initial/Strut Placement	-62	96	-50
Layer 1	-46	83	-35
Layer 2	-53	77	-50
Layer 3	-115	101	-86
Layer 4	-215	143	-135
Layer 5	-373	232	-304
Layer 6	-372	318	-419
Layer 7	-297	490	-375
Layer 8	-298	591	-361
Layer 9	-295	634	-354
Layer 10	-306	602	-368
Backfill Complete	-317	499	-383
Week 1	-312	498	-377
Week 2	-311	495	-373
Week 3	-311	493	-371
Week 4	-307	499	-361

Tabla 4-12 Deformaciones en la sección norte en el interior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).

Description	Strain (Micro Strain, $\mu\epsilon$)								
	Crown	45	SL	135	Invert	225	SL	315	Crown Longitudinal
Initial/Strut Placement	-91	9	69	12	-92	26	65	102	-11
Layer 1	-56	-2	61	75	-144	75	51	29	-363
Layer 2	-15	-7	45	123	-177	128	48	10	-316
Layer 3	-90	-37	125	47	-222	87	132	0	-366
Layer 4	-111	-72	174	54	-289	67	194	53	-9
Layer 5	-221	-93	346	-9	-309	35	310	53	2
Layer 6	-308	-77	439	-51	-317	23	310	76	15
Layer 7	-455	-56	406	-76	-302	3	241	290	14
Layer 8	-569	97	384	-93	-276	-6	238	385	9
Layer 9	-617	115	374	-105	-250	-15	241	385	117
Backfill Complete	-534	47	391	-325	232	-178	273	242	-18
Week 1	-532	51	382	-348	283	-198	269	239	-13
Week 2	-531	53	382	-352	292	-201	269	240	-12
Week 3	-535	52	375	-358	304	-206	263	253	-11
Week 4	-533	57	372	-366	326	-215	260	260	-9

Tabla 4-13 Deformaciones en la sección norte en el exterior de la tubería para la prueba 1a. Adaptado de (SHARMA, 2013).

Description	Strain (Micro Strain, $\mu\epsilon$)		
	SL	Top	SL
Initial/Strut Placement	-54	81	-619
Layer 1	-38	68	-604
Layer 2	-45	62	-619
Layer 3	-107	86	-655
Layer 4	-158	104	-548
Layer 5	-316	193	-717
Layer 6	-315	279	-832
Layer 7	-240	451	-788
Layer 8	-241	552	-774
Layer 9	-238	595	-767
Backfill Complete	-361	510	N/A
Week 1	-359	518	N/A
Week 2	-357	518	N/A
Week 3	-353	523	N/A
Week 4	-351	526	N/A

4.2. Modelo de elementos finitos para la prueba 1a

El modelado para analizar la interacción de la tubería y el terreno dentro de las condiciones de instalación en una zanja consiste en ensamblar la geometría de la zanja y la tubería, definir las propiedades del material de la tubería y el terreno/relleno, ensamblar la secuencia constructiva de compactación del relleno, establecer las condiciones de contorno, aplicar cargas superficiales, definir las superficies de contacto y finalmente proporcionar el tamaño de malla y el tipo de elemento adecuados.

La presente tesis considera resolver la no linealidad del material del relleno utilizando el modelo matemático de Mohr Coulomb, mientras que la tubería se considera en su rango elástico lineal; por otro lado, se considera la no linealidad geométrica del suelo para largas deformaciones y grandes desplazamientos, y finalmente se considera la no linealidad del contacto bajo la formulación Superficie-Superficie con pequeños deslizamientos (Mayores detalles ver 3.1).

En el siguiente esquema mostrado en la Figura 4-16 se resumen el procedimiento de cálculo usado.

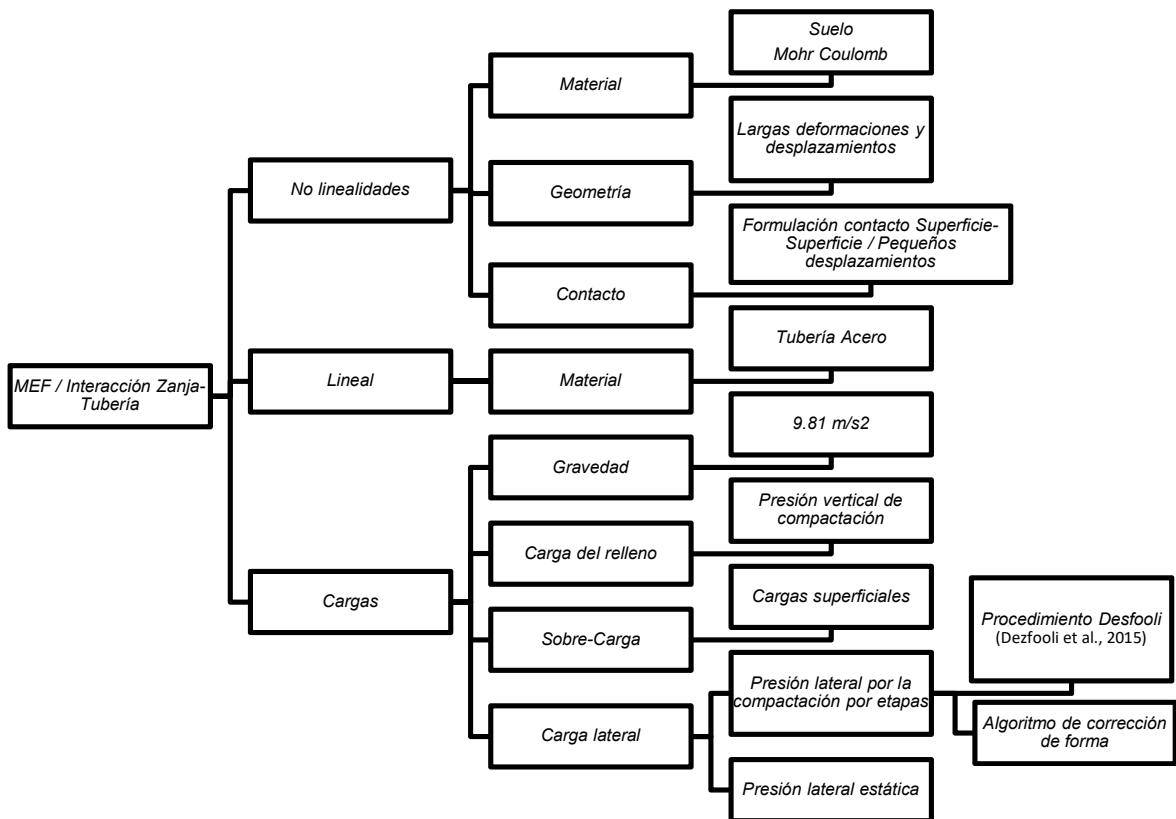


Figura 4-16: Procedimiento de análisis MEF de una tubería enterrada en una zanja

El modelo tridimensional, para el análisis por el método de elementos finitos (MEF) para una tubería acoplada al relleno con un suelo nativo arcilloso con propiedades mostradas en la Tabla 4-3, es capaz de simular el comportamiento de la tubería bajo diferentes condiciones de la zanja bajo el procedimiento establecido. EL modelo analiza y reproduce el sistema de rigideces de la interacción tubería-suelo,

modelando las propiedades del suelo y considerando el contacto entre los diferentes materiales. Sin embargo, lo ideal sería considerar la rigidez de las paredes de la zanja, pero, a fin de reproducir las condiciones del experimento se considera un contacto rígido (El análisis paramétrico mostrado en el capítulo 5 considera las rigideces de las paredes de contacto del suelo nativo). El modelo de elementos finitos toma en consideración las fuerzas de compactación que son establecidos basado en investigaciones previas por (Dezfooli et al., 2015) y que se describe brevemente más adelante.

Una vez que el modelo desarrollado sea verificado con datos de pruebas experimentales mostradas en la sección 4.1, se desarrollará un análisis de la tubería bajo distintas condiciones de carga.

A continuación, se describe el modelo de elementos finitos desarrollado para la validación del procedimiento planteado y los resultados serán comparados con los datos experimentales obtenidos en la sección anterior.

4.2.1. Geometría del modelo

La geometría de la zanja es definida por diferentes partes que componen la tubería, la cama de grava, las capas compactadas y el relleno sobre la tubería. La caja de concreto es representada por las condiciones de contorno como elemento rígido restringiendo el desplazamiento lateral en las paredes y el desplazamiento vertical en la base. Ver Figura 4-17.

Como se describe en la sección 4.1, en la descripción experimental, la tubería de acero tiene un diámetro de 73.75 in (1,873.25 mm) con un espesor de pared de 0.313 in (7.62 mm). La cama de grava tiene una altura de 12 in (304.8 mm), y sobre ella se encuentra el suelo nativo compactado hasta alcanzar una altura de 34.25 in (869.95 mm) por encima del tope de la tubería, se consideran 9 capas de suelo con grados de compactación entre el 85% al 95% según el *Standard Proctor* para la máxima densidad seca y un relleno de material nativo en la parte superior.

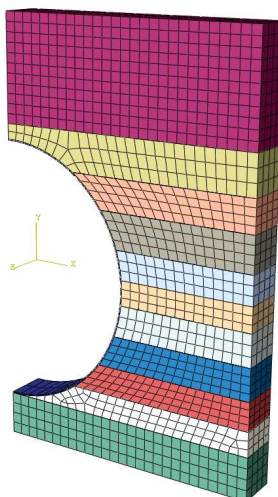


Figura 4-17: Geometría del modelo de elementos finitos – Prueba 1a.

La longitud del modelo ha sido definido de acuerdo con el análisis de sensibilidad desarrollado en la sección 4.3.

4.2.2. Condiciones de contorno y contacto

Se considera un modelo simétrico al eje central de la zanja respecto al eje vertical (Y). Las condiciones de contorno impuestas en los bordes del modelo han sido establecidas para restringir los movimientos en la dirección horizontal (X) en los nodos laterales del modelo, así mismo se restringe todo movimiento en el borde inferior del modelo en los ejes (X), (Y) y (Z) así como los giros respecto de los mismos. Al ser una geometría simétrica, se considera la restricción en el borde lateral coincidente con el eje directriz de la zanja en el eje (X) así como los giros en el plano (XY), permitiendo de esta forma reducir el número de elementos del modelo y por ende el costo computacional. Ver Figura 4-18.

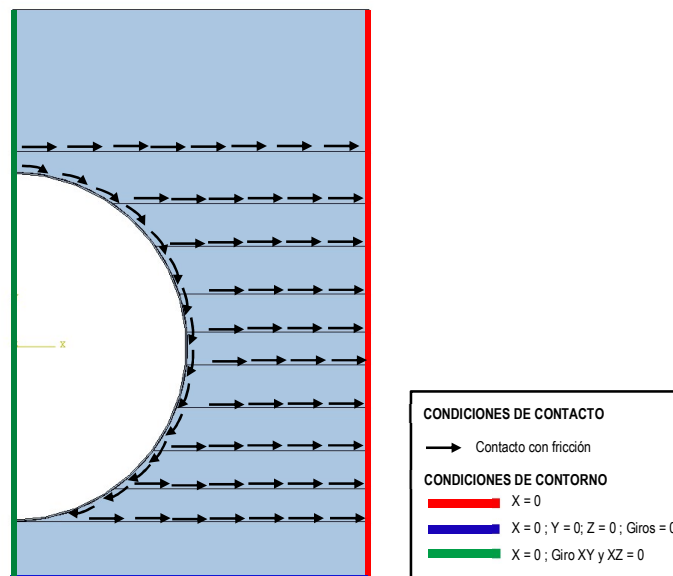


Figura 4-18: Condiciones de contacto y contorno del modelo – Prueba 1a.

El ángulo de fricción ha sido definido de acuerdo con el análisis de sensibilidad desarrollado en la sección 4.3.

4.2.3. Mallado y tipos de elementos

EL modelo planteado propone el uso elementos del tipo cuña (*wedge element*) de seis (6) nodos y del tipo ladrillo hexagonales (*brick element*) lineales de ocho (8) nodos con integración reducida y “*hourglass control*” tanto para el suelo como para los materiales de acero. Se considera integración reducida por tener suficiente precisión con un punto de integración por elemento y reducir así los costos computacionales.

El tamaño de la malla ha sido definido de acuerdo al análisis de sensibilidad desarrollado en la sección 4.3.

4.2.4. Cargas verticales y horizontales

De acuerdo con la configuración de la Prueba 1a, se considera la aplicación de una presión superficial sobre el nivel tope de la caja de concreto simulando la aplicación distribuida del peso de la grava instalada dentro de una caja de madera acondicionada sobre la zanja. La carga vertical aplicada será tal que se consiga una presión de 62 kPa sobre el tope de la tubería.

Adicionalmente se consideran cargas verticales actuantes por el propio peso de cada capa de material por medio de la aplicación del incremento gradual de la gravedad desde un valor de 0 hasta alcanzar el valor constante de 9.81 m/s².

Para el caso de la presión lateral inducida debida a la compactación, se aplica una carga horizontal a cada capa constructiva del suelo compactado, Según (Dezfooli et al., 2015), el modelo de elementos finitos debe considerar el efecto de la compactación de cada capa de material de relleno lateral aislado o acoplado con la presión lateral del suelo en reposo y la compactación del suelo. Luego, las tensiones calculadas se aplican a cada capa de suelo utilizando la carga de temperatura equivalente. Además, los estudios de (Dezfooli et al., 2015), basados en las pruebas experimentales en una caja de concreto (soil box), mostraron que para cada capa de suelo el coeficiente de expansión térmica (α) se define igualmente como 0.001 para todas las capas en la dirección (X) y cero para las otras dos direcciones (Y y Z). El coeficiente de expansión térmica es un valor virtual y no es la expansión térmica real del material. La compactación y la presión lateral del suelo en reposo se aplican en términos de distribución uniforme de la temperatura. La temperatura calculada de $\alpha\Delta T$ para cada capa de suelo se aplica después de la activación de dicha capa. A continuación se describe la ecuación presentada por (Dezfooli et al., 2015) para la presión lateral del suelo debido a la compactación, utilizando la mecánica de la formulación del material para una serie de resortes.

$$\alpha\Delta T = \sigma_s \left(-\frac{A}{LK_{pipe}} - \frac{A}{LK_{wall}} - \frac{1}{E_{soil}} \right) \quad (\text{Ec. 4-1})$$

Donde;

σ_s : Esfuerzo lateral del suelo proporcional a la cohesión del relleno lateral (*un-drained shear strength, Cu*) y en función de su índice de plasticidad. Para altos y bajos índices de plasticidad se recomienda para simulación 0.8Cu y 0.2Cu respectivamente).

A : Área transversal de la capa del suelo.

L : Longitud de la capa del suelo.

K_{pipe} : Módulo de Young x Espesor de la tubería.

K_{wall} : Módulo de Young de la pared de la zanja x Longitud de pared de la zanja.

E_{soil} : Módulo de Young del relleno lateral.

4.2.5. Propiedades de los materiales

La caracterización de los materiales plásticos utilizada en la presente tesis es de acuerdo a la formulación de Mohr Coulomb. En la Tabla 4-14 se muestran los valores considerados para el análisis.

Tabla 4-14 Propiedades del suelo.

Densidad	De acuerdo a la Tabla 4-5
Esfuerzo de fluencia	248,200 kPa (36 ksi)
Módulo de elasticidad	4826 kPa (700 psi)
Coefficiente de <i>Poison</i>	0.3
Cohesión (<i>un-drained shear strength</i>)	100 kPa (14.5 psi)
Angulo de fricción	8.1°

Para el caso de la prueba experimental 1a se verifica que las tensiones de la tubería estuvieron por debajo de su límite elástico por lo que se considera la formulación lineal, sin embargo, para aplicaciones de estudio en el capítulo 5 se modela aplicando el esfuerzo de fluencia para verificar si, para las condiciones de instalación dadas, la tubería fallará. En la Tabla 4-15 se muestran los valores de las propiedades de la tubería considerados para el análisis.

Tabla 4-15 Propiedades de la tubería.

Densidad	7.844 t/m ³
Esfuerzo de fluencia	248,200 kPa (36 ksi)
Módulo de elasticidad	2.07E+08 kPa (30,000 ksi)
Coefficiente de <i>Poison</i>	0.3

4.2.6. Etapas constructivas

El modelo de elementos finitos de la prueba experimental 1a considera la reproducción de la etapa constructiva puesto que se hicieron mediciones de los desplazamientos y deformaciones luego de la compactación de cada capa de suelo aplicando las cargas de su propio peso y las cargas laterales debidas a la compactación.

El procedimiento para el modelado de las etapas constructivas por capas es desarrollado por (Dezfooli et al., 2015) donde se explica a mayor detalle en qué consiste, sin embargo, aquí se explica de forma resumida:

- El procedimiento consiste en la utilización de un algoritmo de activación y desactivación de las capas de suelo modeladas. La Figura 4-19 ilustra las tres últimas capas en contacto con la tubería en el paso en que solo la tubería y un grupo de elementos correspondiente a todas las capas de suelo activas y desactivas se encuentran activas. Los nodos compartidos permiten a las partes del modelo

capturar y seguir la geometría modificada acorde a la forma deformada de las partes vecinas, y los nodos compartidos con la tubería se deformarán y seguirán la geometría modificada.

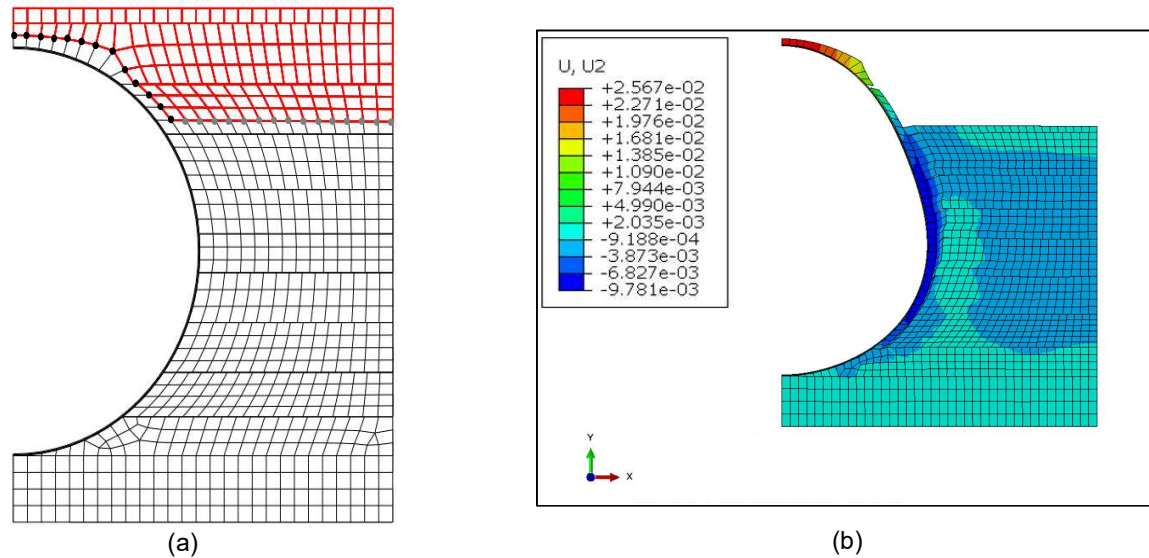


Figura 4-19: Nodos compartidos entre las partes activas y desactivas – Prueba 1a. (a) **Puntos negros**, Nodos compartidos entre el suelo y la tubería y **puntos grises**, Nodos compartidos entre capas de suelo. (b) Resultados de análisis en software de elementos finitos.

4.3. Análisis de sensibilidad del modelo de elementos finitos

El modelo de elementos finitos desarrollado en la presente sección para la prueba experimental 1a fue validada luego de haber evaluado la condición de los resultados por la modificación de algunas variables como son la compactación; la longitud del modelo; el coeficiente de rozamiento o fricción entre las capas del relleno-relleno y del relleno-tubería; y el tamaño de la malla. En la Figura 4-20 se muestran ejemplos de alguno de los resultados obtenidos en el software de elementos finitos.

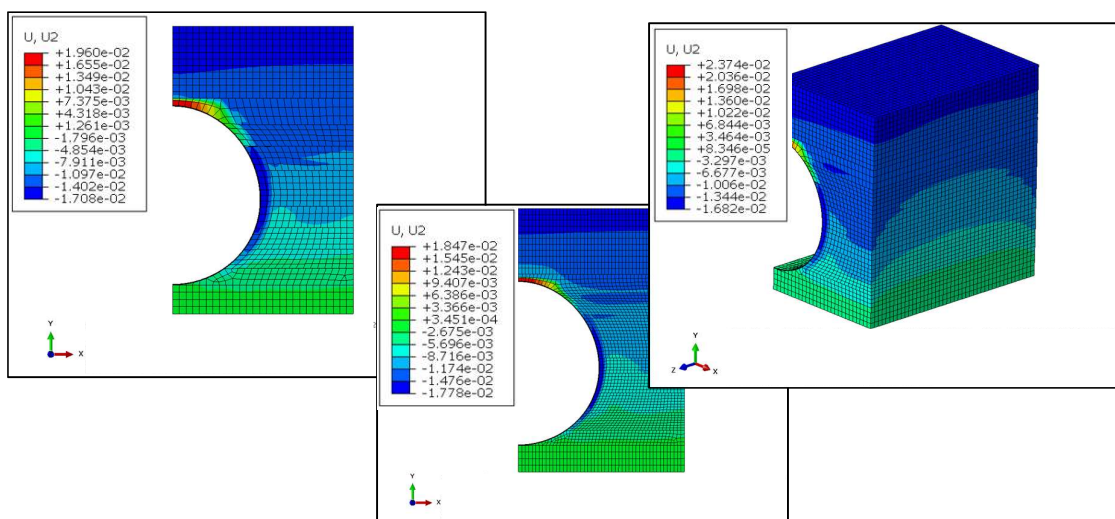


Figura 4-20: Algunos resultados de análisis de sensibilidad realizados en software de elementos finitos.

Los resultados obtenidos en el análisis de elementos finitos han sido post-procesados y exportados a software MS Excel para generación de gráficas resumen. El análisis realizado se desarrolla y describe a continuación.

4.3.1. Compactación

Como se explica en la sección 4.2.4, la compactación por capas durante la etapa de construcción generan cargas laterales en el suelo que afectan a la tubería y que su valor es directamente proporcional a un porcentaje del esfuerzo cortante de un suelo compactado y no drenado cuyo valor es igual a la cohesión del suelo (C_u). El análisis de sensibilidad considera la evaluación del modelo aplicando cargas laterales entre $0.2 C_u$ al $0.6 C_u$. Como se muestra en la Figura 4-21 los resultados indican que para las primeras capas, a la altura de la base de la tubería, la compactación no es efectiva puesto que se consideran presiones bajas alrededor del 20% del C_u . Esta zona es conocida como “*Haunch Zone*”. Para capas superiores a las dos primeras, el porcentaje asciende y se encuentra entre el 30% al 60% del C_u para finalmente, en las dos últimas capas, reducir su valor hasta el 40%. Como se puede observar, la presión lateral es máxima en la zona lateral central “*Springline*” de la tubería.

Los resultados obtenidos van acorde a la investigación desarrollada por (Clayton & Symons, 1992) donde, para índices de plasticidad de suelos del 48% la presión lateral alcanza hasta un 80% del C_u por lo que para el índice de plasticidad de 26% del relleno B6 utilizado en la prueba experimental 1a, se utilizan valores porcentuales inferiores. Entonces el rango verificado de $0.2C_u$ al $0.6C_u$ en la prueba experimental 1a está de acuerdo con el rango sugerido por la investigación de Clayton.

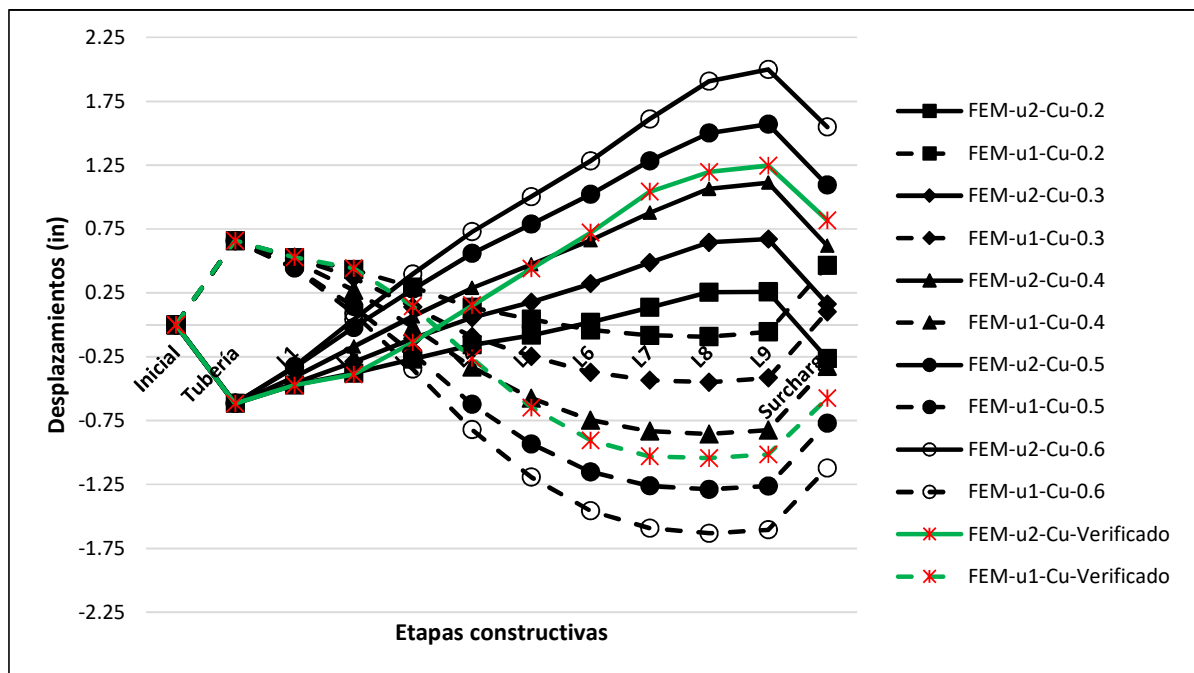


Figura 4-21: Resultados del análisis paramétrico de sensibilidad – Compactación de la Prueba 1a.

4.3.2. Longitud de modelo

Se realizó un análisis de sensibilidad evaluando las longitudes del modelo de 0.3 m, 0.6 m, 1.5 m y 3 m de la prueba experimental 1a, y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4-22.

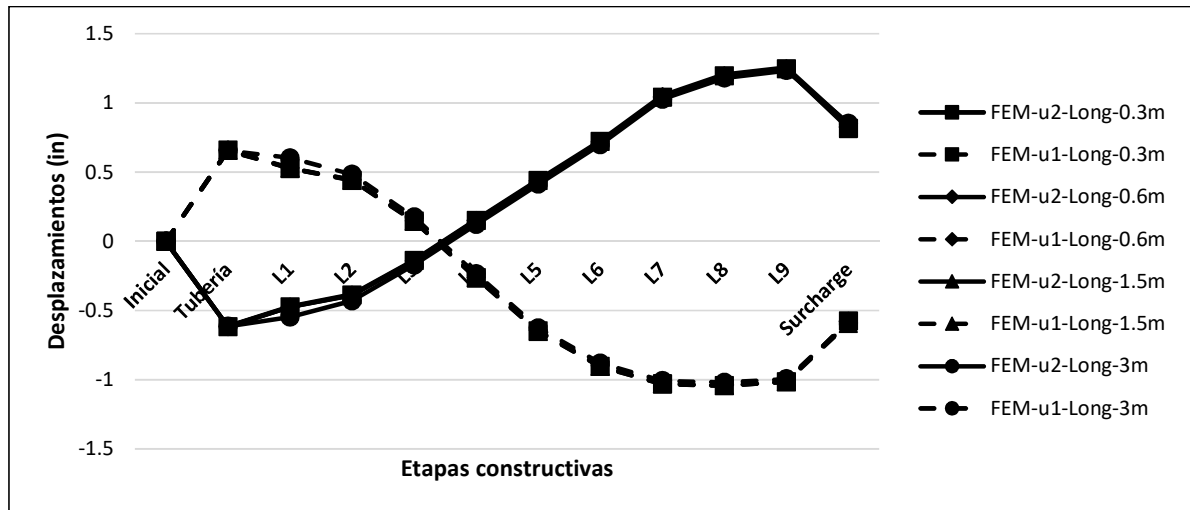


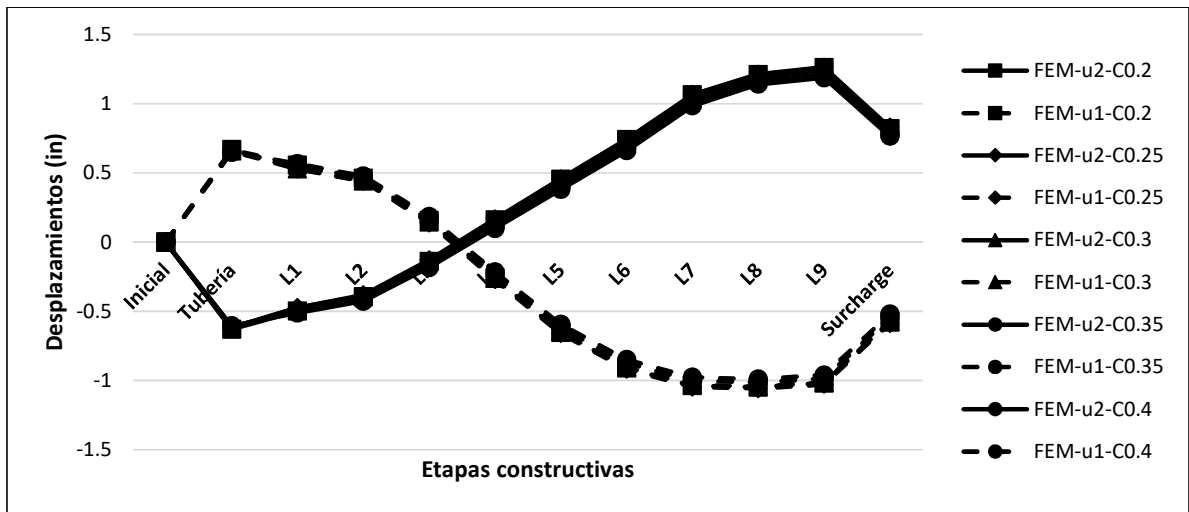
Figura 4-22: Resultados del análisis paramétrico de sensibilidad – Longitud del modelo de la Prueba 1a.

Como se puede observar, la variación de la longitud del modelo de la prueba experimental 1a no varía considerablemente, indicando que la variación, entre una longitud de 0.3 m y una de 3 m, es del 4% para los desplazamientos verticales y del 2% para los desplazamientos horizontales. Sin embargo, el costo computacional de un análisis de un modelo de 3 m de longitud es 50 veces (valor aproximado medido durante análisis) mayor que el del modelo de 0.3 m. Considerando que la variación de los resultados es mínima, la presente investigación utilizará un modelo de 0.3 m.

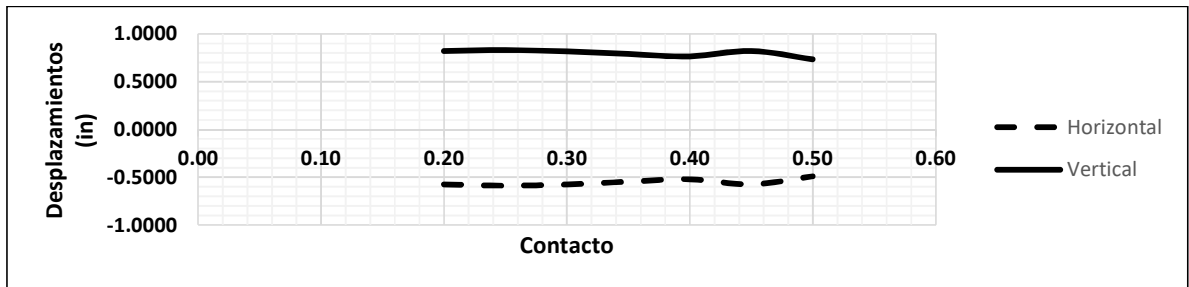
4.3.3. Contacto

De acuerdo con la investigación de (El-Chazli et al., 2005), el coeficiente de fricción entre materiales de suelo y tuberías de acero va en el rango del 0.2 al 0.5; por otro lado, (Shaurav Alam, Erez N. Alloinche, Chris Bartlett, Ang Sherpa, 2013), para suelos arcillosos con un ángulo de fricción interno de 22.2° y cohesión de 87 kPa (12.5 psi), el rango de ángulos de fricción van entre 0.3 a 0.96 de acuerdo a la profundidad de enterramiento de la tubería. La presente investigación considera un análisis de sensibilidad de 0.2 a 0.5 con un paso de 0.1.

La Figura 4-23 muestra los resultados obtenidos y se observa que, para los coeficientes analizados, los desplazamientos verticales y horizontales, para un rango de 0.2 a 0.5, varían un 10% y 14% respectivamente. Por otro lado, se observa que la variación en los valores de desplazamiento para el rango propuesto no es lineal por lo que para el presente análisis se utiliza el valor de 0.3 (aproximadamente el valor promedio).



(a)

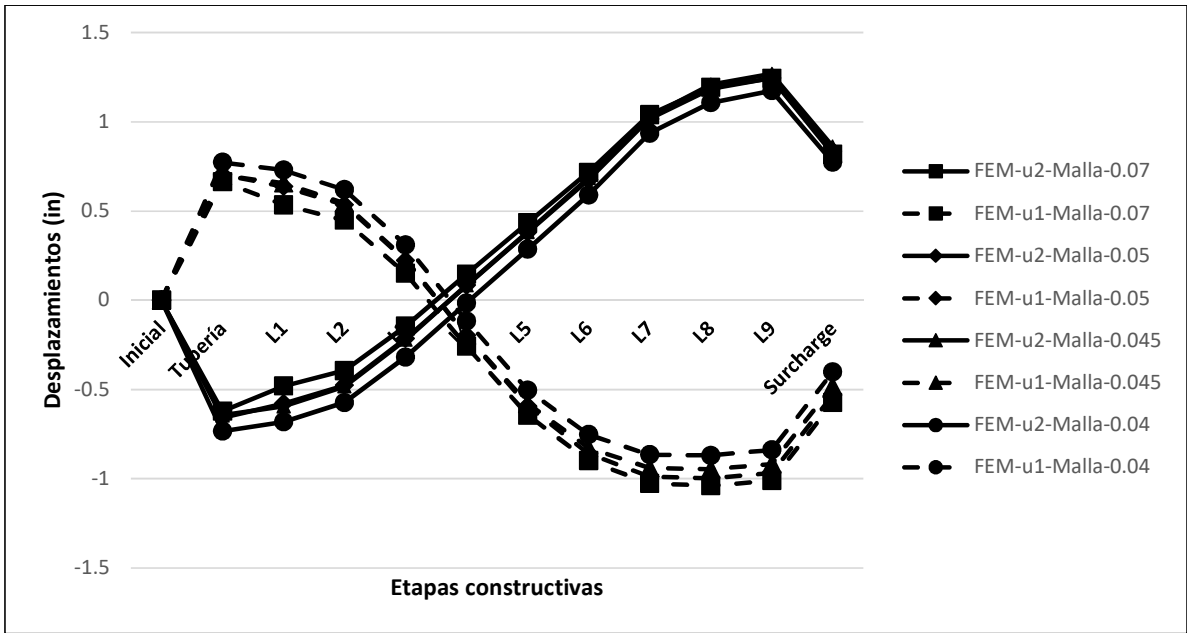


(b)

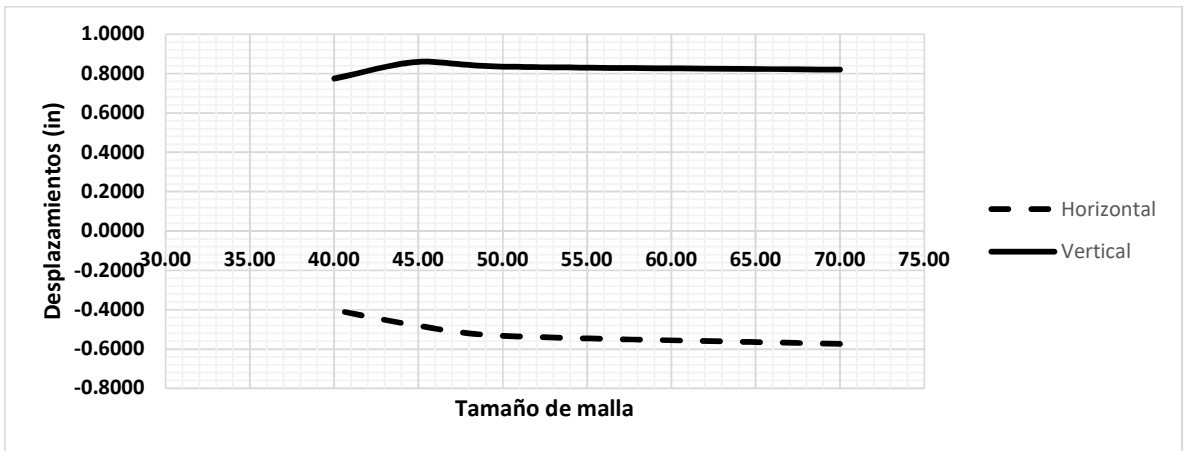
Figura 4-23: Resultados del análisis paramétrico de sensibilidad – (a) Contacto del modelo de la Prueba 1a. (b) Desplazamientos en última etapa de construcción.

4.3.4. Tamaño de la malla

El análisis de sensibilidad se desarrolló para los tamaños de malla de 40 mm, 45 mm, 50 mm y 70 mm. El costo computacional fue de 7 veces más para el más denso respecto del menos denso. Los resultados mostrados en la Figura 4-24 indican que la variación de los resultados de los desplazamientos en la última etapa de construcción varía entre el 5% y 30% para los desplazamientos verticales y horizontales respectivamente; sin embargo, a fin de tener resultados más óptimos a un menor costo computacional, la presente investigación utilizará una densidad de malla de 50 mm, puesto que para las mallas más densas analizadas las variaciones no son considerables como se muestra en la parte b de la Figura 4-24.



(a)



(b)

Figura 4-24: Resultados del análisis paramétrico de sensibilidad – (a) Tamaño de malla del modelo de la Prueba 1a. (b) Desplazamientos en última etapa de construcción..

4.4. Resultados del modelo de elementos finitos

De acuerdo con el modelo de elementos finitos desarrollado, se verificaron los resultados con los obtenidos en la prueba experimental 1a. Se tuvieron las siguientes consideraciones:

- La deflexión inicial de la tubería debido al propio peso de la tubería no fue reportada en la prueba experimental, allí se indica que las mediciones fueron calibradas para empezar con los desplazamientos en 0 desde la forma deformada de la tubería. Para el caso del modelo de elementos finitos se reduce la primera deformación a 0 restando por el primer valor de deformación de la tubería debido a su propio peso para hacerlo comparable con los datos experimentales.

- La tubería fue instrumentada para medir las deformaciones horizontales y verticales de la tubería por lo que se comparan con estos los valores obtenidos con el modelo de elementos finitos en cada etapa de la construcción.
- Así mismo, la tubería fue instrumentada para medir las deformaciones circunferenciales durante las etapas de construcción, estos valores obtenidos son comparados con los calculados con el método de elementos finitos en la última etapa constructiva (luego de aplicar la sobre carga).

4.4.1. Deflexiones

Los resultados post-procesados de las deflexiones horizontales y verticales se muestran en la Figura 4-25. Los resultados del análisis de deflexión vertical en la última etapa de construcción se muestran en la Figura 4-26

Los desplazamientos horizontales son negativos y los verticales positivos y los valores son comparados al final de la construcción.

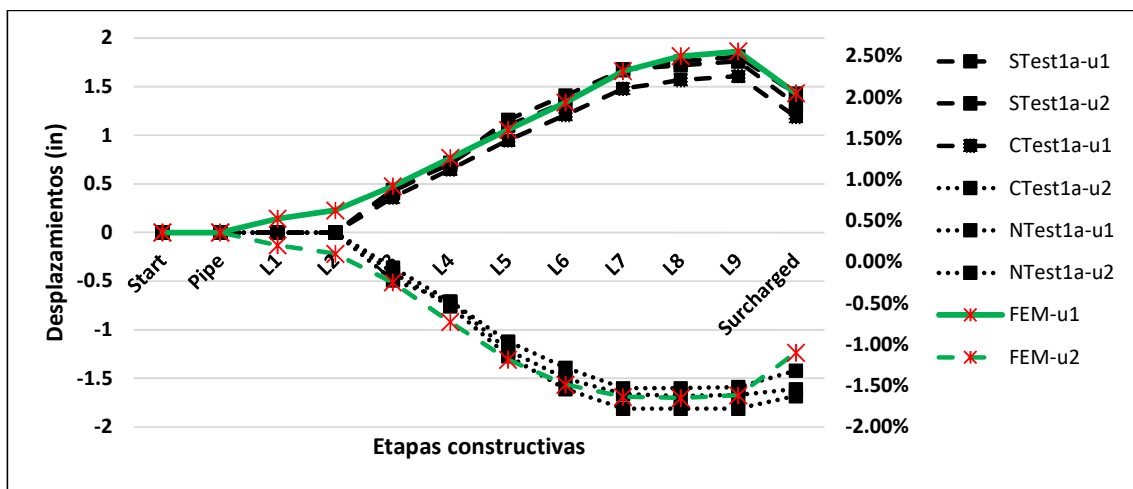


Figura 4-25: Deflexión horizontal y vertical: MEF Vs Prueba 1a.

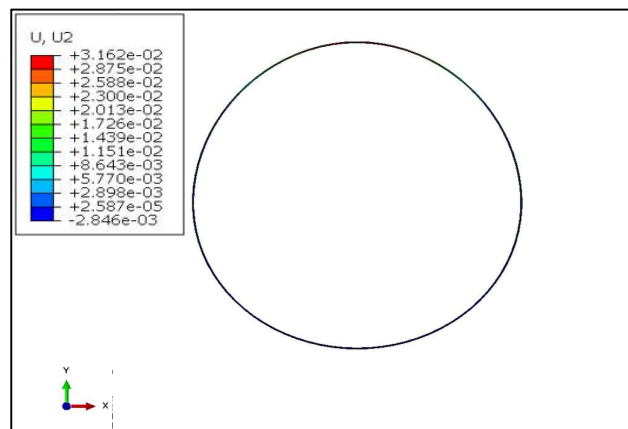


Figura 4-26: Deflexión en tubería en última etapa de la construcción analizada en software MEF.

4.4.2. Deformaciones

Los resultados del análisis por elementos finitos son comparados con los obtenidos experimentalmente en la prueba 1a y se comparan las deformaciones justo al final de la construcción, luego de la aplicación de la sobrecarga sobre la superficie de la zanja. Se considera 0° al tope de la tubería (Crown) y 180° en la base de la tubería (*Invert*).

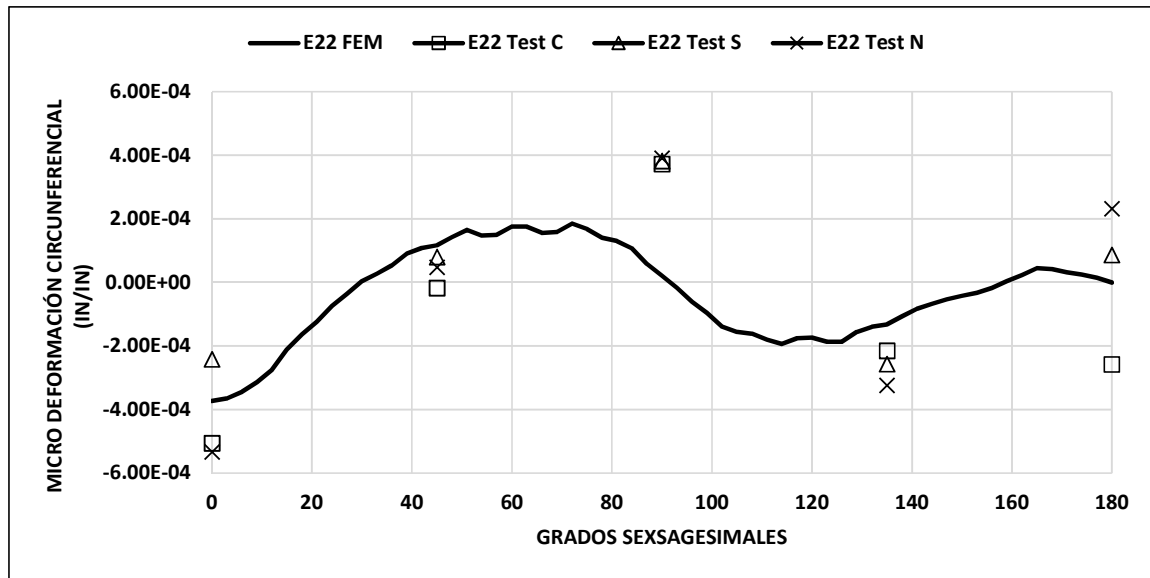


Figura 4-27: Deformaciones circunferenciales: MEF Vs Prueba 1a (Etapa final de la construcción).

4.4.3. Análisis de los resultados – Validación de datos experimentales con MEF

El modelo de elementos finitos propuesto, luego del análisis de sensibilidad desarrollado, aproxima aceptablemente los resultados experimentales. Como se observa en la Figura 4-25 y la Figura 4-27 los desplazamientos tienen una mejor aproximación y las deformaciones tienen una menor aproximación, sin embargo, esto va acorde con las bases de los elementos finitos cuya formulación está en función de los desplazamientos y las deformaciones son derivadas de la misma.

Adicionalmente, se puede observar que la zona de la tubería con menor aproximación es la parte central de la tubería (*Springline*), los desplazamientos horizontales son menores en la última etapa de la construcción y por ende las deformaciones no aproximarán adecuadamente en dicha zona. Una hipótesis puede ser que el modelo de elementos finitos considera el módulo de elasticidad del suelo uniforme durante toda la etapa de construcción, sin embargo, su valor depende de la variable de profundidad o presión aplicada (Hartley et al., 1988) y en la etapa final de la construcción se aplican cargas adicionales sobre las capas del relleno lateral de la tubería por lo que el valor del módulo del suelo debería ser mayor, lo que permitiría una mayor rigidez y evitar que la carga superficial deforme de más la tubería.

CAPÍTULO 5

Análisis paramétrico del comportamiento tubería-terreno sometido a cargas superficiales de vehículos de carga pesada

5.1. Generalidades para el análisis paramétrico

El comportamiento de las tuberías sometida a distintas solicitaciones de carga debido a distintas condiciones de instalación en la zanja permitirá conocer los efectos de alguno de los parámetros pudiendo así identificar cuáles son los que más representación desfavorable tienen en los resultados.

Como se menciona en la sección 1.4 del presente documento, los parámetros que afectan en la deflexión y esfuerzos de la tubería son:

- Densidad del relleno o de los rellenos (ρ_r).
- Diámetro exterior de la tubería (D_e).
- Espesor de la tubería (t) – Preseleccionado de acuerdo a los aspectos hidráulicos.
- Módulo de elasticidad del material de la tubería – Preseleccionado de acuerdo a los aspectos hidráulicos (E_t).
- Módulo del suelo del o los rellenos de la zanja (E'_1, E'_2, \dots, E'_n).
- Los valores geométricos recomendados en la sección típica de la tubería.

El presente estudio considera el análisis de tuberías de acero con diámetros comerciales de 36", 42" y 48", con dimensiones normalizadas según (ASME B36.10, 2004) para un espesor fijo STD (*Standard Weight*) cuyo valor es de 0.375", para un material de acero fijo típico para transportes de líquidos ASTM A53-B, con dimensiones típicas de instalación de acuerdo con la Figura 5-3, variando la altura de cama de la tubería, módulo de elasticidad del relleno lateral, el ancho de la zanja, y la altura de relleno sobre la tubería; con cargas superficiales de camiones mineros mostrados en la Tabla-a (Mostrado en la introducción).

5.1.1. Consideraciones generales

A continuación, se describen algunas consideraciones tomadas en cuenta para el desarrollo del análisis paramétrico:

- El análisis será desarrollado utilizando el procedimiento de cálculo por elementos finitos explicado en la sección 4.2 de la presente investigación, la cual valida los datos experimentales de un estudio realizado en laboratorio utilizando una caja de concreto como límite de las paredes de la zanja; sin embargo, el presente estudio considera en el modelo las paredes del suelo natural con un ancho de un diámetro de la tubería a cada lado, que en este caso vendría a ser el del pavimento del *Haul Road* (ver sección 5.2.7) a fin de estimar con mayor precisión el comportamiento de la tubería, ver Figura

5-1. El procedimiento es similar al desarrollado, pero para el cálculo de la presión lateral residual del relleno lateral sobre la tubería, se considera la rigidez de las paredes de la zanja como se explica con mayor detalle en (Dezfooli et al., 2015) conforme a la ecuación (Ec. 4-1).

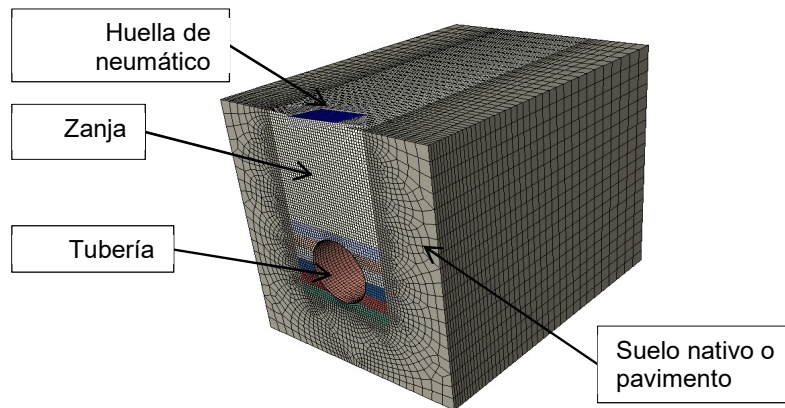
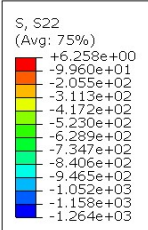
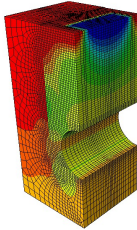
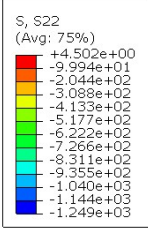
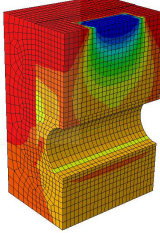
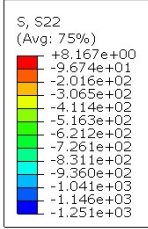
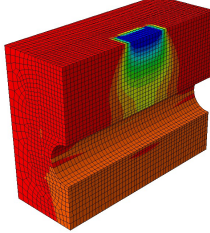
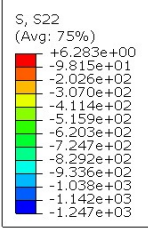
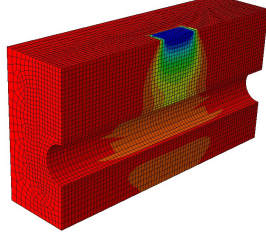
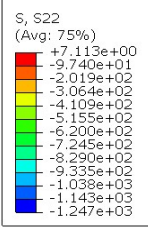
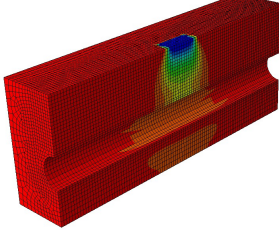


Figura 5-1: Sección de modelo tridimensional de elementos finitos, incluye paredes laterales de la zanja (Modelo simétrico longitudinal y transversal).

- El modelo considera simetría longitudinal y transversal a fin de reducir los costos computacionales.
- La mayor carga superficial aplicada sobre la tubería se encuentra en la zona central de la huella del neumático y se considera que no es afectada por la presión del otro eje de neumáticos del vehículo de carga pesada.
- Según las condiciones de borde del modelo, se considera restricción en el desplazamiento longitudinal del suelo y de la tubería. Se realizó un análisis cualitativo de la afectación de la longitud del modelo frente a la variación de los resultados de esfuerzos verticales producidos por una carga superficial, y de acuerdo a lo mostrado en la Figura 5-2, a mayor longitud de tubería los resultados se ven menos afectados por esta restricción. Por lo tanto, para el análisis paramétrico se considera una longitud simétrica total de modelo de 12 m (modelo de 6 m de longitud con simetría longitudinal y transversal).
- A diferencia del modelo propuesto en la sección 4.2, modelo que solo considera la carga muerta del relleno superior, en el cual se realizó un análisis de sensibilidad de parámetros como densidad de malla, longitud de modelo, grado de compactación y contacto, puntualmente, en referencia a la longitud del modelo, se concluyó que para el nivel de resultados obtenidos solo era necesario un modelo con una longitud de 0.3 m, sin embargo, para el presente estudio paramétrico se considerará un modelo con 6 m de longitud con simetría a fin de poder mostrar la huella del neumático en escala real y evitar afectaciones de condición de borde longitudinal en los resultados, así mismo, el modelo tendrá tamaños de malla mínima y máxima de 0.05 m y 0.5 m respectivamente con mayor densidad en la zona afectada por la carga superficial del neumático. No se consideran mayores densidades y longitud de modelo debido a que el costo computacional es muy alto. Aun así, existirá cierta afectación en la precisión de los resultados de presiones verticales sobre la tubería, sin embargo, las tendencias de esfuerzos y deformaciones en la tubería seguirán siendo las mismas, ya que, al ser un análisis de la

influencia del cambio de algunos parámetros, los resultados tienen ciertas tendencias particulares que permitirán realizar un análisis cualitativo en base de datos cuantitativos.

<p><i>Longitud de modelo (m)</i> <i>Tamaño de malla (m)</i></p>	<p><i>Esfuerzos verticales del suelo, S22</i></p>	<p><i>Modelo 3D</i></p>	<p><i>Esfuerzo vertical sobre cresta de tubería (kPa)</i></p>
<p>2 m 0.05 m</p>			<p>331 kPa</p>
<p>3 m 0.12 m</p>			<p>287 kPa</p>
<p>6 m 0.12 m</p>			<p>321 kPa</p>
<p>9 m 0.12 m</p>			<p>349 kPa</p>
<p>12 m 0.12 m</p>			<p>359 kPa</p>

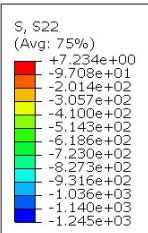
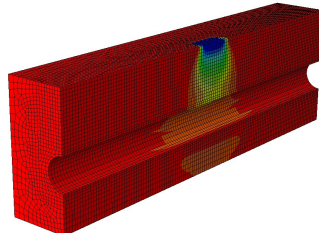
Longitud de modelo (m) Tamaño de malla (m)	Esfuerzos verticales del suelo, S22	Modelo 3D	Esfuerzo vertical sobre cresta de tubería (kPa)
15 m 0.12 m			363 kPa

Figura 5-2: Comparación de resultados de esfuerzos verticales sobre una tubería de 48" STD A53 sometida a una carga superficial de 1,250 kPa, altura de relleno superior de 2.15 m, para diferentes longitudes, modelo de malla C3D8R.

5.2. Parametrización del modelo de elementos finitos

5.2.1. Dimensiones de la zanja

Se considera que la tubería estará instalada sobre una cama de arena fina (Suelo tipo SW) con una altura de 150 mm por debajo de la parte inferior de la tubería, y alcanzando 1/6 o 1/12 del diámetro exterior de la tubería desde la parte inferior de la misma. El relleno lateral en las paredes de la tubería será instalado en capas compactadas entre el 80% y 95% (*Standard Proctor*) en capas de alrededor de 200 mm, alcanzado 150 mm de altura sobre el nivel superior de la tubería.

Para el caso de instalación de la zanja en el *Haul Road* Minero, el relleno (BF) sobre la tubería será del mismo material utilizado para la construcción del *Haul Road*, compactado al 95% (*Standard Proctor*) con altura (H) variable.

El ancho de la zanja (W) será de 0.6 m, 0.8 m y 1 m más el diámetro de la tubería (OD).

En la Figura 5-3 se muestra un esquema de la parametrización propuesta.

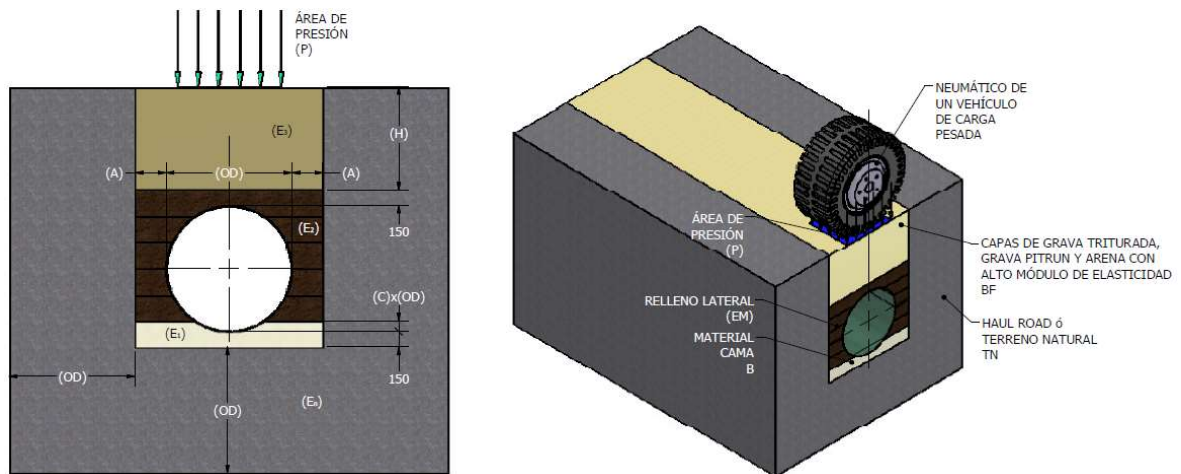


Figura 5-3: Esquema parametrizado de sección de instalación de tubería en zanja, (dimensiones en mm).

5.2.2. Propiedades de los materiales

Los materiales seleccionados en el presente estudio paramétrico se muestran en la Tabla 5-1 siendo la variable, el relleno lateral de la tubería.

Tabla 5-1: Propiedades de materiales de zanja usadas en estudio paramétrico

	Tipo de suelo	Compactación	Modulo del suelo	Densidad	Angulo de fricción	Angulo de dilatación	Cohesión
	USCS	Proctor	Es ⁽⁴⁾ (kPa)	ρ (t/m ³)	ϕ (°)	ψ ⁽⁵⁾ (°)	c (kPa)
Haul Road o Terreno Natural (TN) ¹	GW	-	150,000	2	42	42	0
Cama de tubería (B) ²	SW	95%	100,000	2.25	48	48	0
Relleno lateral (EM) ²	SM	80%	30,000	1.71	28	28	17
	SM	90%	60,000	1.92	32	32	24
Relleno (BF) ³	GW	95%	150,000	2	42	42	0

(1) Para el caso del cruce de *Haul Road* se considera TN como el pavimento. Ver sección 5.2.7; (2) Referencia (Diab, 1995); (3) Para cruces de *Haul Road*, el relleno BF debe tener los mismos materiales utilizados para la construcción del *Haul Road*. Ver sección 5.2.7; (4) referencia (Obrzud & Truty, 2018) y (Tannant & Regensburg, 2001); Se considera ángulo de dilatación igual al ángulo de fricción (Obrzud & Truty, 2018).

5.2.3. Diámetros de tuberías

Los diámetros seleccionados para el presente estudio son tuberías comerciales de 36", 42", 48" con espesor de pared STD (*Standard Weight*). En la Tabla 5-2 se resumen las dimensiones de cada tubería.

Tabla 5-2: Tamaños de tuberías usadas en estudio paramétrico ⁽¹⁾

Diámetro nominal (in)	Diámetro exterior		Espesor		Diámetro interior	
	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)
36	36	914	0.375	9.525	35.25	894.95
42	42	1067	0.375	9.525	41.25	1047.95
48	48	1219	0.375	9.525	47.25	1199.95

(1) Tamaños de tubería de acuerdo con norma (ASME B36.10, 2004)

5.2.4. Material de tuberías

Se considera único material de tubería; ASTM A53-B, ERW; cuyas propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Propiedades mecánicas de tubería usada en estudio paramétrico ⁽²⁾

Densidad	Elasticidad		Plasticidad
	Módulo de Young	Coefficiente de Poisson	Esfuerzo admisible
t/m ³	Mpa	-	Mpa
7.8	204,000	0.3	138

(2) Propiedades de acuerdo con norma (ASME B31.3, 2014).

5.2.5. Altura de cama de tubería

Se instalará la cama de tubería con un espesor fijo de 150 mm desde la base de la tubería hacia abajo, y a una altura variable de 1/6 de (OD) y 1/12 de (OD) desde la parte inferior de la tubería hacia arriba.

5.2.6. Ancho y altura de zanja

Para el estudio paramétrico se consideran los siguientes anchos de zanja y alturas de relleno sobre la tubería mostrados en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Propiedades mecánicas de tubería usada en estudio paramétrico

Diámetro de tubería O.D. (in)	Ancho de zanja		Altura de zanja	
	A (mm)	Ancho total (mm)	H (mm)	Altura total (mm)
36	300	1,514	1,000	2,214
42		1,667		2,367
48		1,819		2,519
36	400	1,714	2,000	3,214
42		1,867		3,367
48		2,019		3,519
36	500	1,914	3,000	4,214
42		2,067		4,367
48		2,219		4,519

5.2.7. Cargas superficiales

Los vehículos considerados en el presente estudio, mostrados en la Tabla-a (Mostrado en la introducción), son camiones mineros que acarrear el material minado hacia la zona de chancado primario. Las rutas de acarreo por la que circulan, llamado *Haul Road* Minero (ver Figura 5-4), normalmente son vías exclusivas construidas con materiales altamente resistentes conformado por varias capas de grava triturada, *pitrun gravel* y de arena y los espesores y propiedades de cada uno de ellos dependen de las cargas de las ruedas de los vehículos mineros aplicadas sobre las huellas impresas sobre el suelo (Ver ejemplo de sección de *Haul Road* en Figura 5-5). Mayor detalle del diseño de *Haul Roads* mineros en (Tannant & Regensburg, 2001); “*Guidelines for Mine Haul Road Design*”.

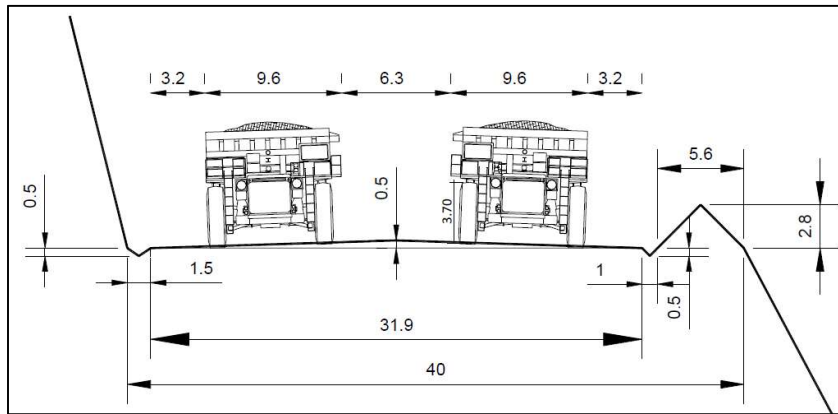


Figura 5-4: Ejemplo de perfil de diseño de vía de acarreo Haul Road (Camión Komatsu 980), (dimensiones en metros).

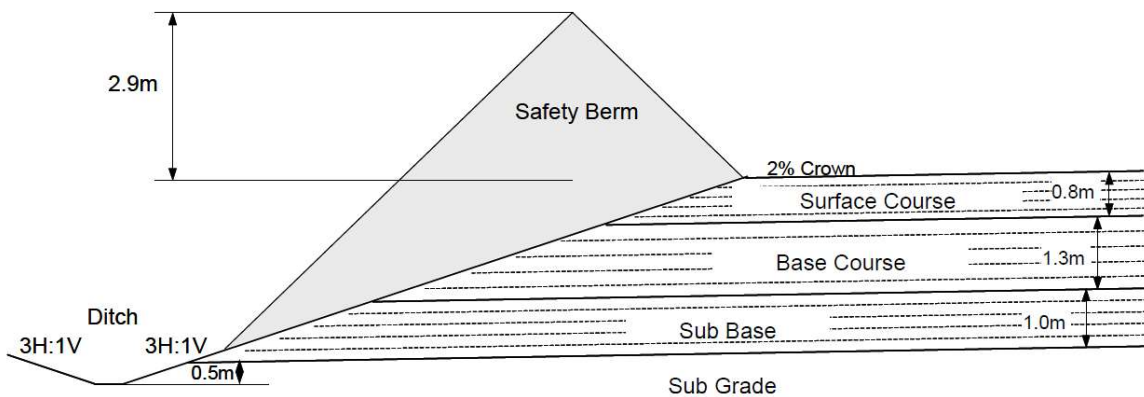


Figura 5-5: Sección típica de una sección de un Haul Road para camiones de 320 t. (Tannant & Regensburg, 2001).

Actualmente, los estándares internacionales y recomendaciones de cálculo y diseño de tuberías de acero enterradas, solo recomiendan los efectos de cargas vivas sobre la tubería, dependiendo de la altura, para vehículos tipo HS-20 (vehículo más pesado para diseño de puentes para autopistas), y cuya carga del vehículo no supera las 35 toneladas (AWWA M11, 2005) y (AASHTO, 2002), por lo que el presente estudio evalúa el comportamiento de un grupo de tuberías para observar los efectos de cargas de mayor magnitud.

Los materiales de construcción del pavimento del *Haul Road* son altamente resistentes y la determinación de la altura de las capas dependen de los camiones que circularán a través de este. El módulo de elasticidad en la capa superior (*Surface*) va alrededor de los 500 MPa, la segunda capa (*Base*) va en un rango de 150 a 350 MPa y la capa inferior a esta (*Sub Base*) va en el rango de 100 a 150 MPa, como se muestra en la Tabla 5-5. Para efectos de simplificación del análisis paramétrico se consideran todas las capas con un módulo de elasticidad de 150 MPa.

Tabla 5-5: Minimum bearing capacity and Young's modulus of haul road construction materials (Tannant & Regensburg, 2001)

	Thickness (m)	Bearing capacity (MPa)	Young's modulus (MPa)
Surface	0.3 to 0.6	0.7 to 0.9	Note 1
Base	1	0.3 to 0.65	150 to 350
Sub Base	1.5	0.1 to 0.2	100 to 150

Note 1: Consider 500 Mpa for design.

Por otro lado, la huella impresa de un neumático por lo general tiene una forma de elipse, y de acuerdo a investigaciones, como (Behroozinia, Khaleghian, Taheri, & Mirzaeifar, 2020; Rao & Dutta, 2006), dependen de la fuerza distribuida sobre los neumáticos, la presión interna de los neumáticos y de la velocidad de tránsito del vehículo; así mismo, demuestran que la huella impresa sobre la superficie tiene una forma ovalada y algunas bibliografías, a fin de simplificar el cálculo del área de contacto para diseño, consideran una circunferencia con un radio equivalente cuyo valor es la mitad del ancho real del neumático (Tannant & Regensburg, 2001).

Para simplificación del análisis, el desarrollo del presente estudio paramétrico considera que las huellas de los neumáticos son rectangulares cuyo ancho es igual al ancho de la rueda (A) y el largo (L) puede ser calculada con la siguiente expresión.

$$L = \frac{a_c}{A} \quad (\text{Ec. 5-1})$$

Donde;

L : Longitud de contacto; m.

a_c : Área equivalente de contacto ($a_c = \pi r_e^2$); m².

r_e : Radio equivalente ($r_e = \frac{A}{2}$); m.

A : Ancho de contacto, equivalente al ancho del neumático; m.

En la Figura 5-6 se muestra la representación de las huellas de los neumáticos de los vehículos en vista de planta. Para los vehículos a ser utilizados en el presente estudio, los ejes delanteros son simples y los traseros son dobles, y de acuerdo a las fichas técnicas de los fabricantes, la mayor carga se ejerce en el eje trasero por lo que la presión de contacto se considerará bajo el área de dos de las ruedas traseras.

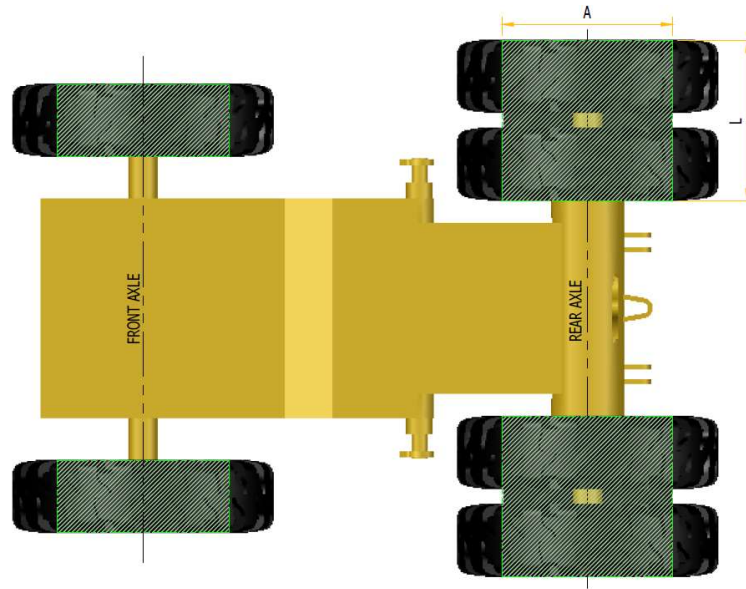


Figura 5-6: Esquema de impresión de huellas (asumida) sobre la superficie de un vehículo.

Como se describe en la sección 1.4.3 de la presente investigación, existen ecuaciones que estiman la cargas superficiales de secciones rectangulares que se aplican sobre la tubería enterrada y que están en función de la altura de enterramiento y que han sido validadas con modelos de elementos finitos por (Helwany, 2007) para la ecuación de *Boussinesq*, la misma que no depende de las propiedades del suelo, sino, solamente de la altura de enterramiento de la tubería, ver (Ec. 1-3).

Por otro lado, para el modelo de elementos finitos, a ser desarrollado en el presente estudio, se considera que la presión máxima ejercida sobre la tubería se da cuando las ruedas se encuentran sobre el eje axial de la tubería como se muestra en la Figura 5-3, y no se consideran los efectos de la presión de las ruedas opuestas del mismo eje, ni la presión del eje delantero.

En la Tabla 5-6 se muestran los pesos de vehículos de carga pesada considerados en la Tabla-a (Mostrado en la introducción).

Tabla 5-6: Pesos de vehículos de carga pesada utilizados en minería

Descripción del vehículo	Peso		% carga en eje		Dimensiones del neumático			Peso bruto (kg)
	Chasis (+ otros (kg)	Carga en tolva (Payload) (kg)	Delantero simple (%)	Trasero doble (%)	Tipo	Peso (kg)	Ancho m	
	CATERPILLAR modelo 793 F	120,000	235,000	33	66.7	40.00R57	3,850	
CATERPILLAR modelo 797 F	220,000	360,000	33	66.7	59/80R63	5,371	1.458	612,223
KOMATSU modelo 930 E	174,815	297,000	33	66.7	53/80R63	4,536	1.311	499,031
KOMATSU modelo 980 E	214,137	360,000	33	66.7	59/80R63	5,371	1.458	606,360

Las presiones aplicadas sobre la huella impresa en la superficie de estos vehículos se determinan en la Tabla 5-7.

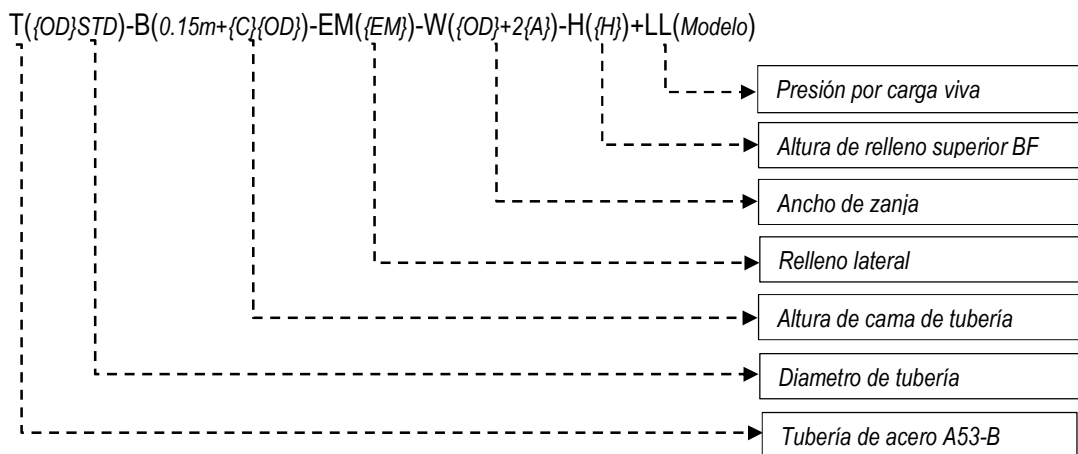
Tabla 5-7: Presiones superficiales de vehículos de carga pesada utilizados en minería

Descripción del vehículo	del	Área de contacto por rueda				Carga		Presión			
		r _e	a _c	A	L	Eje trasero	Ruedas laterales	Área de ruedas laterales	Eje trasero / ruedas laterales	Factor de impacto	Ruedas laterales de eje trasero
		(m)	(m ²)	(m)	(m)	(kg)	(kg)	(m ²)	(kPa)	-	(kPa)
CATERPILLAR modelo 793 F		0.5535	0.96	1.107	0.9	252,193	126,097	1.9926	621	2	1,242
CATERPILLAR modelo 797 F		0.729	1.67	1.458	1.1	408,353	204,176	3.2076	624	2	1,248
KOMATSU modelo 930 E		0.6555	1.35	1.311	1	332,854	166,427	2.622	623	2	1,246
KOMATSU modelo 980 E		0.729	1.67	1.458	1.1	404,442	202,221	3.2076	618	2	1,236

Como se aprecia en la Tabla 5-7, las presiones de vehículos con diferentes pesos brutos aplican similares presiones sobre la huella impresa de los neumáticos puesto que estos últimos tienen diferentes dimensiones para cada modelo. Por ello, para el presente análisis paramétrico se utilizará solamente el mayor valor de presión el cual aplica para el camión CATERPILLAR modelo 797 F cuya presión es de 1,250 kPa aproximando, considerando un factor de impacto conservador por irregularidades en la vía de 2.0.

5.3. Estudio paramétrico

Los parámetros han sido identificados y sus propiedades y/o dimensiones han sido definidos en la sección 5.1. En la Figura 5-7 se muestra un resumen del flujo de datos para el estudio paramétrico del comportamiento de una tubería de acero instalada bajo accesos de vehículos mineros por el método de los elementos finitos. La nomenclatura utilizada para el estudio paramétrico será como se muestra a continuación:



Ejemplo: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM(1)-W(42"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

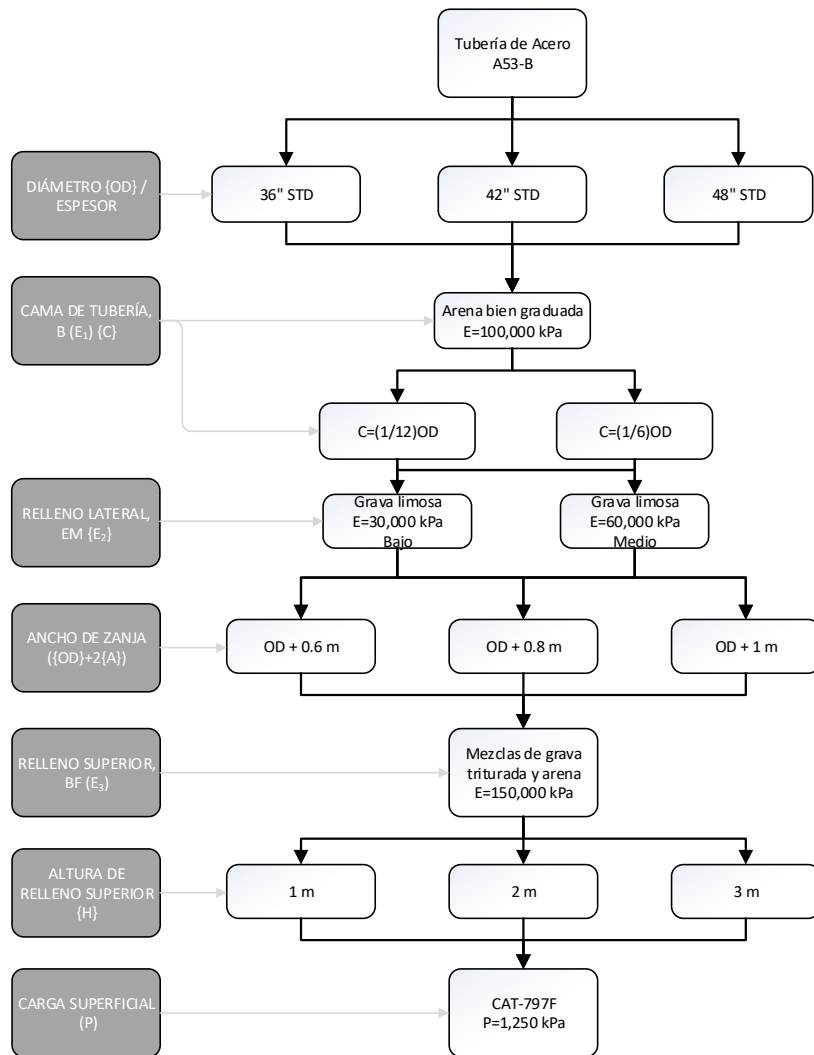


Figura 5-7: Flujo de datos para cálculo paramétrico por el Método de Elementos Finitos.

5.4. Resultados del estudio paramétrico

Es importante precisar que los resultados de elementos finitos obtenidos del estudio paramétrico han sido post-procesados en el software de elementos finitos Abaqus/Standard y exportados a software MS Excel para su posterior análisis por medio de tablas y gráficas.

El análisis paramétrico desarrollado ha permitido determinar cuáles son los parámetros que afectan en menor o mayor medida los resultados de deflexión y esfuerzos en la tubería, los mismos que se describen a continuación. Los detalles de los resultados del análisis se muestran en el Apéndice A.

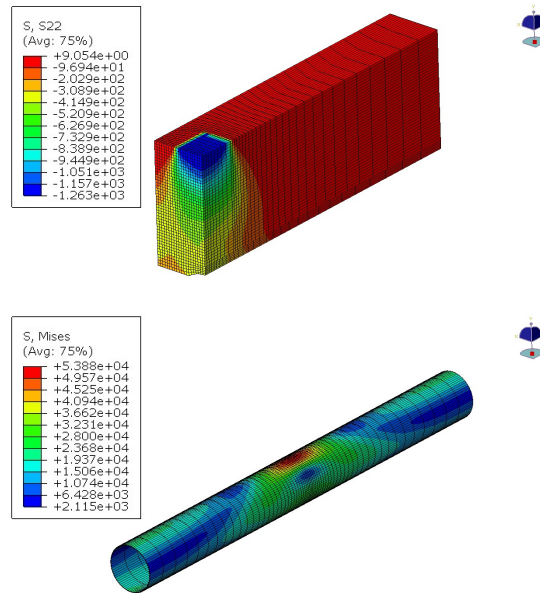


Figura 5-8: Ejemplo de sección longitudinal de modelo paramétrico desarrollado: Resultados de esfuerzos del suelo y de la tubería, para instalación de tubería de 48" para ancho de 48"+0.8m, para relleno lateral tipo EM1, altura de cama 1/12 de 48" enterrado una altura de 2 m bajo carga de presión de neumático de un camión CAT-797F.

5.4.1. Análisis de resultados – Análisis paramétrico

Los caminos de camiones mineros (*Haul Road*) son diseñados para soportar grandes presiones como son los producidos por las ruedas de los vehículos mineros de acarreo de alto tonelaje de carga y cuyas capas de suelo compactado trabajan por lo general en su estado elástico ya que son diseñados para alcanzar deformaciones de diseño de alrededor de los 2,000 micras (Tannant & Regensburg, 2001). Por esta razón es importante que el relleno de la tubería tenga el mismo tratamiento que el diseño del "*Haul Road*" y debido a ello, la única carga que soporta la tubería será la transmitida por la presión superficial aplicada por los neumáticos del camión y no se considera la falla del suelo con grandes desplazamientos verticales como podría suceder con rellenos de suelos nativos removidos y compactados el cual es el material que usualmente se utiliza en la construcción de zanjas.

Presión superficial:

Es importante notar que la presión aplicada sobre la superficie va disipándose con respecto a la profundidad, por lo que la presión que asumirá la tubería dependerá de la altura del relleno superior de la zanja. Como se observa en la Figura 5-9, la presión de 1,250 kPa, aplicada en la superficie, va disminuyendo a medida que la medición es más profunda, por lo que las tuberías instaladas a 1 m de profundidad recibirán mucha mayor carga que las instaladas a 3 m de profundidad, por ello será importante evaluar la tubería y verificar si la deflexión y esfuerzos aplicados sobre ella están dentro de los límites aceptables.

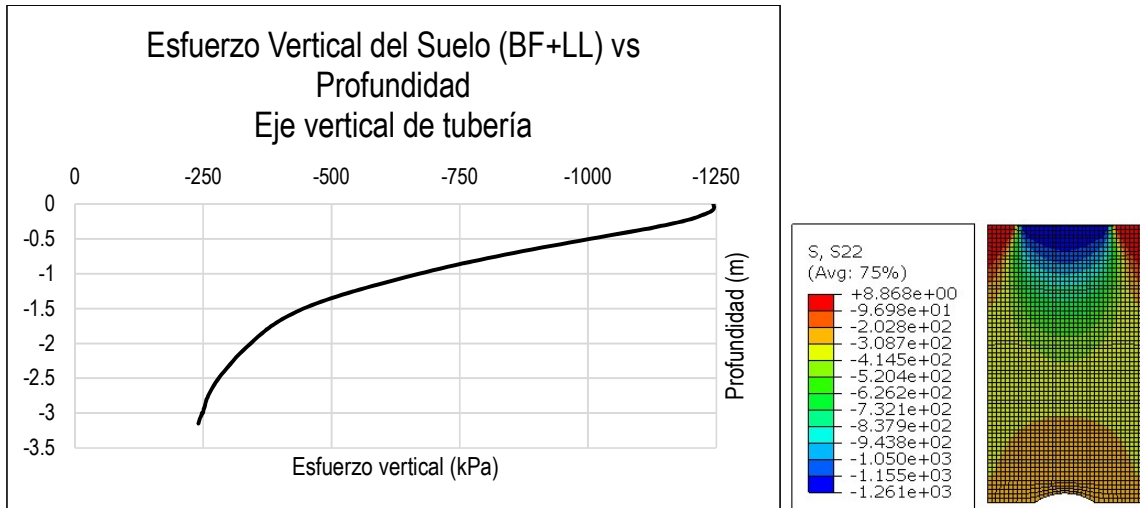


Figura 5-9: Curva de esfuerzos verticales aplicadas por un camión CAT-797F y el peso del relleno superior, respecto de la profundidad.

Por ejemplo; para una tubería de 48" con espesor de pared *Standard Weight* (0.375") y con un esfuerzo admisible de 138 MPa instalada a 1 m de profundidad, la presión producida por un camión CAT 797F con un peso de 600 toneladas genera esfuerzos máximos bajo el criterio de falla de Von Mises de la tubería de alrededor de los 92 MPa en la cresta de la tubería, sin embargo, si consideramos un factor de seguridad de diseño de 2 tendríamos un esfuerzo límite de diseño de 69 MPa por lo que para esta condición de instalación no es recomendable. (ver Figura 5-10).

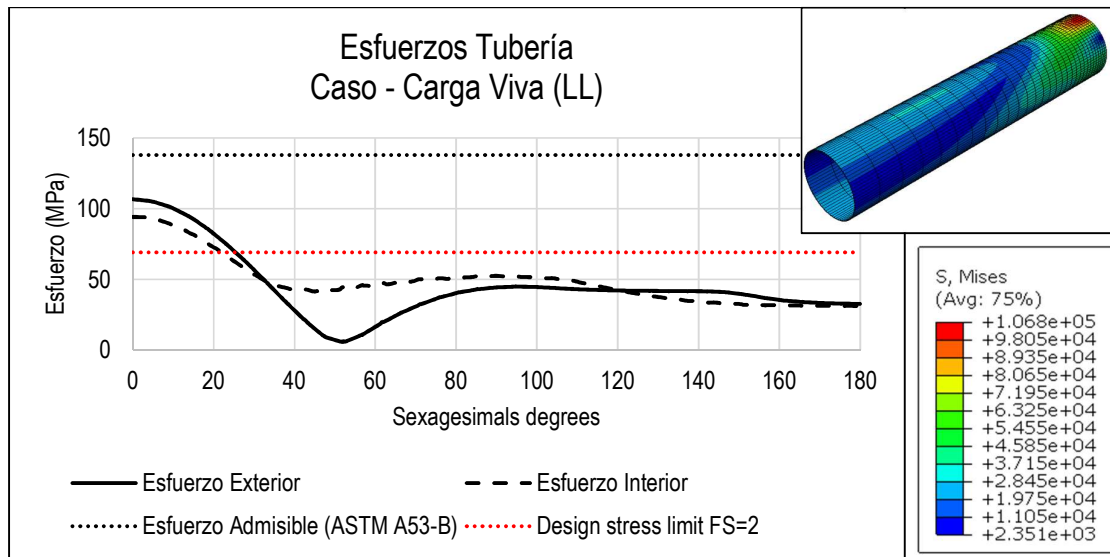


Figura 5-10: Esfuerzos de una tubería de 48" STD A53-B, enterrada a 1 m con un ancho de zanja de 48"+0.8 m, módulo de elasticidad de 30,000 kPa y una altura de cama de 1/12 de 48".

Ancho de zanja y altura de cama de tubería:

Por otro lado, es importante precisar que existen otros parámetros que pueden incrementar los esfuerzos en la tubería y estos son el ancho de la zanja y la altura de cama de la tubería sobre la base de la tubería como se muestra en la Figura 5-3.

En el caso de las variaciones del ancho de la zanja, por ejemplo de una tubería de 36", como se muestra en la Figura 5-11, se muestran los diagramas de los desplazamientos circunferenciales de la tubería (con un factor de amplificación de 5 para poder visualizar mejor los cambios geométricos producidos) y el de los esfuerzos, y se observa que, para el caso de modificación del parámetro del ancho de la zanja, la deflexión incrementa a medida que su ancho es mayor y por ende los esfuerzos también se incrementan acercándose más al esfuerzo admisible de la tubería, por lo que, es recomendable considerar zanjas con ancho mínimo posible, lo cual beneficia a los costos, sin embargo, se debe considerar que es necesario compactar las capas del relleno lateral de la tubería por lo que un ancho adecuado mínimo desde la pared lateral de la tubería y la pared lateral de la zanja debería ser de 300 mm para la instalación de un equipo de compactación.

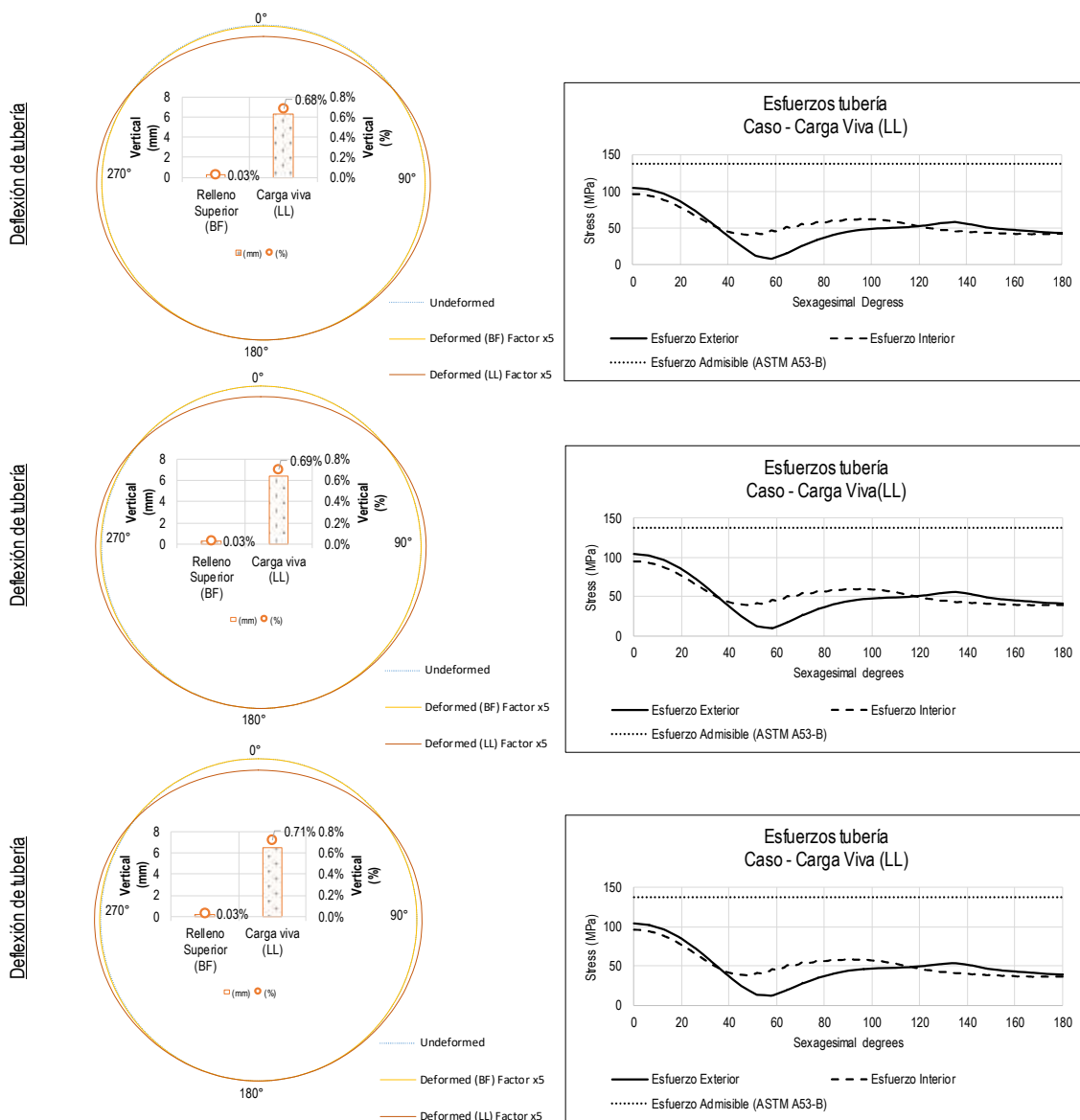


Figura 5-11: Deflexiones y esfuerzos de tubería de 36" STD A53-B enterrada a 1 m bajo carga de camión CAT 979 F con material de EM1 y para (a) Ancho de zanja de 36"+0.6m (b) Ancho de zanja de 36"+0.8m (c) Ancho de zanja de 36"+1m

Por otro lado, para analizar los efectos de la altura de cama sobre la base de la tubería, se utilizaron alturas de cama de 1/12 de OD y 1/6 de OD y los resultados muestran que, el tener una altura de cama mayor beneficia la deflexión de la tubería. Como se muestra en la Figura 5-12, una tubería de 42" STD A53-B instalada a 1 m de profundidad y con un ancho de zanja de 42"+1m varía en un 6.75% en la deflexión de la tubería siendo el más favorable una altura de cama mayor (1/6 de OD), sin embargo, la variación no es muy relevante por lo que para estos casos no sería necesario contar con una altura de cama de tubería más alta.

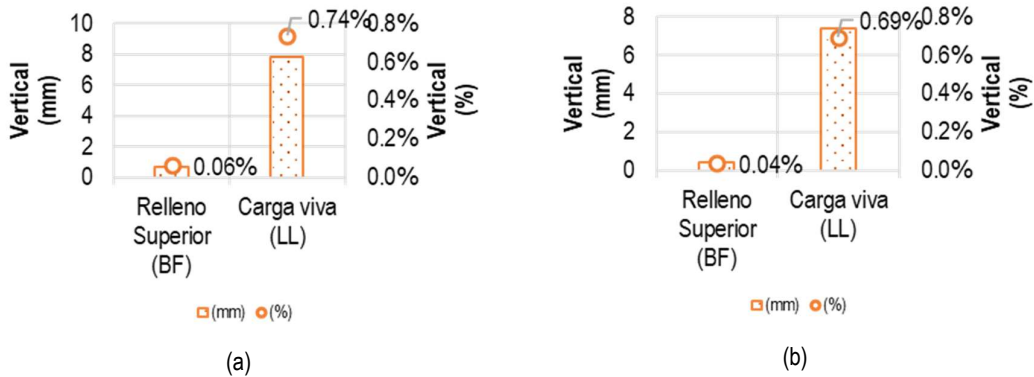


Figura 5-12: Deflexiones de tubería de 42" STD A53-B enterrada a 1 m bajo carga de camión CAT 979 F para ancho de zanja de 42"+1m con (a) Altura de cama de 1/12 de 42" y (b) Altura de cama de 1/6 de 42".

Es importante indicar que la altura de cama de la tubería es relevante durante la instalación de la tubería siempre y cuando esta sea instalada con soportes de madera internos (*struts*) que eviten que la tubería se defleccione debido a su propio peso y es más significativo para tuberías con relación de diámetro / espesor más alto.

Tipo de relleno lateral:

Otro de los parámetros analizados es el material del relleno lateral de la tubería. Estos materiales suelen ser material selecto de arena o grava fina y con un módulo de elasticidad de suelo alto, sin embargo, en ocasiones, para abaratar costos, estos materiales pueden ser reemplazados por suelos removidos tratados o mejorados consiguiendo que el suelo tenga un módulo similar a los de la arena o grava fina como se explica en (SHARMA, 2013). El estudio analiza suelos con módulos de elasticidad de 30,000 kPa y 60,000 kPa con el mismo grado de compactación y los resultados muestran que mientras el módulo de elasticidad del suelo es mayor, la deflexión en la tubería es menor. Por ejemplo, en la Figura 5-13, analizando la tubería de 42" STD A53-B enterrada a 1 m y sometida a una carga superficial de un vehículo CAT 797F con una zanja de 42"+0.6m de ancho, la deflexión varía en un 15.6%, siendo el material con módulo de elasticidad de 60,000 kPa el más favorable, sin embargo, los costos de estos materiales son más elevados por lo que es necesario evaluar la elección del material de tal manera que la tubería se encuentre dentro de las deflexiones y esfuerzos admisibles.

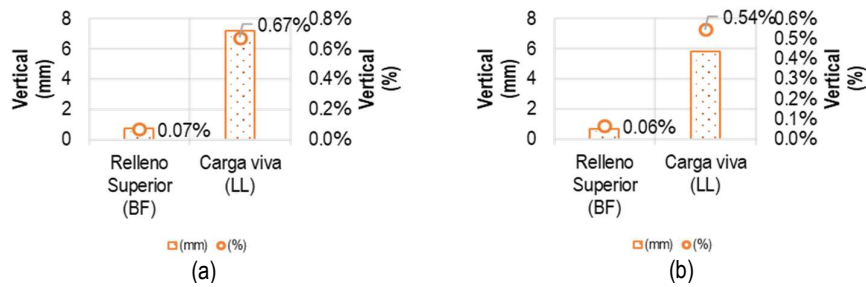


Figura 5-13: Deflexiones de tubería de 42" STD A53-B enterrada a 1 m bajo carga de camión CAT 979 F para ancho de zanja de 42"+0.6m con (a) Modulo de elasticidad suelo lateral $E_1=30,000$ kPa y (b) Modulo de elasticidad suelo lateral $E_2=60,000$ kPa.

Altura de relleno superior:

Finalmente, del análisis del comportamiento de la tubería respecto a la profundidad se observa, en el ejemplo de la Figura 5-14, que el mayor esfuerzo producido por la carga superficial, para una configuración de zanja establecida en el ejemplo, es mayor en la zona superior de la tubería (0°) cuando esta se encuentra a baja profundidad (figura a) mientras que a mayor profundidad el esfuerzo disminuye considerablemente (figuras b y c). Lo contrario se observa en la zona lateral de la tubería (90°) donde el esfuerzo es igual o superior al esfuerzo vertical a mayores profundidades (figura c) por lo que se debe tener mayor cuidado con el uso de las ecuaciones analíticas que asocian los esfuerzos a las deflexiones laterales cuando se aplican altas cargas superficiales sobre tuberías instaladas a bajas profundidades. Entonces, una condición de instalación que se puede considerar como aceptable en el ejemplo sería para profundidades por encima de los 2 m, sin embargo, cada condición de instalación debe ser evaluado puntualmente y definir en cuál de estas produce esfuerzos que puedan llegar a superar los admisibles para el material seleccionado.

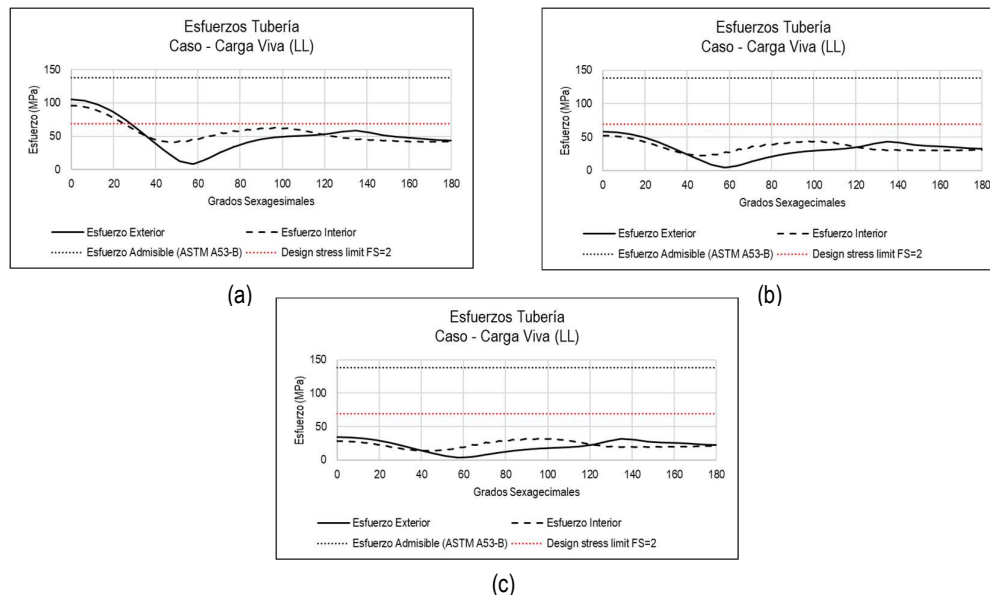


Figura 5-14: Esfuerzos de tubería de 36" STD A53-B bajo carga de camión CAT 979 F para ancho de zanja de 36"+0.6m; Instalado: (a) A una altura de 1 m; (b) A una altura de 2 m; (c) A una altura de 3 m.

5.4.2. Tendencias – Análisis paramétrico

Un resumen de los resultados de deflexiones y esfuerzos sobre la cresta de la tubería, producidas por la variación de las variables analizadas en los 108 modelos de la presente investigación, resultantes de la combinación de parámetros en base a lo indicado en la Figura 5-7, se muestran en el Apéndice B.

De este resumen de resultados se observó que los cambios de algunas de las variables analizadas muestran mayor influencia en los esfuerzos que otras, por lo que, a fin de mostrar las tendencias debido a estos cambios, se agruparon 7 casos particulares en base a la variación de variables, mostradas en la Tabla 5-8, Tabla 5-9 y Tabla 5-10.

Tabla 5-8: Tendencia del incremento de los esfuerzos para una tubería de 36"

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	
OD	Tubería 36" STD A53 Gr.B							Detalles de la tubería
H	3 m	2 m	1 m					Altura de relleno sobre tubería
E	60,000 kPa			30,000 kPa				Módulo de elasticidad relleno lateral
c	1/6 de 36"			1/12 de 36"				Altura de cama sobre base de tubería
A	0.6 m + 36"				0.8 m + 36"		1 m + 36"	Ancho de zanja
Esfuerzo (en 0°) (MPa)	27.58	48.98	92.00	105.67	107.58	106.08	106.10	

Tabla 5-9: Tendencia del incremento de los esfuerzos para una tubería de 42"

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	
OD	Tubería 42" STD A53 Gr.B							Detalles de la tubería
H	3 m	2 m	1 m					Altura de relleno sobre tubería
E	60,000 kPa			30,000 kPa				Módulo de elasticidad relleno lateral
c	1/6 de 42"			1/12 de 42"				Altura de cama sobre base de tubería
A	0.6 m + 42"				0.8 m + 42"		1 m + 42"	Ancho de zanja
Esfuerzo (en 0°) (MPa)	26.687	47.4928	91.5084	103.952	105.613	107.834	108.389	

Tabla 5-10: Tendencia del incremento de los esfuerzos para una tubería de 48"

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	
OD	Tubería 48" STD A53 Gr.B							Detalles de la tubería
H	3 m	2 m	1 m					Altura de relleno sobre tubería
E	60,000 kPa			30,000 kPa				Módulo de elasticidad relleno lateral
c	1/6 de 48"			1/12 de 48"				Altura de cama sobre base de tubería
A	0.6 m + 48"				0.8 m + 48"		1 m + 48"	Ancho de zanja
Esfuerzo (en 0°) (MPa)	26.0539	46.3555	91.6342	103.501	105.076	106.752	109.767	

El caso base se define en la condición de menores esfuerzos producidos sobre la tubería, la cual se observa que es para una altura de relleno superior más alto ($H=3\text{m}$), con un relleno lateral con mayor módulo de elasticidad ($E=60,000\text{ kPa}$), una altura de cama más alta ($1/6\text{ de OD}$), y un menor ancho de zanja.

Se observa que mientras en valor de la variable (H) es menor, los resultados se incrementan; para el caso del estudio, al disminuir a 2 metros altura los esfuerzos incrementan alrededor de 19%, mientras que al reducir a 1 metro de altura los esfuerzos aumentan en alrededor del 40%. Siendo esta variable la de mayor influencia en los resultados.

Por otro lado, al reducir el módulo de elasticidad (E) del relleno lateral a $30,000\text{ kPa}$, los esfuerzos se incrementan alrededor del 11%. Siendo esta la segunda variable que afecta los resultados con mayor influencia.

Así mismo, al disminuir la altura de cama de la tubería (c) a $1/12\text{ de OD}$, los esfuerzos solo incrementan alrededor de 1.5%, por lo que esta variable no afecta considerablemente en los resultados.

Al analizar el incremento del ancho de la zanja (A), se observa que las tendencias para los tres (03) diámetros de tuberías son variables. Para la tubería de 36" la variación es casi nula, teniendo un caso en el que el valor de los esfuerzos disminuye mínimamente, lo cual contradice las tendencias de las otras dos (02) tuberías, una hipótesis podría indicar que, como la longitud de la huella de la tubería es de 1.1 m y el diámetro exterior de la tubería es de 0.914 m habrá un 16.9% de la huella del neumático que aplica carga directamente sobre la zona del relleno lateral, entonces los esfuerzos en la tubería mejorarán a medida que el ancho de la zanja incrementa, por lo que para efectos de la presente investigación, este caso en particular estaría fuera de las tendencias analizadas. Por otro lado, las otras dos (02) tuberías de mayor diámetro muestran un incremento del 2.5 % y de un adicional de 4.3% en los esfuerzos para las tuberías de 42" y 48" respectivamente al incrementar el ancho de la zanja a $1\text{ m} + \text{OD}$.

Las Figura 5-15, Figura 5-16 y Figura 5-17 muestran en resumen de lo indicado en los párrafos anteriores.

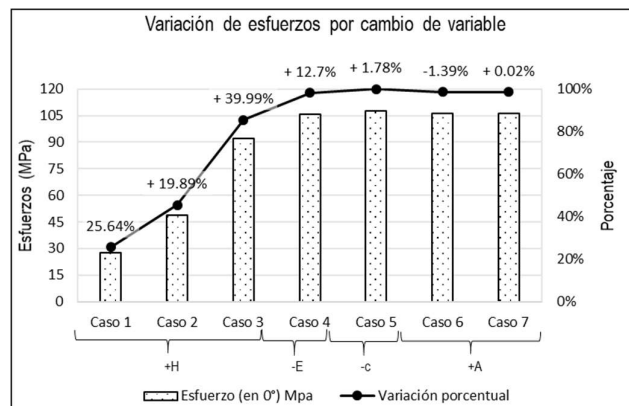


Figura 5-15: Incremento de los esfuerzos por cambio de variables – Tubería de 36" STD A53 Gr.B

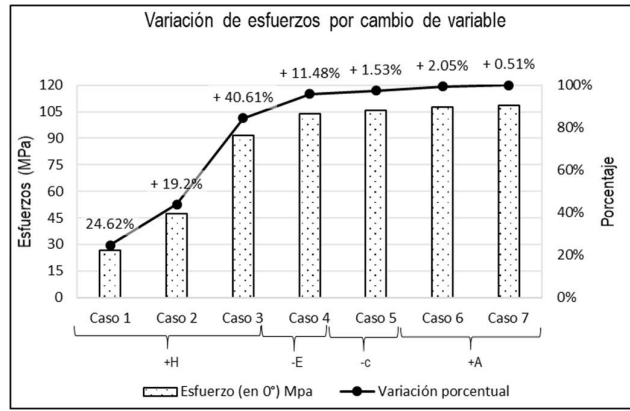


Figura 5-16: Incremento de los esfuerzos por cambio de variables – Tubería de 42" STD A53 Gr.B

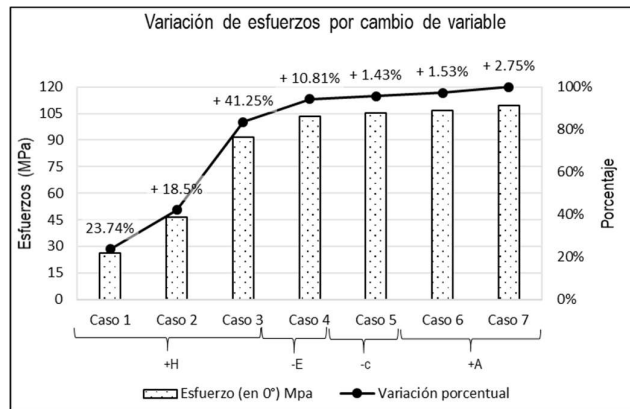


Figura 5-17: Incremento de los esfuerzos por cambio de variables – Tubería de 48" STD A53 Gr.B

CAPÍTULO 6

Conclusiones

El diseño de tuberías enterradas en zanjas es un campo muy usual puesto que para distintas aplicaciones donde es necesario transportar fluidos por tuberías, ya sea que estos tengan cortas o largas distancias, se requiere conocer el comportamiento de la tubería debido a las condiciones de instalación. Como se resume en el Capítulo 1, existen ecuaciones analíticas que aproximan las deflexiones horizontales y verticales, así como los esfuerzos circunferenciales sobre la tubería, las cuales están basadas en las teorías de *Marston* y *Spangler*, las mismas que, luego de estudios realizados por distintos autores, consiguen tener resultados más aceptables para instalaciones comunes pero siempre considerando el comportamiento lineal del suelo. Por otro lado, las tuberías enterradas que se encuentran instaladas bajo accesos vehiculares requieren considerar la carga vertical aplicada, la misma que según las teorías de *Boussinesq* y *Timoshenko* se disipan mientras más profunda es la medición, sin embargo estas consideran que el relleno superior (BF) es uniforme y con módulo de elasticidad constante, lo cual, para instalaciones convencionales puede llegar a ser cierto, sin embargo, como se menciona en la sección 5.2.7, el diseño de los caminos mineros (*Haul Road*) considera distintas capas de material con distintos módulos de elasticidad y que de acuerdo a la profundidad instalada esta va disminuyendo, por lo que las ecuaciones analíticas pueden llegar a no ser efectivas ni recomendadas.

Los materiales de tuberías utilizadas para el transporte de fluidos, específicamente para líquidos como el agua, son listados con propiedades definidas y están normalizadas, y su selección depende, dentro de los más importantes, de la presión, temperatura de operación y tipo de fluido. Para el transporte de agua para tuberías de mayor diámetro a 24", se consideran materiales como el ASTM A106-B sin costura, o el ASTM A53-B con costura soldada con resistencia (ERW), siendo este último más comercial y los espesores de pared están normalizados como *Standard Weight* (STD) o *Extra Strong* (XS) con espesores comerciales de 0.375" y 0.5" respectivamente. Es conocido que la tubería debe diseñarse para no superar su presión admisible, valores que también se encuentran normalizados para cada material. En diseño, las tuberías se seleccionan para soportar las condiciones de presión y se preseleccionan los espesores en primera instancia en función de las presiones internas de operación y presiones ocasionales como las producidas por efectos de golpe de ariete, sin embargo, para tuberías sometidas a cargas externas estas suelen ser verificadas puntualmente por lo que los espesores preseleccionados deben ser confirmados. Por otro lado, si bien es cierto, se tienen suelos de relleno recomendados de acuerdo a estándares internacionales o estándares de diseño internos de cada compañía, los suelos utilizados por lo general son materiales selectos para el relleno lateral y material removido de la zanja para el relleno superior, en cualquier caso, se tienen recomendaciones de compactación según estándar *Proctor* de 85% al 95%. Para conocer las propiedades de los suelos es necesario realizar estudios de suelos de distintas muestras

extraídas de calicatas ubicadas en zonas estratégicas del alineamiento de la tubería (pipeline), estas propiedades se conocen luego de realizar por lo general pruebas triaxiales y uniaxiales consiguiendo las variables constitutivas del modelo de *Mohr Coulomb* como son el ángulo de fricción y la cohesión. Con estos datos, el ingeniero de campo sugiere los materiales que pueden ser utilizados como relleno. La presente investigación considera el uso del modelo constitutivo de *Mohr Coulomb* debido a que sus parámetros son comúnmente el resultado de estudios de suelo convencionales.

El método de elementos finitos permite analizar los suelos en su rango elastoplástico por medio del análisis de falla de *Mohr Coulomb* que aproxima el suelo como plasticidad perfecta y con endurecimiento, adicionalmente considera la no linealidad del contacto y la no linealidad geométrica por lo que permite aproximar mejor los resultados.

La presente investigación desarrolló un procedimiento de cálculo de tuberías enterradas por el método de los elementos finitos el cual considera adicionalmente la presión lateral residual por efectos de la compactación de las capas del relleno durante la etapa constructiva. El modelo aproxima adecuadamente los resultados experimentales tomados de la investigación desarrollada en la tesis doctoral de (SHARMA, 2013) donde se instrumenta una tubería para conseguir las deflexiones y deformaciones en distintas posiciones circunferenciales de la tubería. Se desarrolló un análisis de sensibilidad a fin de evaluar las variables de longitud de modelo, contacto, tamaño de malla y carga lateral residual, encontrando que la variable de longitud del modelo no afectaba los resultados a medida que se consideraba longitudes mayores, pero esto si incrementaba el costo computacional, por otro lado, el tamaño de malla si afecta los resultados por lo que se consideró un tamaño de malla promedio de 50 mm ya que para mallas densas la variación de los resultados eran mínimos; para el contacto se estimó un valor de fricción de 0.3 y para la carga lateral se encontró que para aproximar los valores de deflexión de la tubería la carga se encontraba entre $0.2C_u$ a $0.4C_u$, donde C_u es la cohesión no drenada del material, valor a ser obtenido con los estudios de suelos. El modelo experimental no consideró la aplicación de cargas superficiales, sin embargo, no invalida el procedimiento por lo que este fue utilizado para el estudio paramétrico donde si se aplica carga superficial externa.

Las tuberías enterradas, suelen tener recomendaciones de instalación convencionales y para cargas superficiales consideran pesos de vehículos con cargas brutas de hasta 35 toneladas (AWWA M11, 2005), sin embargo, para casos especiales, como cuando la tubería requiere cruzar por caminos de vehículos de carga pesada, como los caminos mineros (*haul road*), se requiere realizar la verificación de cómo las tuberías son afectadas debido a las cargas de estos vehículos con pesos brutos de hasta 600 toneladas. Como se explica en el Capítulo 5, los caminos mineros son diseñados para soportar altas cargas superficiales por lo que el camino tiene capas de suelo con propiedades de alta elasticidad y con baja probabilidad de falla por lo que el relleno de las tuberías debería considerar el mismo tratamiento. Las

cargas verticales aplicadas sobre la tubería, adicionales a las producidas por el peso propio del relleno, dependen de la presión superficial y de la profundidad a la que se encuentra. Las presiones de la huella de los neumáticos sobre el suelo considerados en el presente estudio están alrededor de los 1,250 kPa producido por un camión modelo CAT-797F.

Se desarrolló un análisis paramétrico por el método de los elementos finitos el cual considera la rigidez de las paredes laterales del suelo a diferencia del estudio y validación de los datos experimentales. Adicionalmente se considera la aplicación de la presión de la huella del neumático como si fuera rectangular en lugar de la considerada como circunferencial o elíptica que se aproxima a la forma real de contacto. Las variables consideradas fueron el ancho y altura de la zanja, la altura de cama de tubería sobre la base de la tubería y dos tipos de relleno lateral; estas variables fueron definidas de acuerdo a los análisis de variables realizados en las ecuaciones analíticas presentadas en el Capítulo 1.

Los resultados muestran en el Capítulo 5 que las variables que afectan en mayor grado a la deflexión y esfuerzos de la tubería son, la altura a la que se encuentra instalada la tubería y el módulo de elasticidad del relleno lateral de la zanja; lo primero puede ser evidente a primera vista ya que la carga superficial se disipa a mayor profundidad según las teorías de *Boussinesq* y *Timoshenko* pero lo segundo no estaba previsto; para los casos de análisis de la presente investigación se encontró que la variación de los esfuerzos por cambio de la altura de 3m a 1m, del relleno superior (BF), incrementa en un 60%, así mismo, cambiar el material del relleno lateral de zanja de un material con un módulo de elasticidad de 60,000 kPa a otro con 30,000 kPa, los esfuerzos incrementan en alrededor del 11%. Por otro lado, al analizar los cambios de la variable del ancho de la zanja, la presente investigación muestra que mientras mayor es su ancho los esfuerzos tienden a incrementar, lo cual no fue previsto, sin embargo, la tendencia es variable y depende del diámetro de la tubería y de la longitud de la huella impresa del neumático, así mismo, sus efectos sobre la tubería dependen de la presión residual lateral y mientras mayor sea el ancho de la capa de relleno lateral, se reducirá la presión lateral, haciendo que exista menor sostenimiento del suelo sobre la parte lateral de la tubería durante la instalación del relleno superior y aplicación de la carga superficial. Adicionalmente, la variable de altura de cama, para las condiciones de aplicación de cargas superficiales de camiones mineros, no afecta considerablemente en los esfuerzos, sin embargo, esta variable es importante durante el proceso constructivo ya que mientras sea mayor el ángulo de cama de tubería (mayor altura de cama por encima de la parte inferior de tubería) esta deflectará menos por su propio peso. Por otro lado, las variables que incrementarían los costos son las de altura de instalación y los materiales del relleno, se requiere mayor altura para disminuir la deflexión vertical y por ende mayores costos de excavación y se requiere materiales con mayor grado de elasticidad, pero esto también incrementa los costos de materiales de instalación. Por lo contrario, la variable que aporta a tener menores deflexiones en la tubería es el ancho de la zanja, lo que disminuiría los costos de instalación, sin embargo, es necesario considerar espacios para aplicación de equipos de compactación que se sugiere sea por lo

menos de 0.3 m. Finalmente, del análisis se verifica que los esfuerzos aumentan a medida que el diámetro es mayor, considerando que se mantiene el mismo espesor de tubería la rigidez disminuye permitiendo así mayores deformaciones en la tubería, sin embargo, los incrementos en los esfuerzos no son considerables y dependen de otras variables como por ejemplo, el área de la huella del neumático, cuyo cambio no fue parte del presente trabajo.

Recomendaciones para futuras investigaciones

El presente trabajo de investigación considera la utilización de datos experimentales desarrollado por terceros por lo que, a pesar de que son aceptables, sería importante el desarrollo experimental desarrollado localmente para su validación, sin embargo, el estudio experimental debería desarrollarse en condiciones de zanjas con paredes laterales de suelo natural a escala real.

El estudio considera solamente la aplicación de propiedades de materiales de relleno utilizados en otras investigaciones. Como se indicó en la sección anterior, la variable del grado de elasticidad del relleno es importante para reducir las deflexiones de la tubería y para condiciones de instalación estándar de poca longitud se pueden utilizar los suelos selectos recomendados, sin embargo, para tuberías con largas distancias de instalación enterradas se recomienda el estudio de mejoramiento de suelos nativos para ser utilizados como relleno lateral y sus efectos en los costos de instalación.

El estudio paramétrico fue desarrollado con software de elementos finitos, pero con procesamiento de datos con el uso del software MS Excel, lo cual tomó tiempo considerable para su procesamiento a fin de obtener reportes visibles y entendibles de los análisis de elementos finitos. Se recomienda realizar el desarrollo de un programa de procesamiento de datos para obtención de reportes de distintos análisis de elementos finitos, utilizando como sugerencia *Python*. Estos pueden servir como herramientas de diseño que podrían ser utilizadas en la práctica de la ingeniería de pipelines.

El análisis paramétrico fue limitado por los costos computacionales con mallas relativamente densas respecto a los tamaños de la instalación, sin embargo, estos podrían ser optimizados, sobre todo para análisis puntuales como validación de datos experimentales de una instalación a escala real.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2002). *Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition*.
- Abaqus. (2013). *Abaqus 6.11 Theory manual*. 11.
- ABRAHAM, B. M. (1993). *A STUDY OF THE STRENGTH AND COMPRESSIBILITY CHARACTERISTICS OF COCHIN MARINE CLAY*. COCHIN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY.
- ASME B31.3. (2014). Process Piping. *Chemical Engineer*, 76(8), 95–108.
- ASME B31.4. (2019). Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries. *The American Society of Mechanical Engineers, 2016*, 1–138.
- ASME B36.10. (2004). *Welded and Seamless Wrought Steel Pipe. 2004*.
- AWWA M11. (2005). *Steel Pipe : A Guide for Design and Installation*.
- AWWA M41. (2009). *Ductile-Iron Pipe and Fittings*.
- AWWA M45. (1999). *Fiberglass Pipe Design Manual*. Retrieved from <http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2018/04/AWWA-M45-Fiberglass-Pipe-Design-Manual-1996.pdf>
- AWWA M55. (2006). *PE pipe : design and installation*. (1st ed.).
- Bathe, K. J. (1996). Finite Element Procedures. In *Englewood Cliffs New Jersey*. Retrieved from <http://www.amazon.com/Finite-Element-Procedures-Part-1-2/dp/0133014584>
- Behroozinia, P., Khaleghian, S., Taheri, S., & Mirzaeifar, R. (2020). An investigation towards intelligent tyres using finite element analysis. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(3), 311–321. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1475664>
- Boussinesq, J. (1885). *Application Des Potentiels À L'étude de L'équilibre Et Du Mouvement Des Solides Élastiques*. Paris: Gauthier-Villars, Imprimeur-libraire.
- Clayton, C. R. I., & Symons, I. F. (1992). The pressure of compacted fill on retaining walls. *Geotechnique*, 42(1), 127–130. <https://doi.org/10.1680/geot.1992.42.1.127>
- Dezfooli, M. S., Abolmaali, A., Park, Y., Razavi, M., & Bellaver, F. (2015). Staged Construction Modeling of Steel Pipes Buried in Controlled Low-Strength Material Using 3D Nonlinear Finite-Element Analysis. *International Journal of Geomechanics*, 15(6), 04014088. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000436](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000436)
- Diab, Y. G. (1995). Mechanical method to evaluate safety factors in buried pipes. *Journal of Transportation Engineering*, 121(1), 94–101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1995\)121:1\(94\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1995)121:1(94))
- DWA ATV127. (2000). *Standard ATV-DVWK-A 127E*.

- Fascicule 70-1. (2019). *Fourniture, pose et réhabilitation de canalisations d'eaux à écoulement à surface libre*.
- Gálvez, D. (2011). *Cálculo Estructural De Tuberías Enterradas Por El Método De Elementos Finitos, Con Base En El Informe Técnico Cen/Tr 1295-3* (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID). Retrieved from http://oa.upm.es/7753/1/DANIEL_GALVEZ_CRUZ.pdf
- Hartley, B. J. D., Asce, A. M., Duncan, J. M., & Asce, F. (1988). *E' AND ITS VARIATION WITH DEPTH*. 113(5), 538–553.
- Helwany, S. (2007). *Applied Soil Mechanics: With ABAQUS Applications*. In I. JOHN WILEY & SONS (Ed.), *Applied Soil Mechanics: With ABAQUS Applications*. <https://doi.org/10.1002/9780470168097>
- Katona, M. G. (1978). *Analysis Computer Program F*. 1(1), 3–9.
- Kawabata, T., Mohri, Y., Oda, T., Shoda, D., Ariyoshi, M., & Nakashima, H. (2008). Field measurement and numerical analysis for buried large diameter steel pipes. *Proceedings of Pipelines Congress 2008 - Pipeline Asset Management: Maximizing Performance of Our Pipeline Infrastructure*, 321, 1–10.
- Krizek, R. J., Parmelee, R. A., Kay, J., & Elnaggar, H. A. (1971). *Structural Analysis and Design of Pipe Culverts*. NCHRP Report.
- Liu, P. F., Zheng, J. Y., Zhang, B. J., & Shi, P. (2010). Failure analysis of natural gas buried X65 steel pipeline under deflection load using finite element method. *Materials and Design*, 31(3), 1384–1391. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.045>
- M. J. TURNER, R. W. CLOUGH, H. C. MARTIN, A. L. J. T. (1956). Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 23(9), 805–823. <https://doi.org/10.2514/8.3664>
- Marston, A. (1913). The theory of loads on pipes in ditches, and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe. *Iowa Engineering Experiment Station, Ames, Iowa.*, p. Bulletin No. 31.
- Masada, T. (2000). Modified Iowa formula for vertical deflection of buried flexible pipe. *Journal of Transportation Engineering*, 126(5), 440–446. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:5\(440\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:5(440))
- Moser, A. P., & Folkman, S. (2008). *Buried Pipe Design*, 3Ed. McGraw-Hill.
- Newmark, N. M. (1935). *Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations*.
- Obrzud, R. F., & Truty, A. (2018). The hardening soil model - a practical guidebook. *Zace Services Ltd, Software Engineering*, 05, 205.
- Oliver, X. (2017). *Multimedia course CONTINUUM MECHANICS FOR ENGINEERS*. (May).

- Rao, G. V., & Dutta, R. K. (2006). Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(3), 711–724. <https://doi.org/10.1007/s10706-004-4006-x>
- SHARMA, J. R. (2013). Development of a Model for Estimation of Buried Large Diameter Thin-Walled Steel Pipe Deflection due to External Loads. Retrieved from [/citations?view_op=view_citation&continue=/scholar%3Fhl%3Dpt-BR%26as_sdt%3D0,5%26scilib%3D1&citilm=1&citation_for_view=wS0xi2wAAAAJ:2osOgNQ5qMEC&hl=pt-BR&oi=p](https://doi.org/10.1007/s10706-004-4006-x)
- Sharma, J. R., Najafi, M., Marshall, D., Jain, A., & Rahjoo, S. (2011). *Testing and Evaluation of Statically-loaded Large Diameter Steel Pipe with Native Backfill Soils*.
- Shaurav Alam, Erez N. Alloinche, Chris Bartlett, Ang Sherpa, and B. K. (2013). *Experimental Evaluation of Soil-Pipe Friction Coefficients*. 360–371.
- Spangler, M. G. (1948). Underground Conduits - An Appraisal of Modern Research. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113(1), 316–345.
- Spangler, M. G. (1964). Pipeline Crossings Under Railroads and Highways. *Journal - American Water Works Association*, 56(8), 1029–1046. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1964.tb01300.x>
- Tannant, D. D., & Regensburg, B. (2001). *Guide lines for mine haul road design*.
- Tian, Y., Liu, H., Jiang, X., & Yu, R. (2015). Analysis of stress and deformation of a positive buried pipe using the improved Spangler model. *Soils and Foundations*, 55(3), 485–492. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.04.001>
- Warman, D. J., Hart, J. D., & Francini, R. B. (2009). Final Report Development of a Pipeline Surface Loading Screening Process & Assessment of Surface Load Dispersing Methods. *October*, 43085(05), 75.
- Watkins, R. K., & Anderson, L. R. (2017). *Structural Mechanics of Buried Pipes*.
- Webb, M. C., Trebicki, D. D. P., & Smulders, P. A. (2002). Field testing and buckling strength of buried large-diameter thin-walled steel pipes. *Pipelines 2002 - Beneath Our Feet: Challengers and Solutions - Proceedings of the Pipeline Division Specialty Conference*, 69. [https://doi.org/10.1061/40641\(2002\)69](https://doi.org/10.1061/40641(2002)69)
- WPCF Manual of Practice no. 9. (1969). Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers. In *ASCE- Manuals & Reports on Eng Practice*.
- Yu, H.-S. (2006). *Plasticity and Geotechnics*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-33599-5>

APÉNDICE A

Resultados de estudio paramétrico por el método de elementos finitos

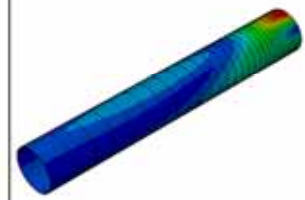
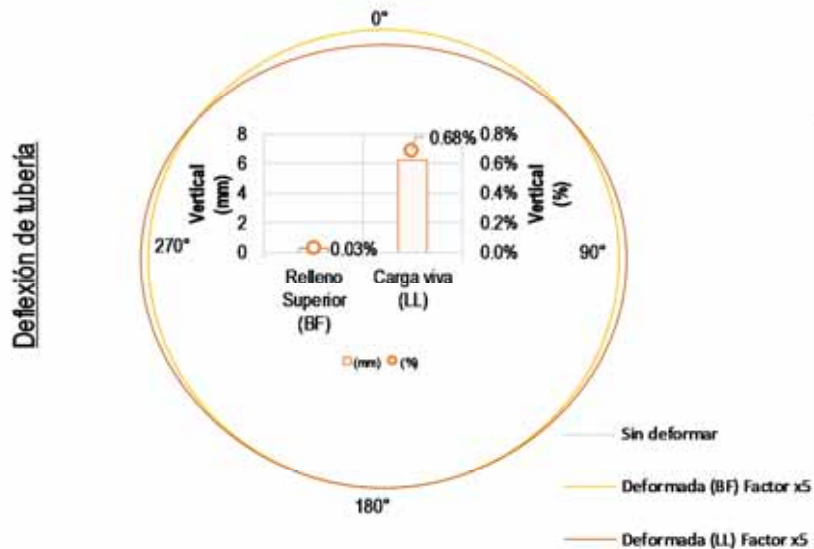
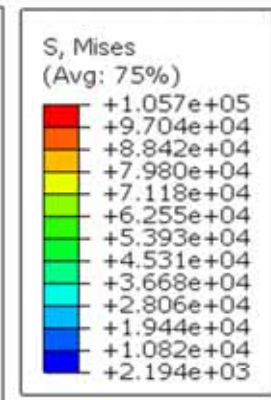
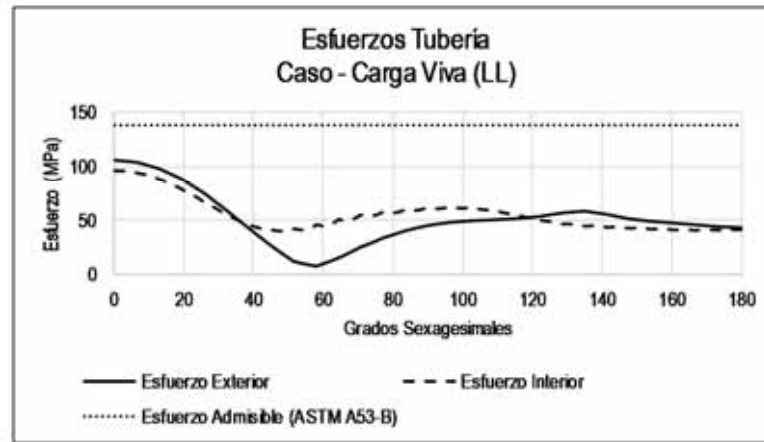
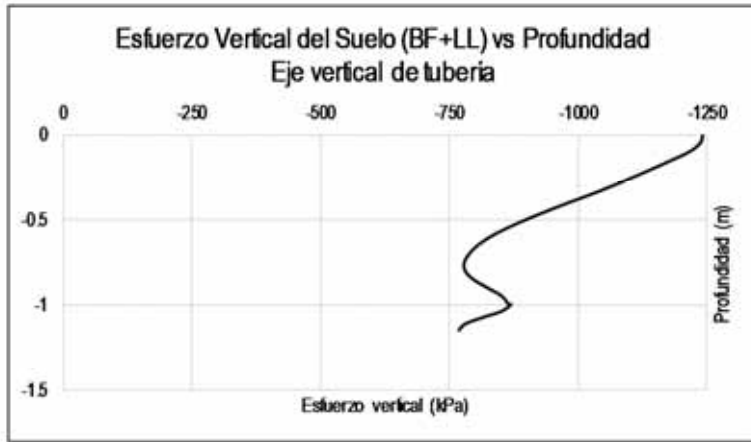


Figura A - 1: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

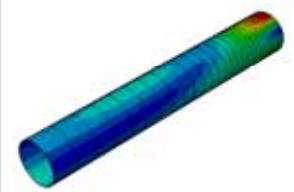
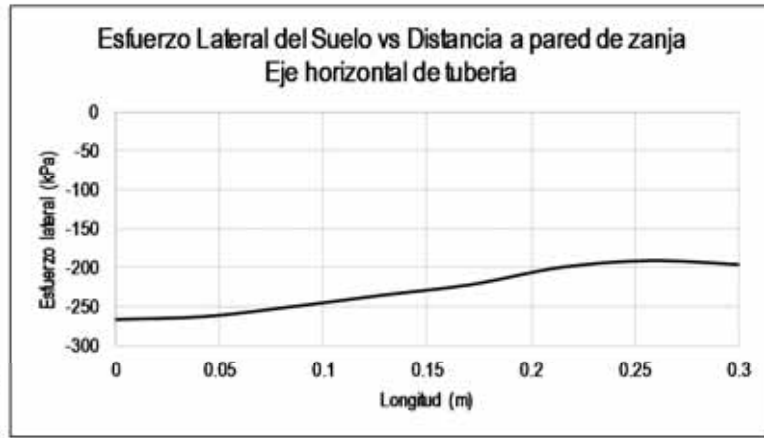
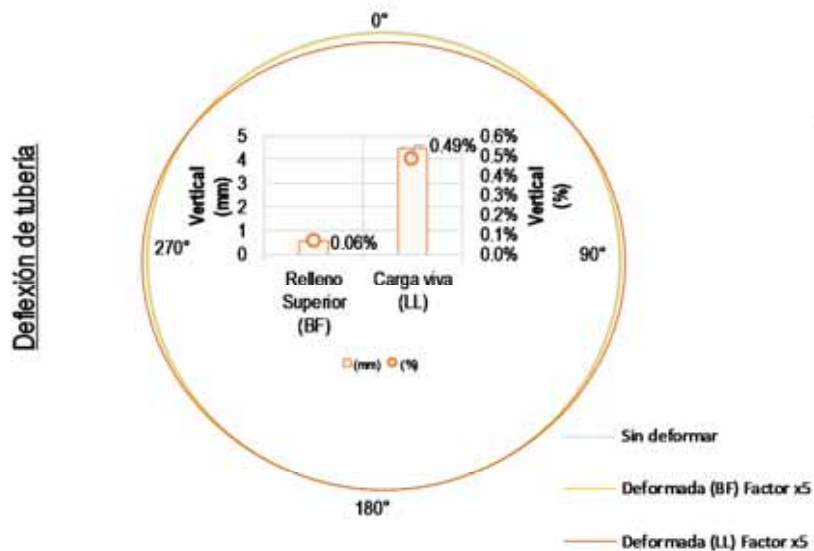
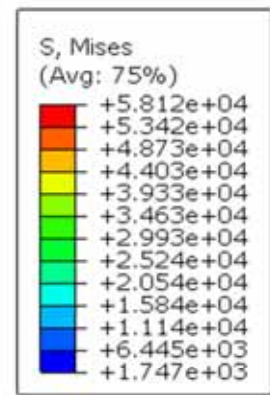
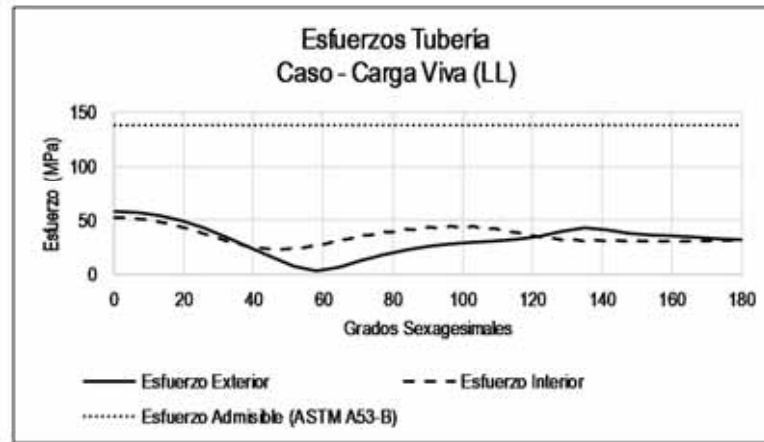
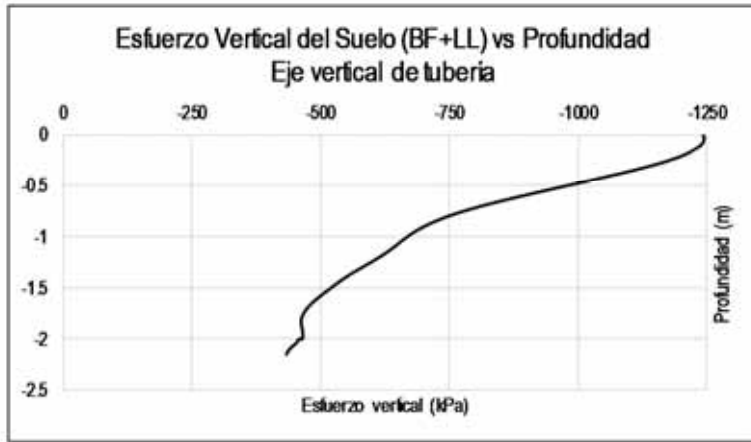


Figura A - 2: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

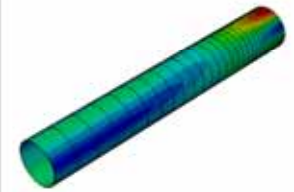
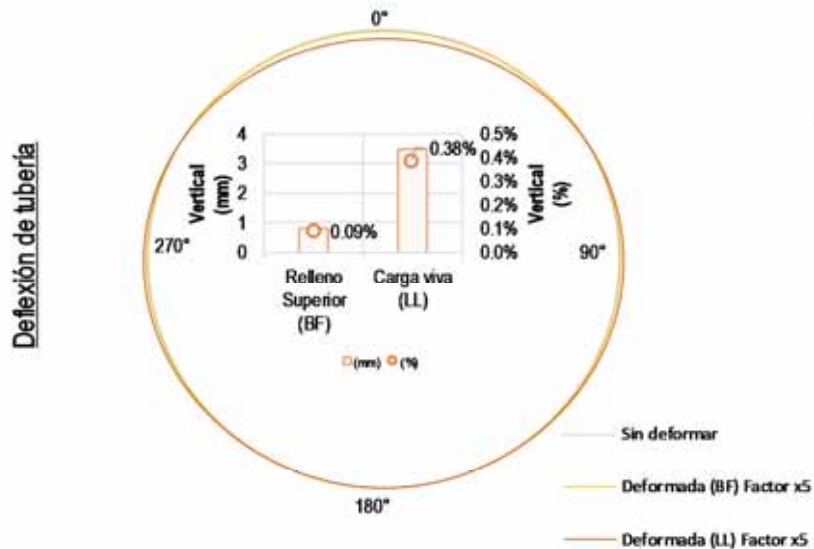
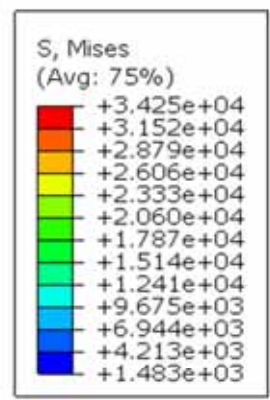
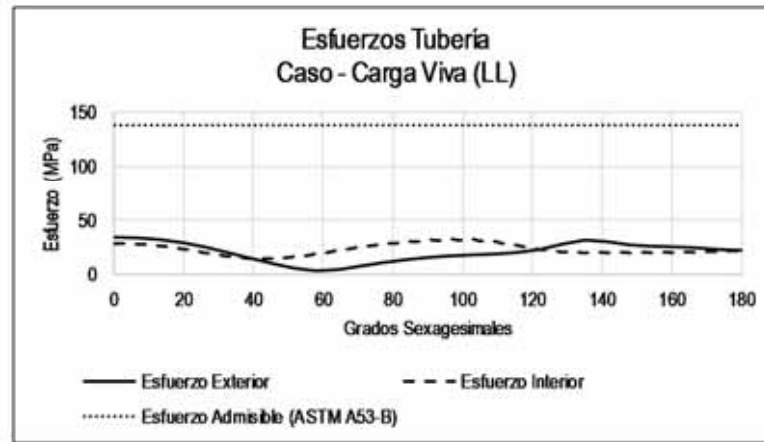
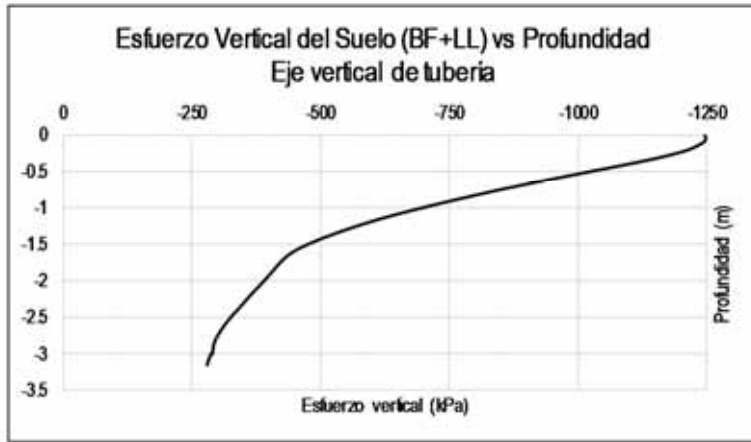


Figura A - 3: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

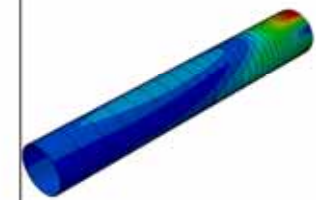
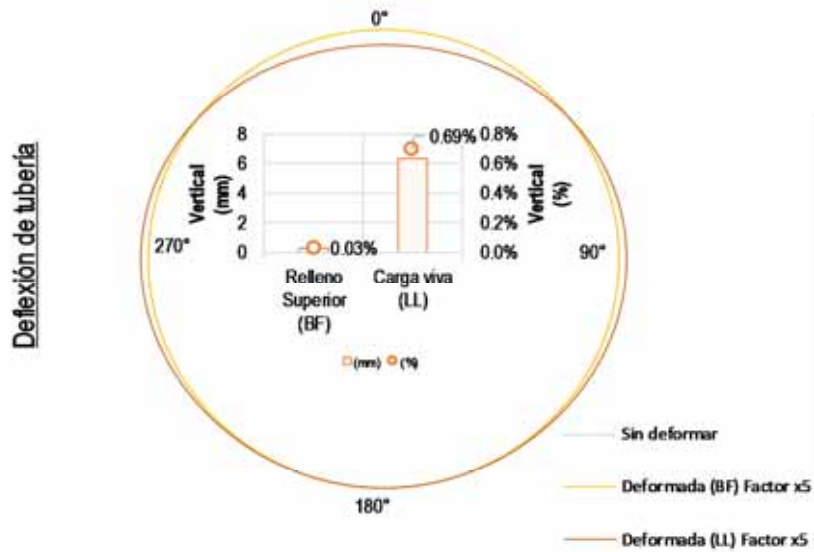
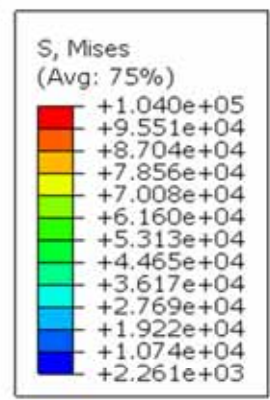
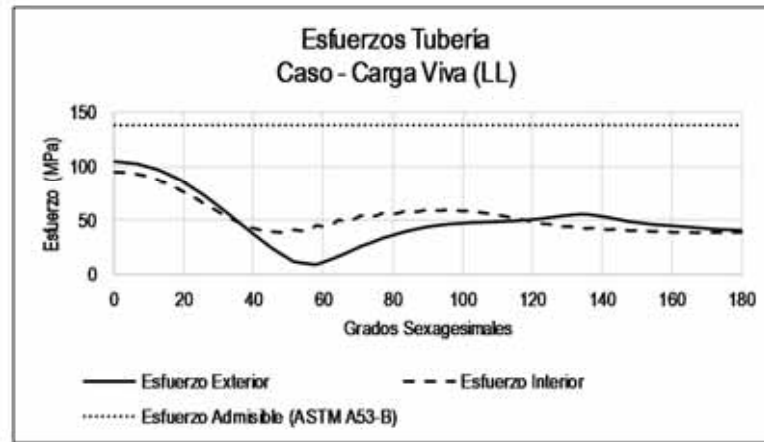
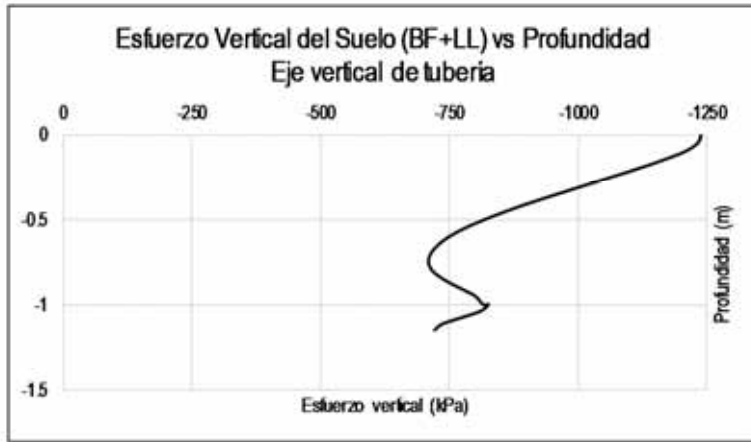


Figura A - 4: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

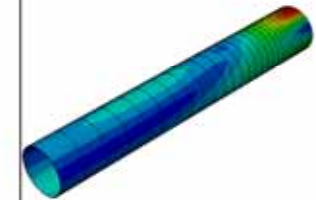
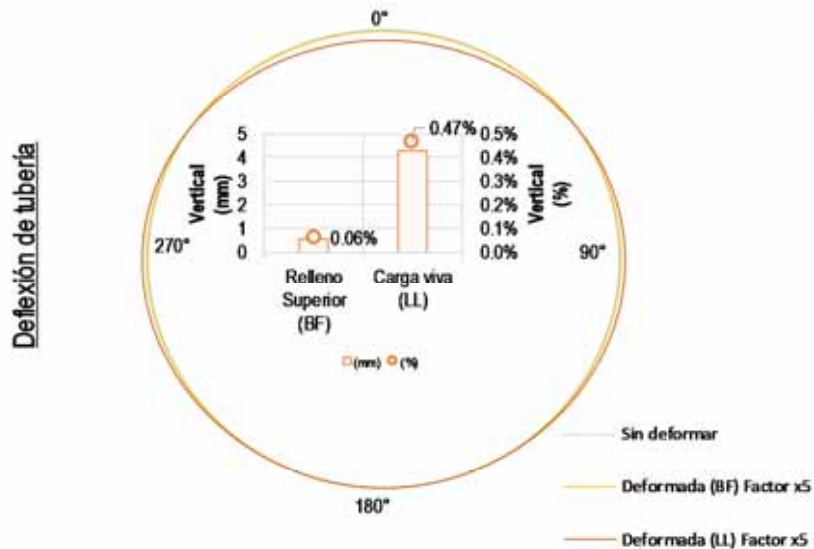
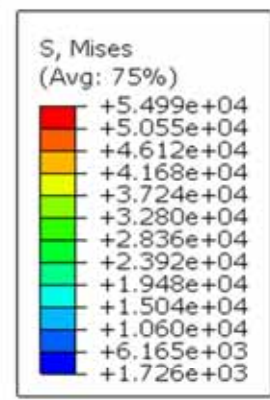
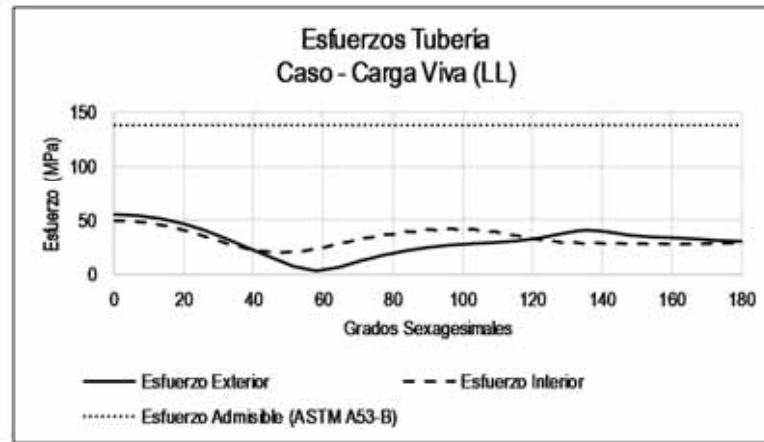
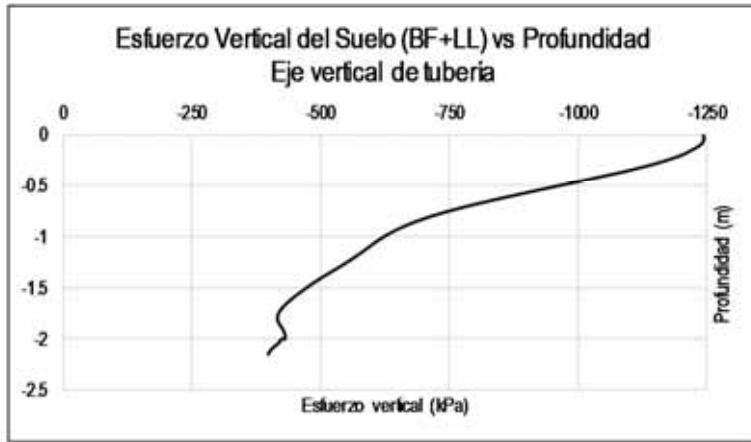


Figura A - 5: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

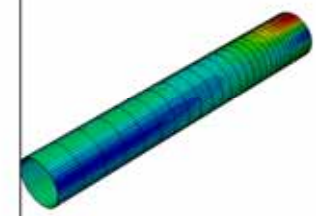
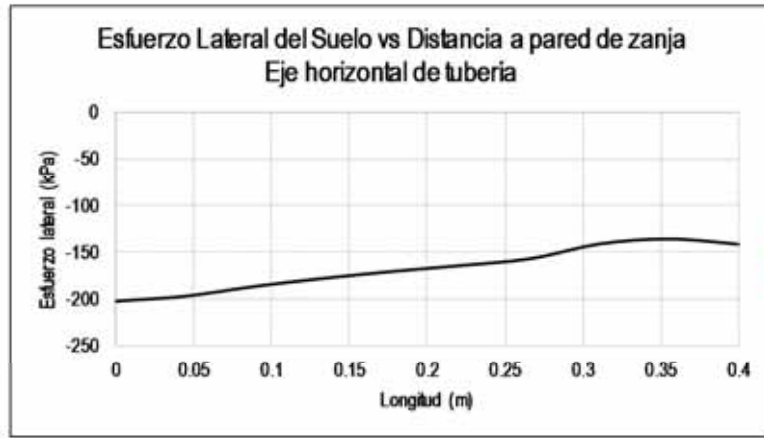
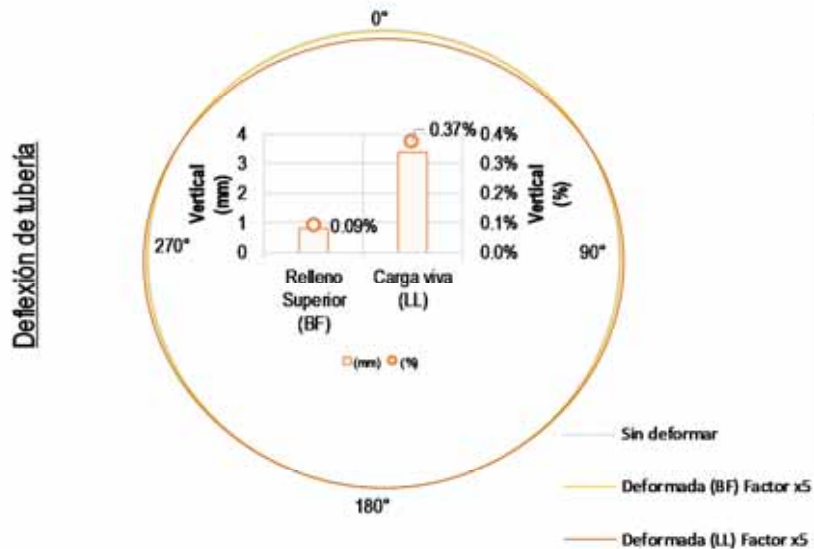
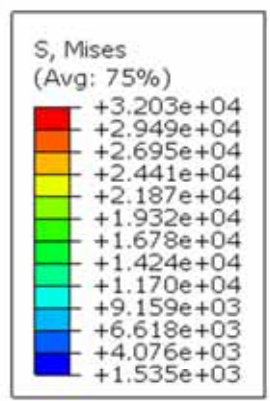
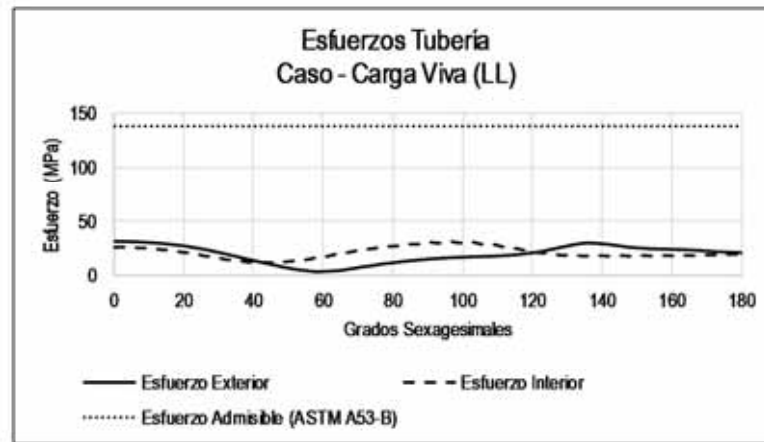
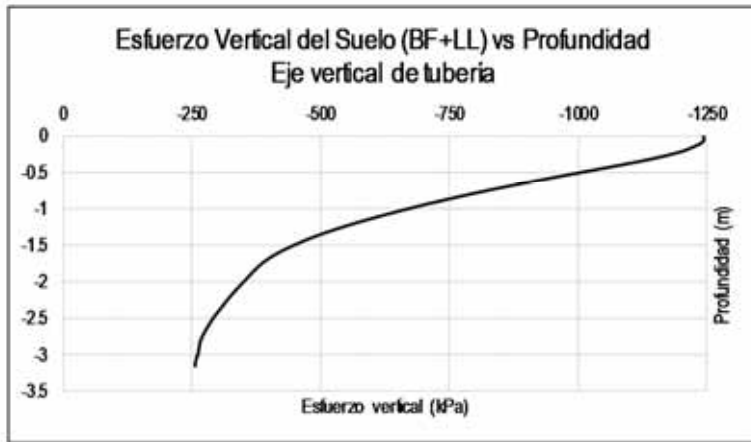


Figura A - 6: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

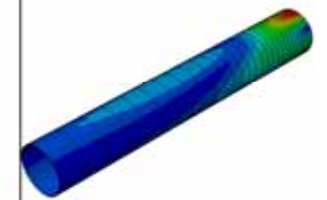
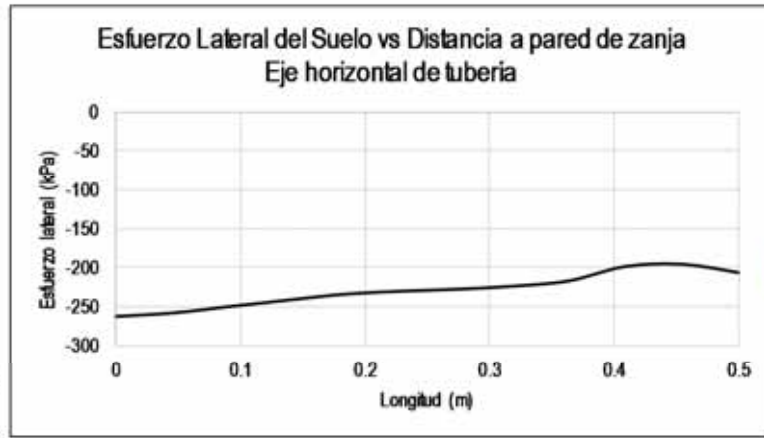
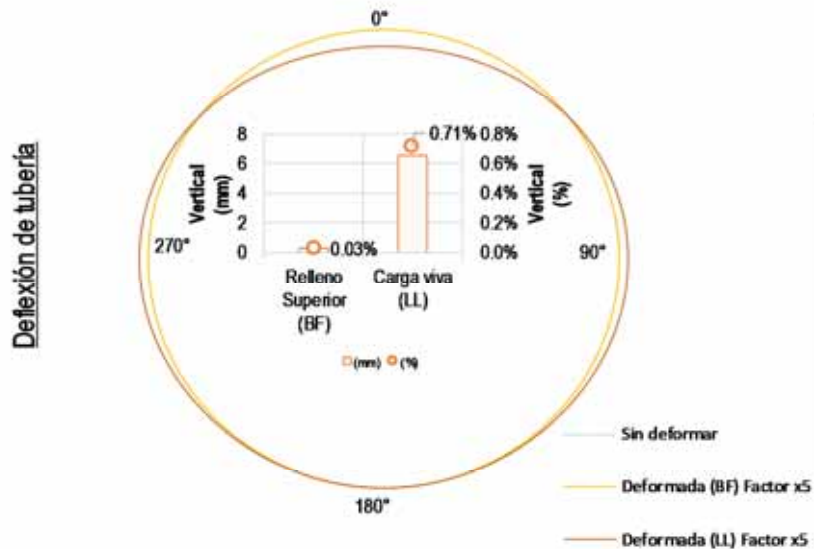
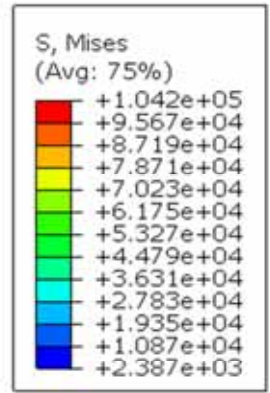
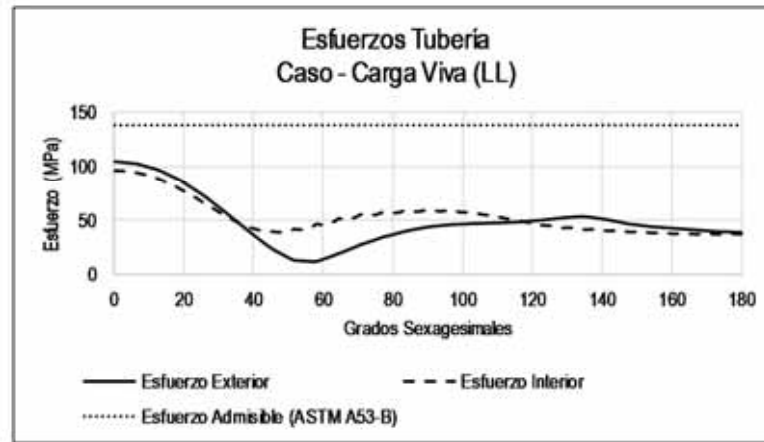
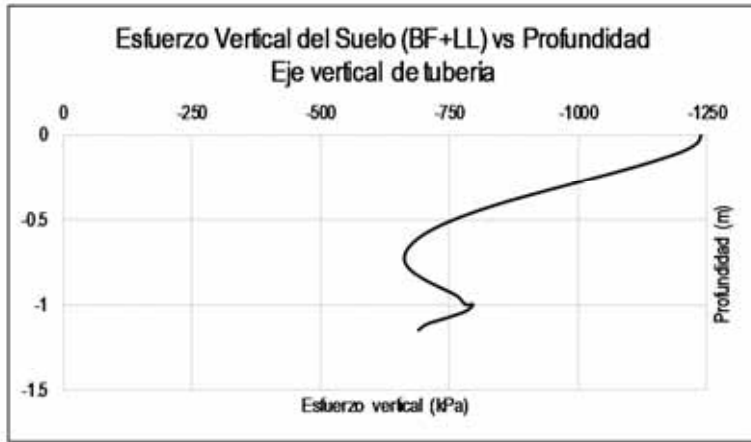


Figura A - 7: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

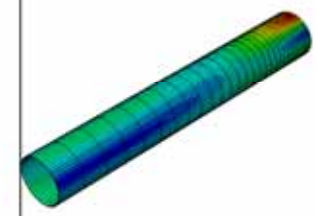
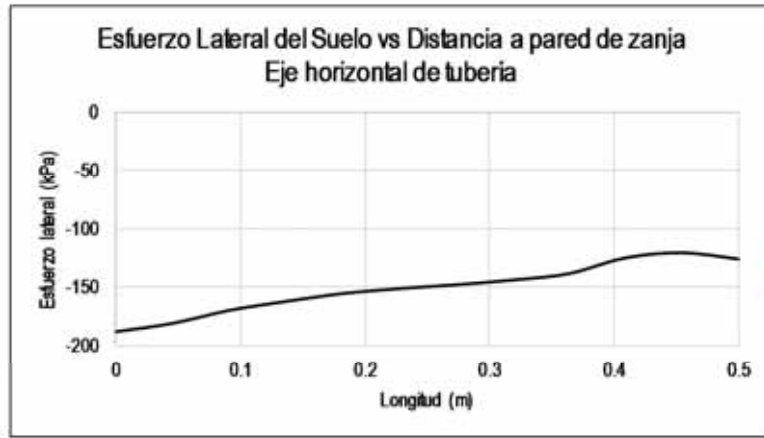
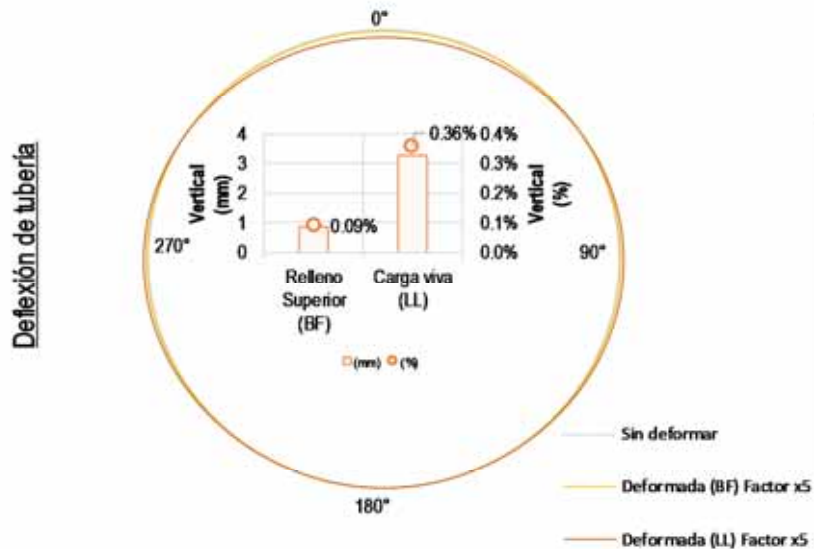
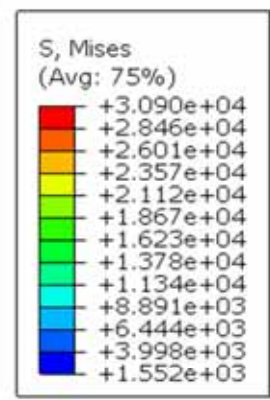
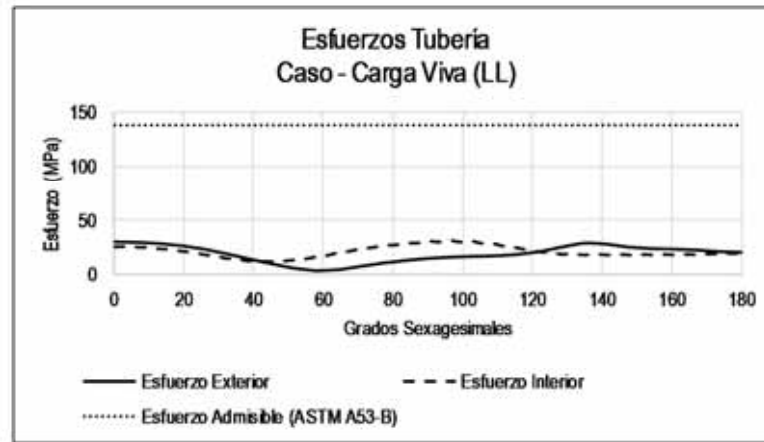


Figura A - 9: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

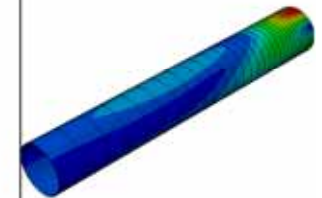
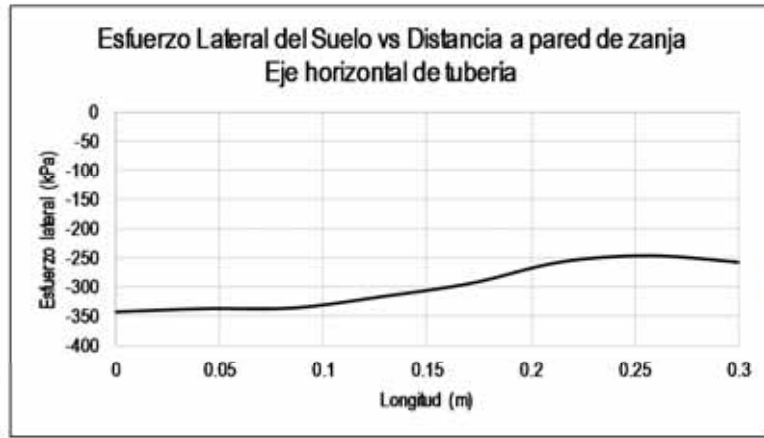
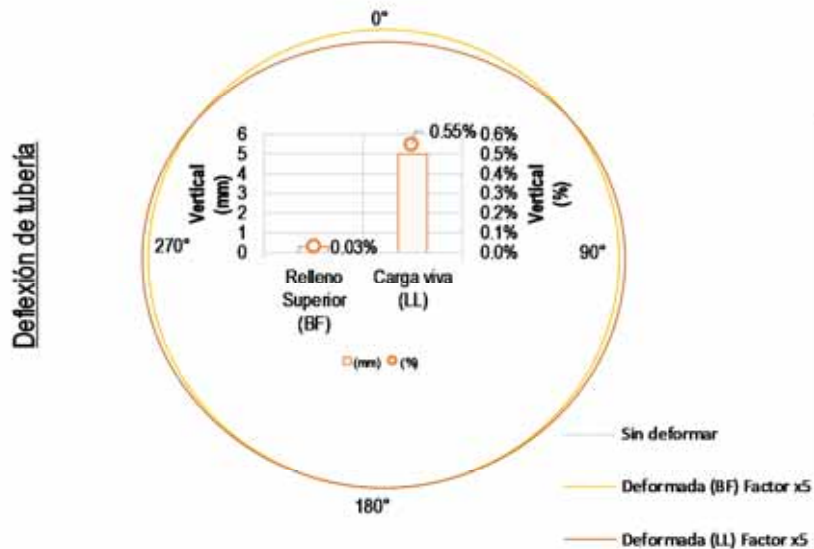
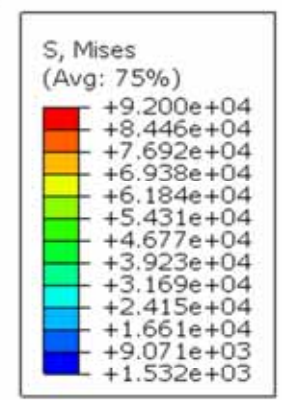
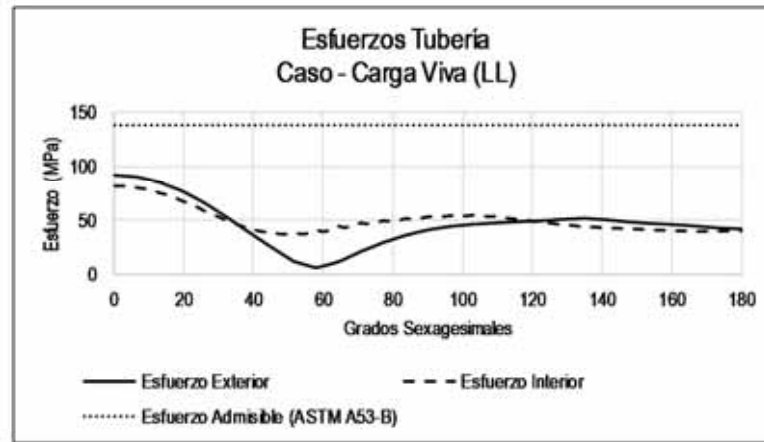
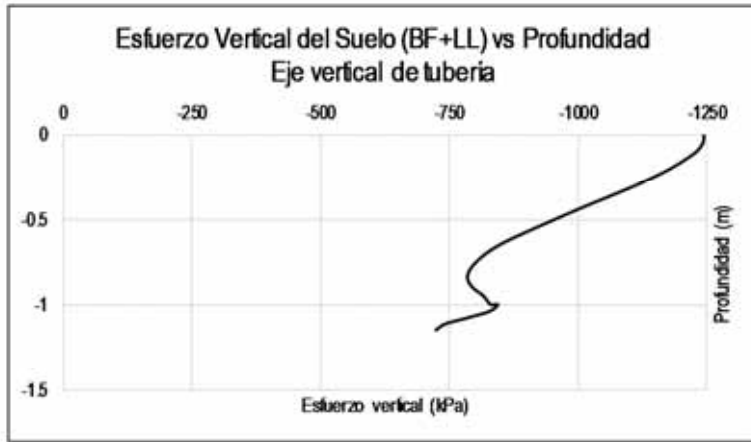


Figura A - 10: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

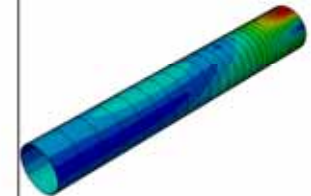
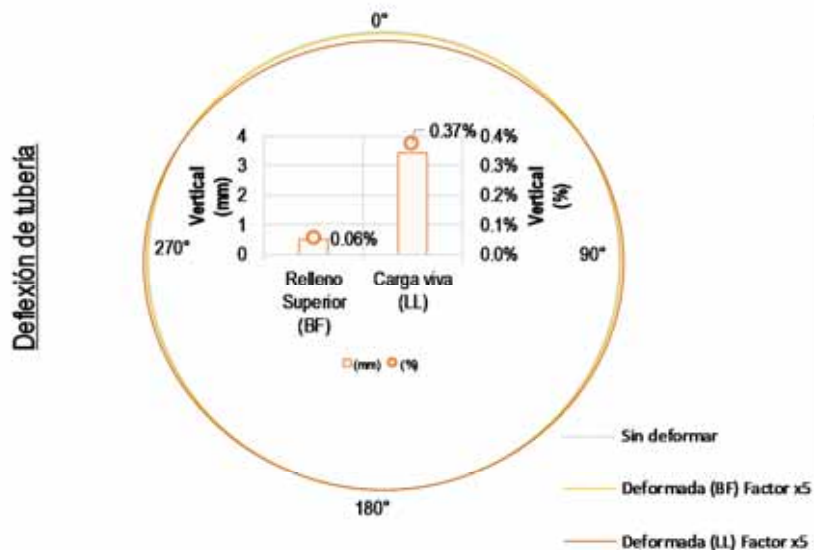
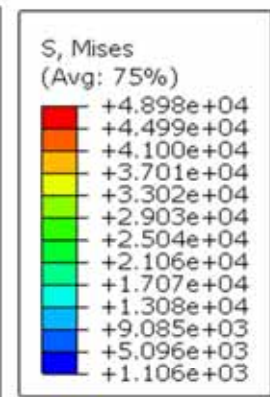
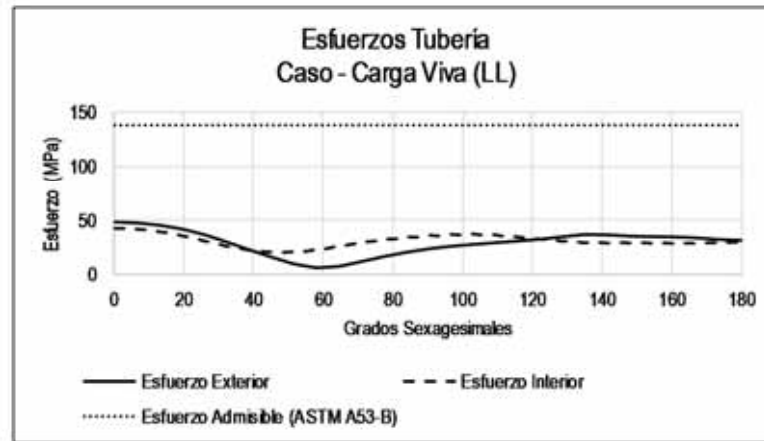
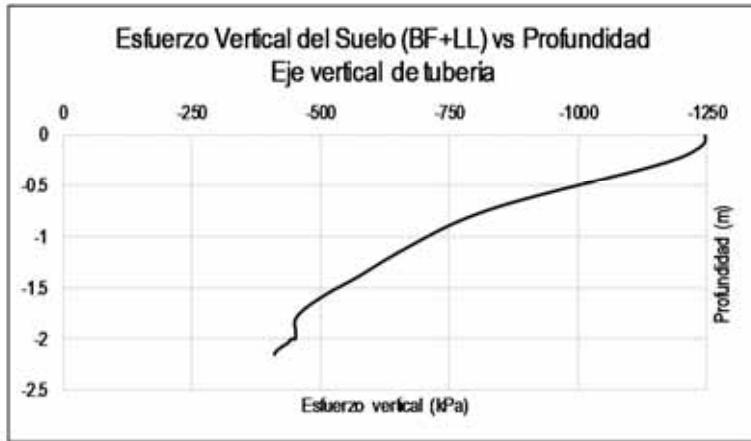


Figura A - 11: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

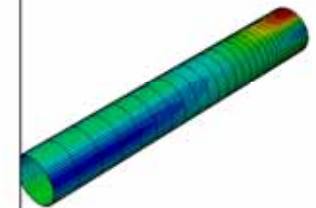
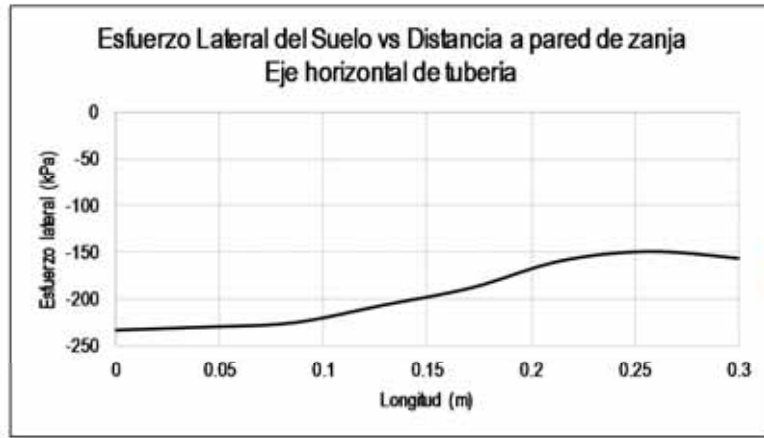
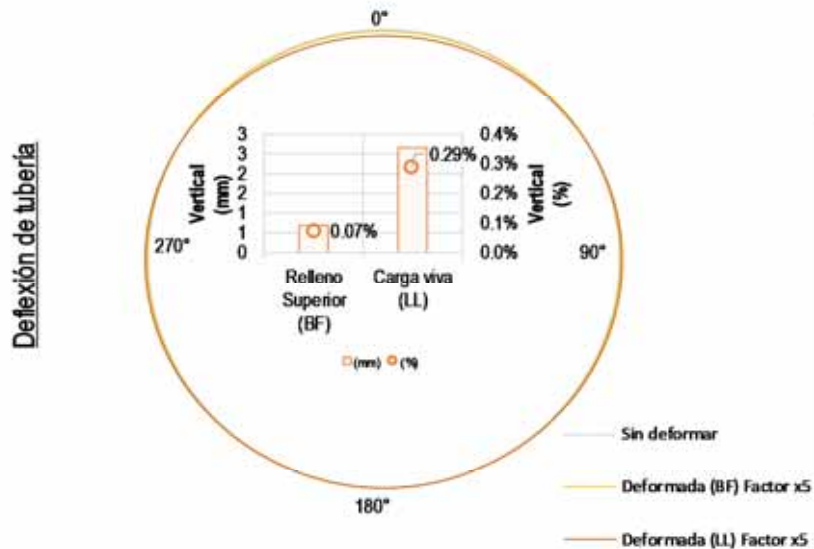
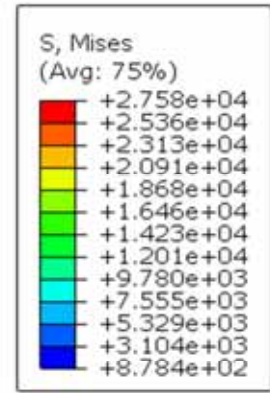
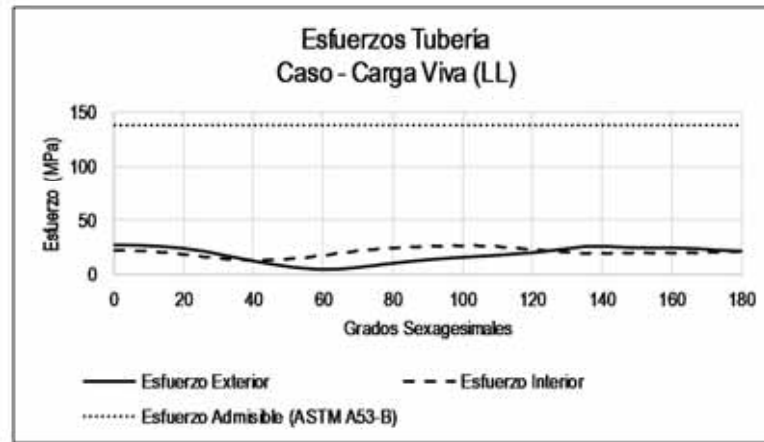


Figura A - 12: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

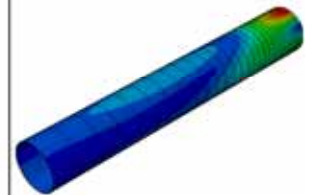
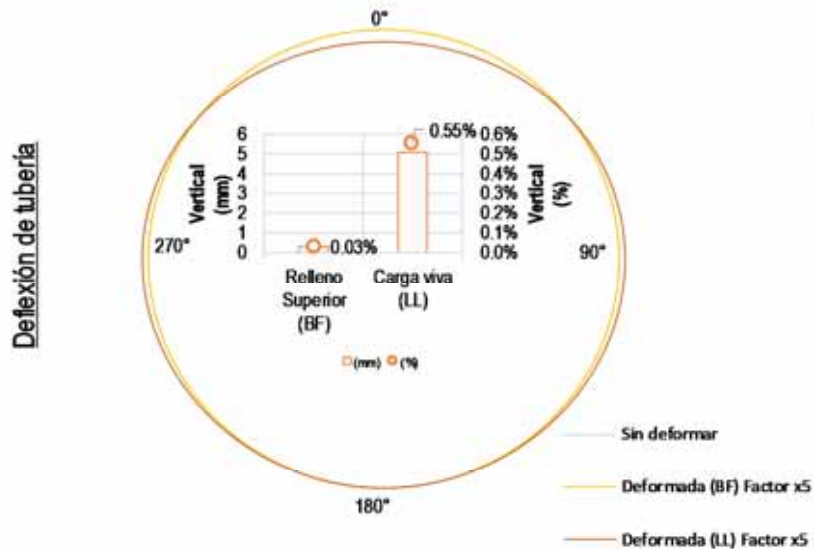
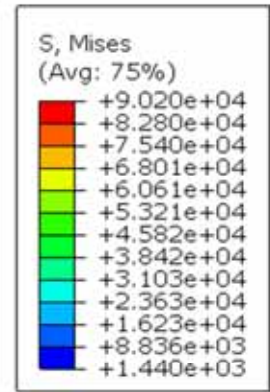
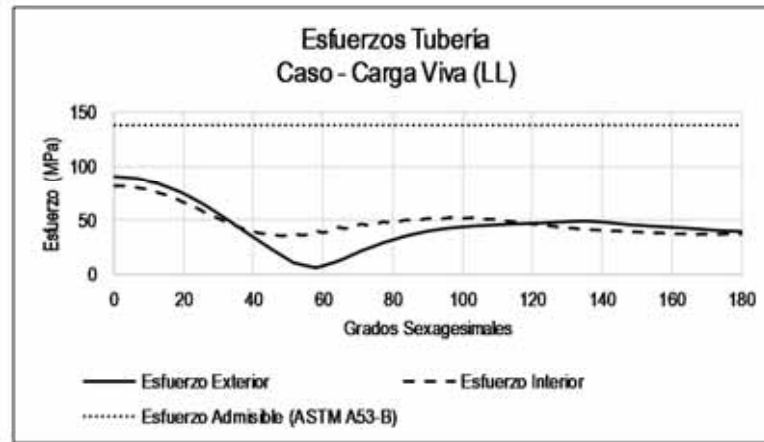
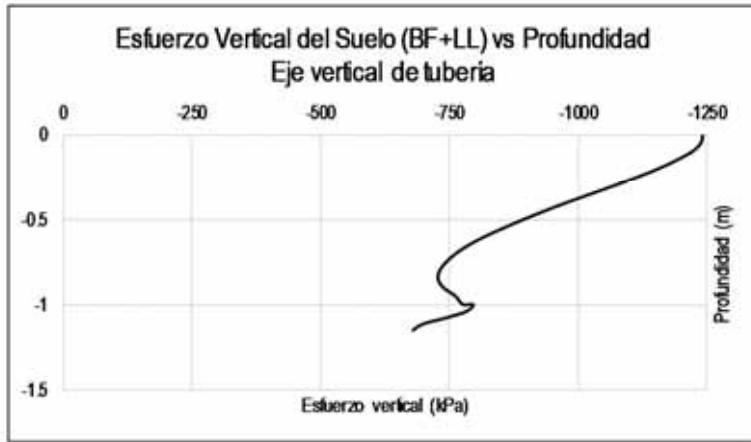


Figura A - 13: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

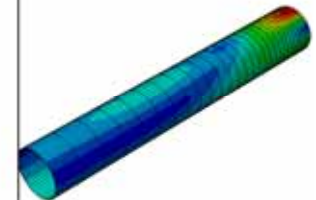
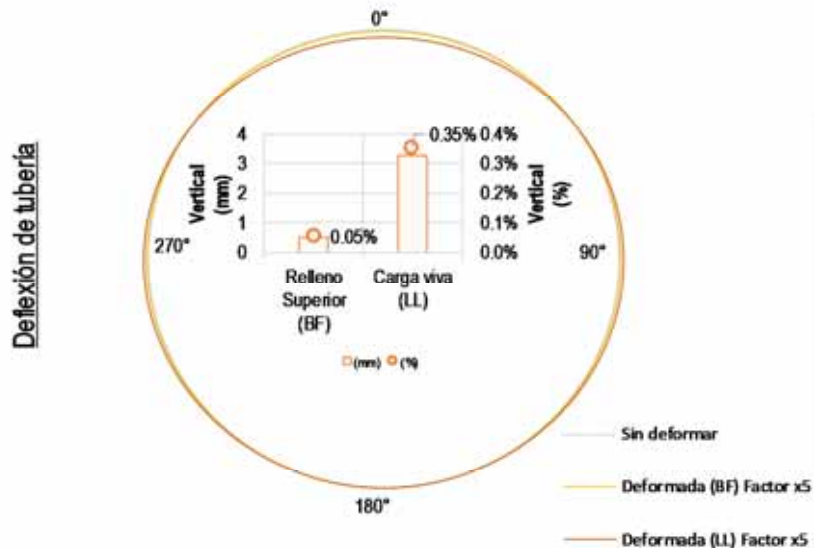
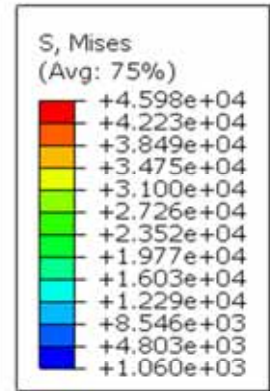
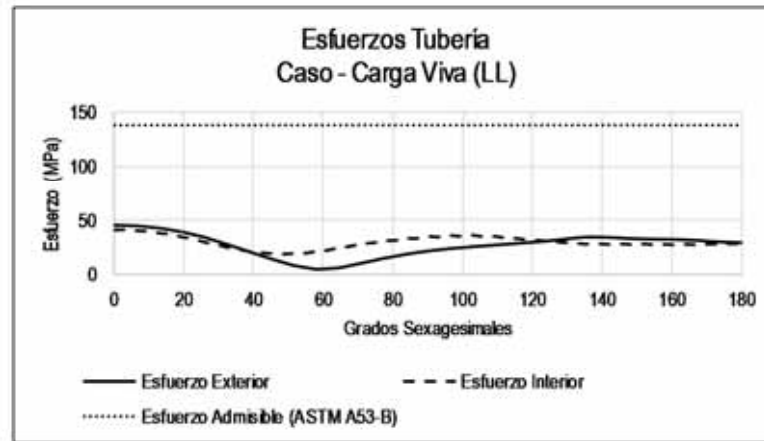
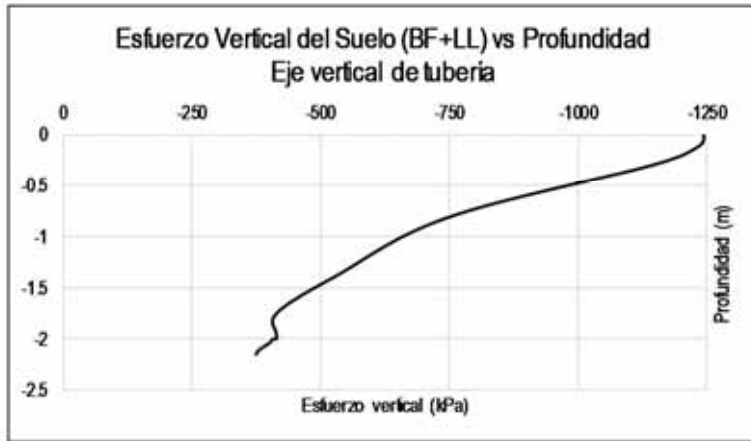


Figura A - 14: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

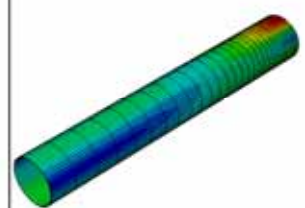
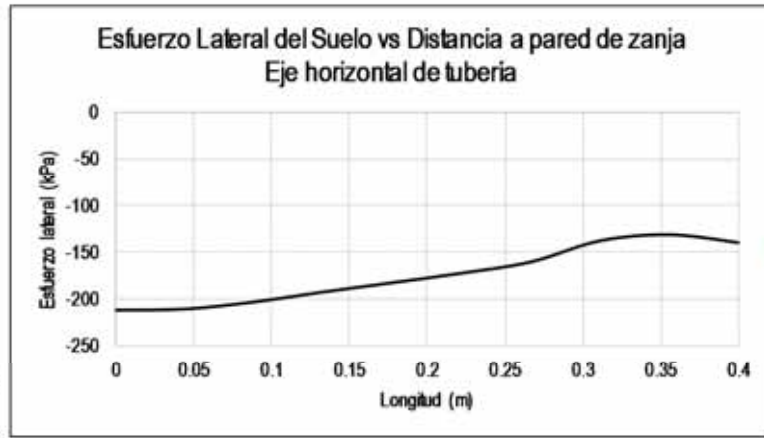
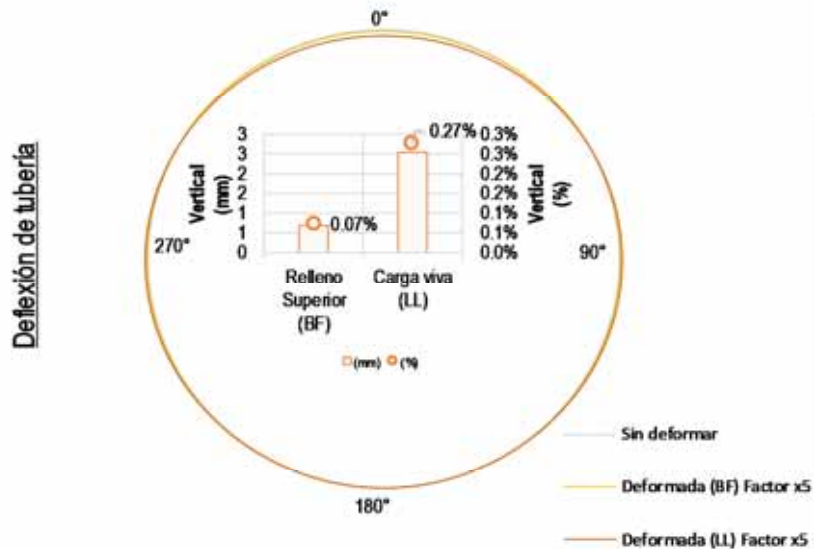
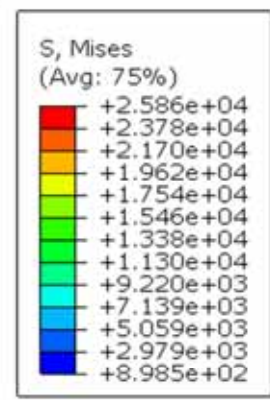
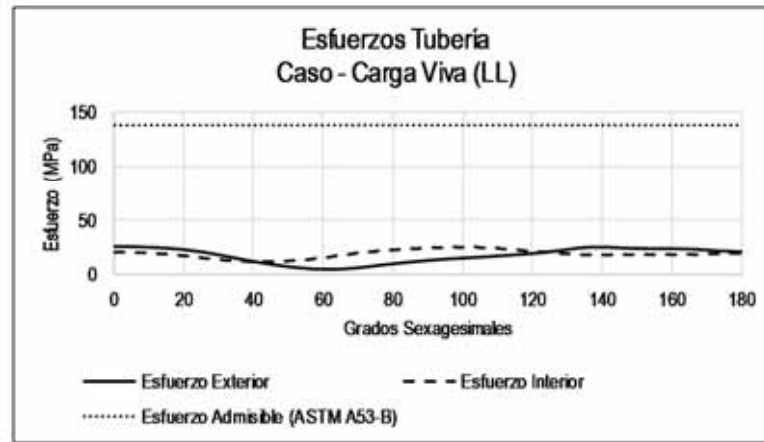
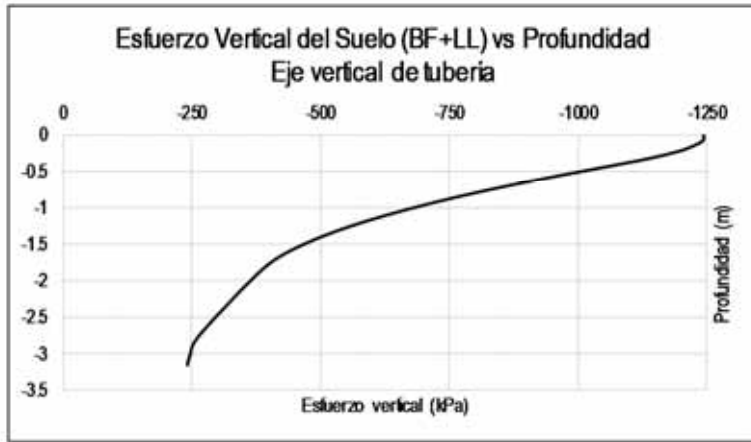


Figura A - 15: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

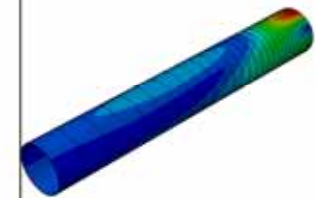
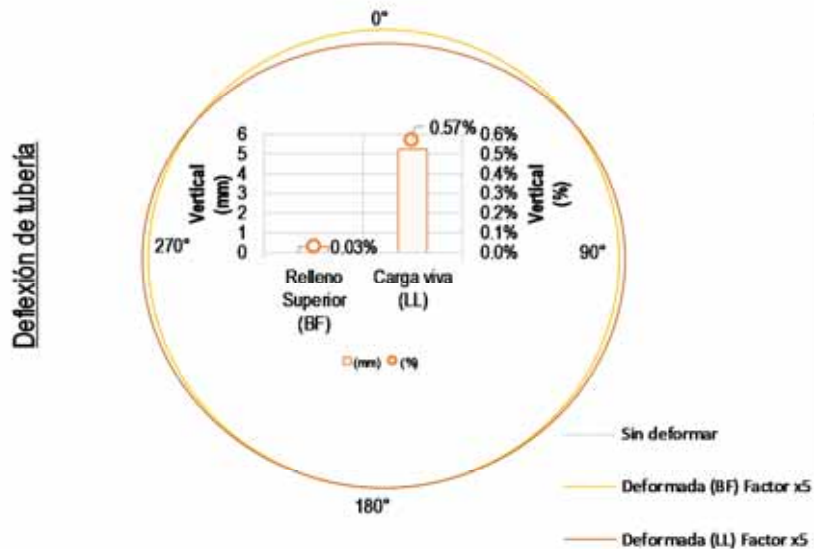
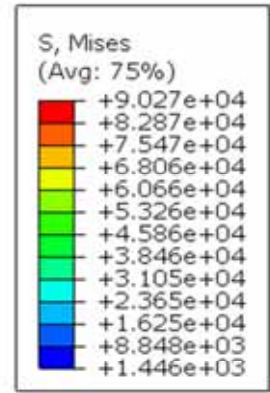
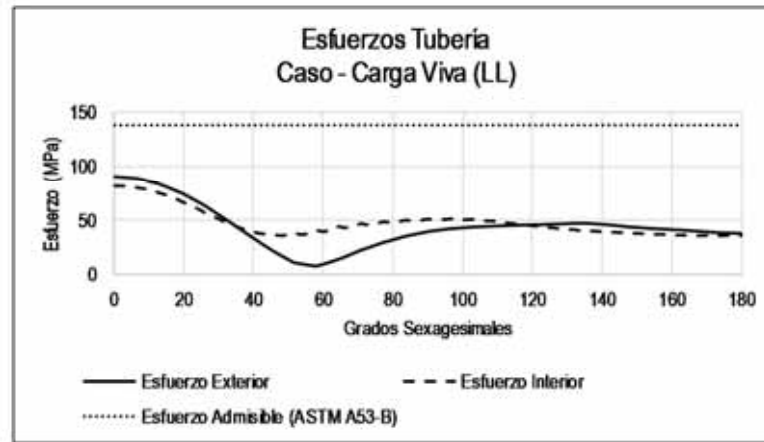
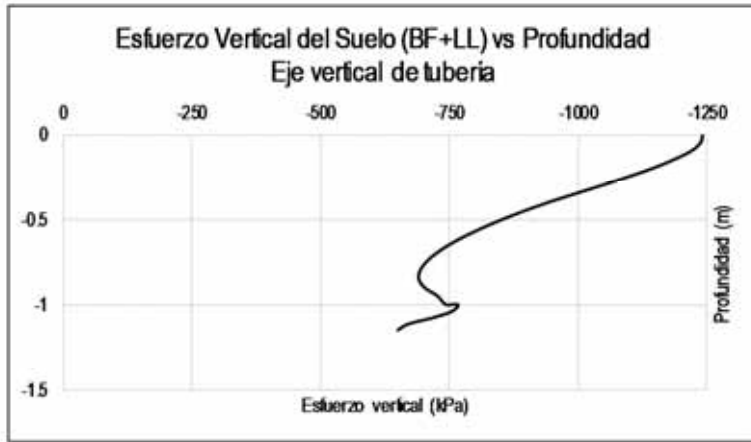


Figura A - 16: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

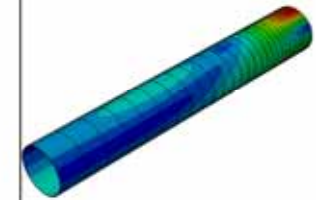
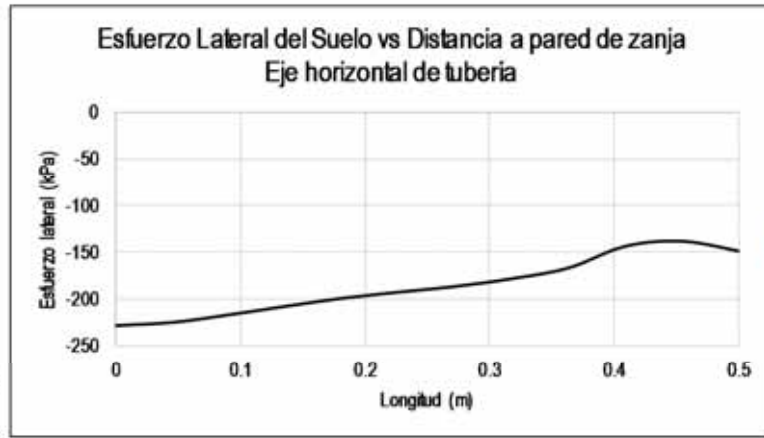
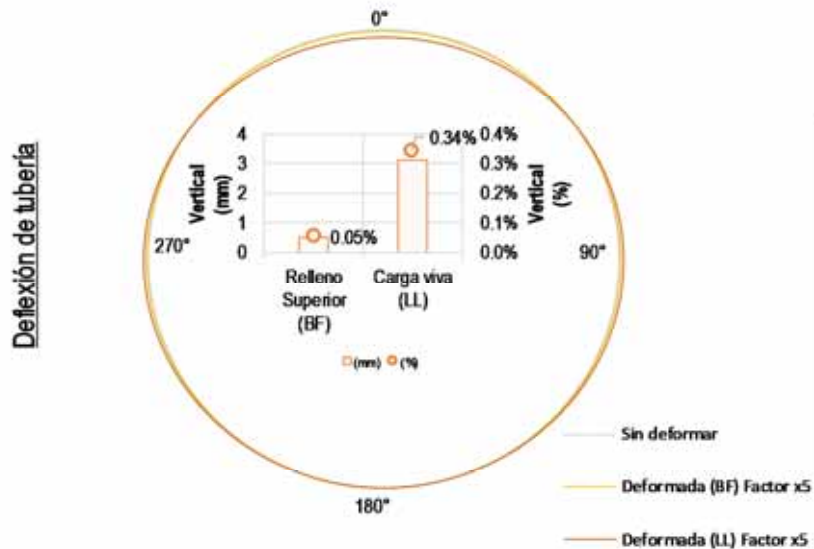
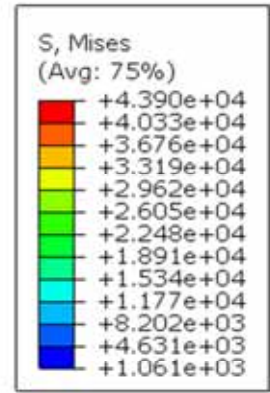
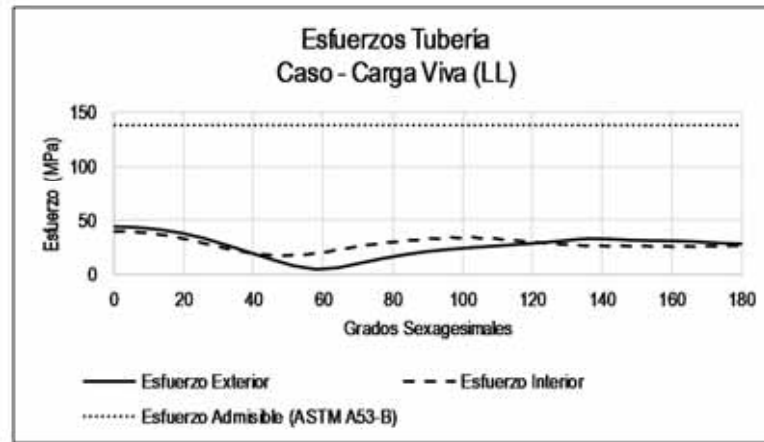


Figura A - 17: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

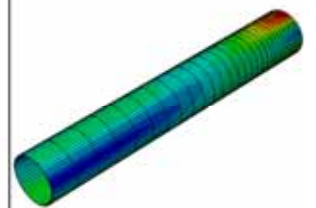
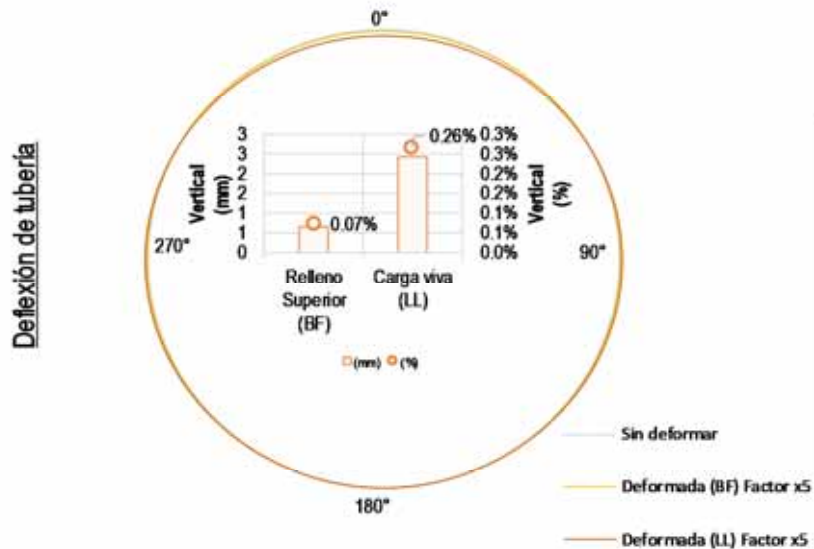
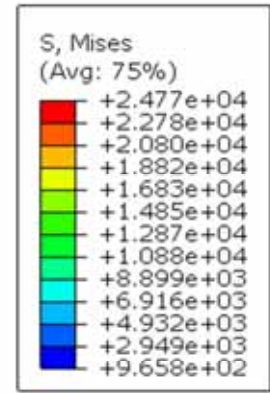
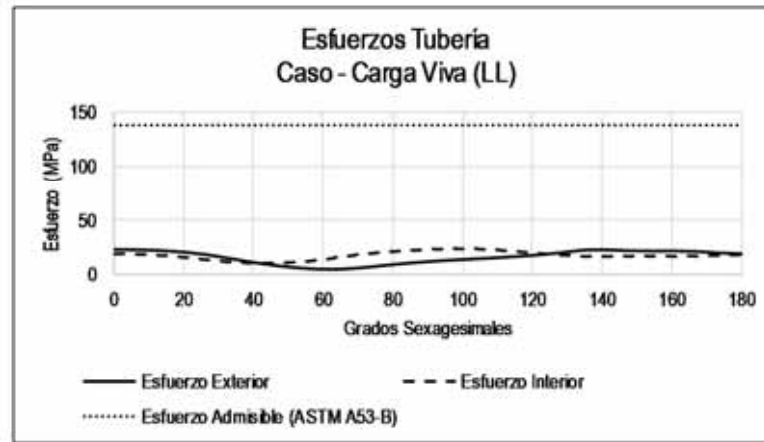


Figura A - 18: T(36"STD)-B(0.15m+1/6x36")-EM2-W(36"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

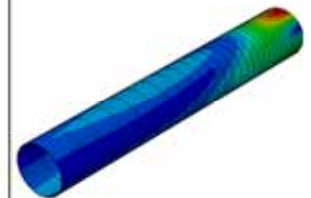
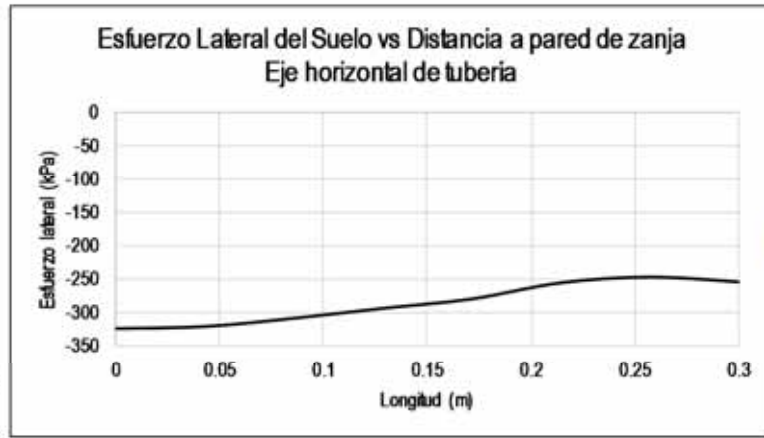
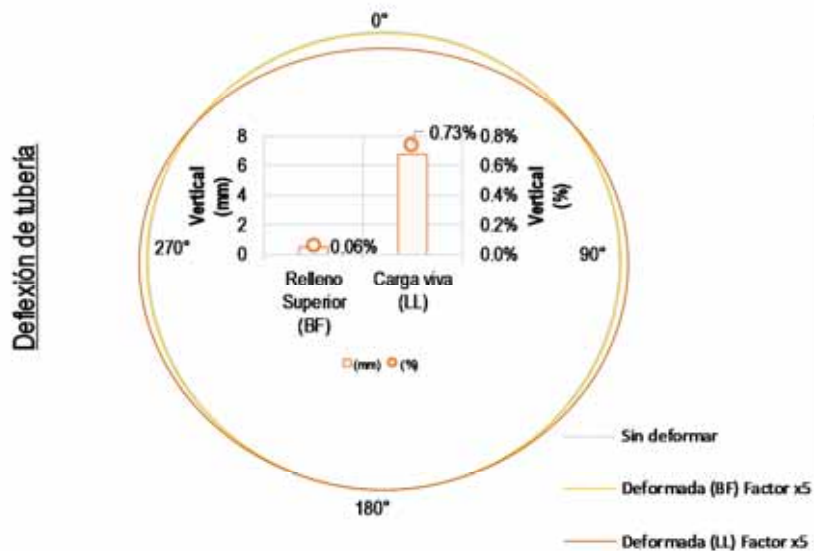
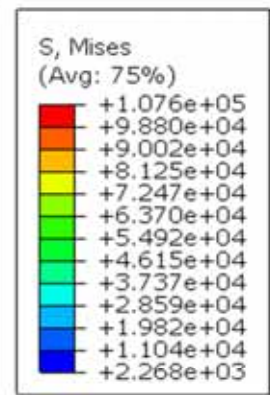
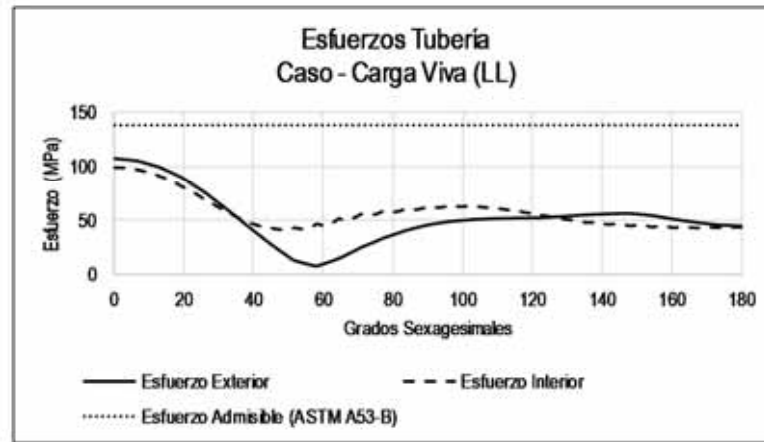


Figura A - 19: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

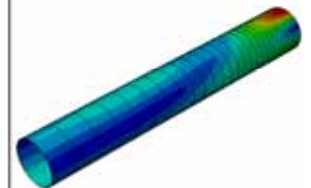
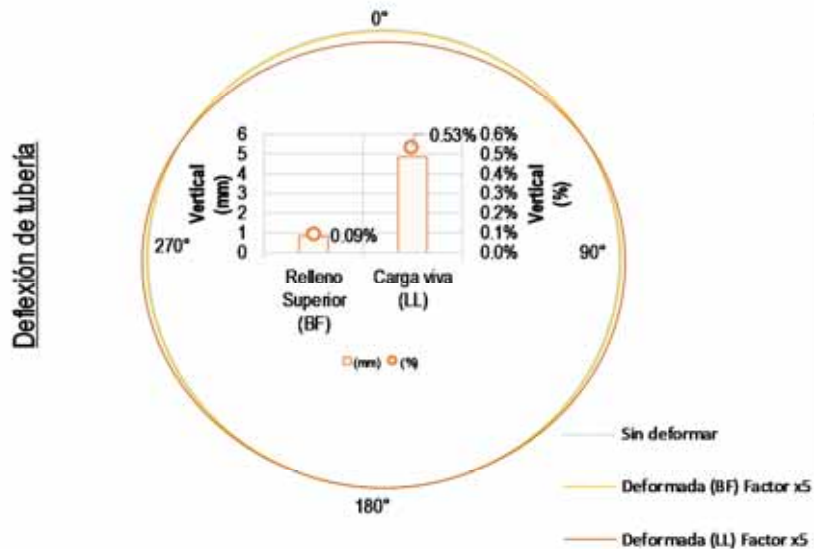
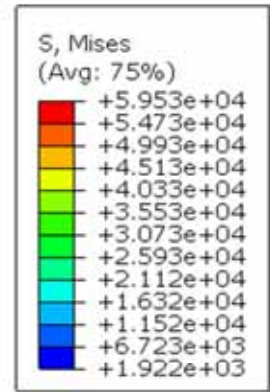
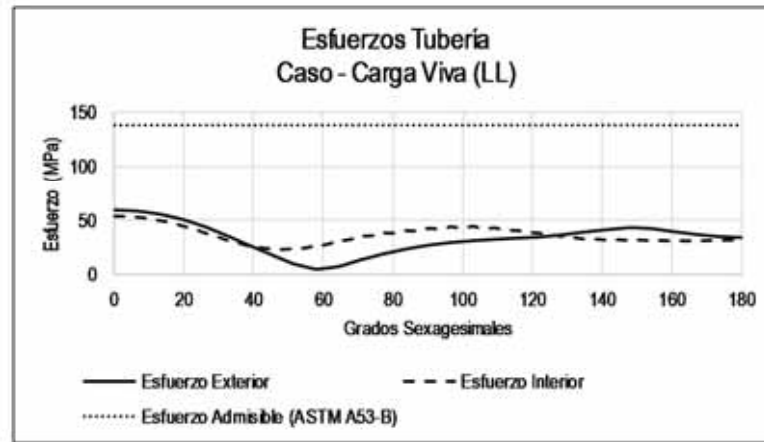


Figura A - 20: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

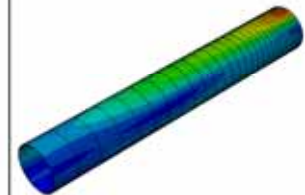
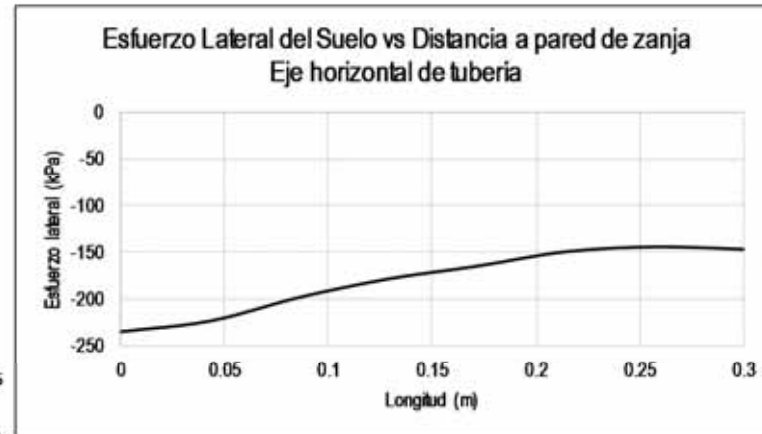
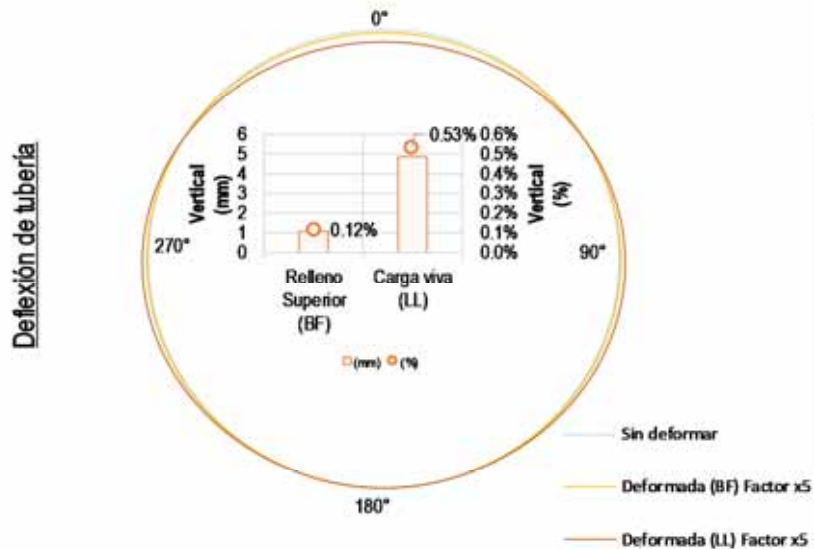
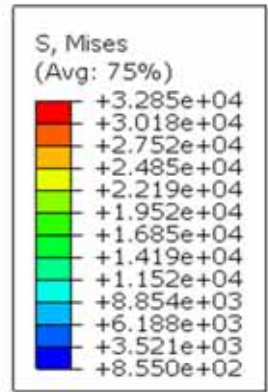
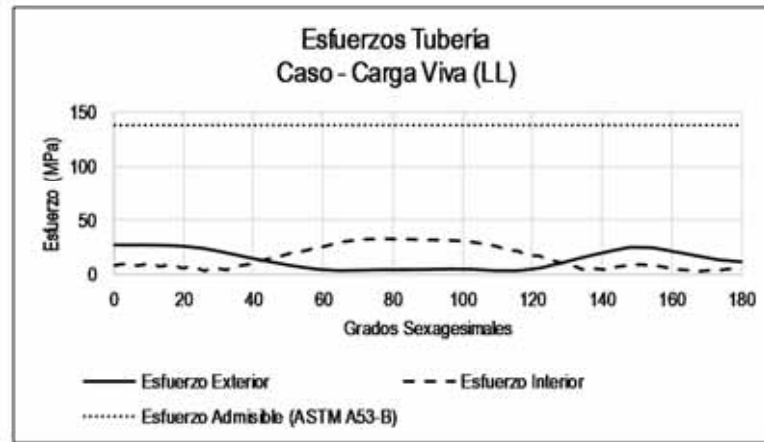
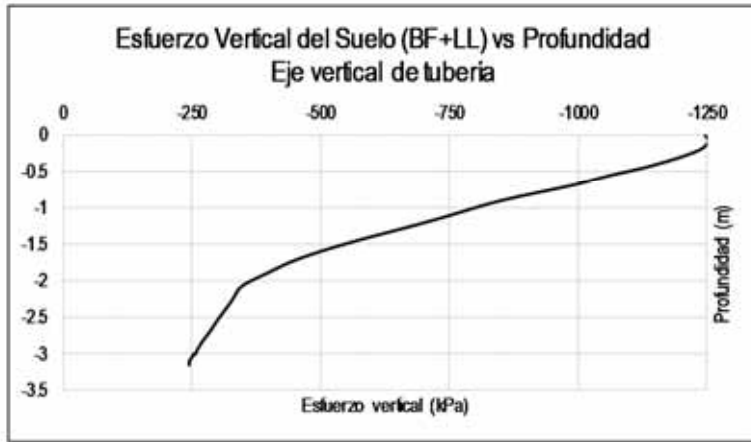


Figura A - 21: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

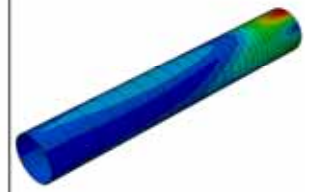
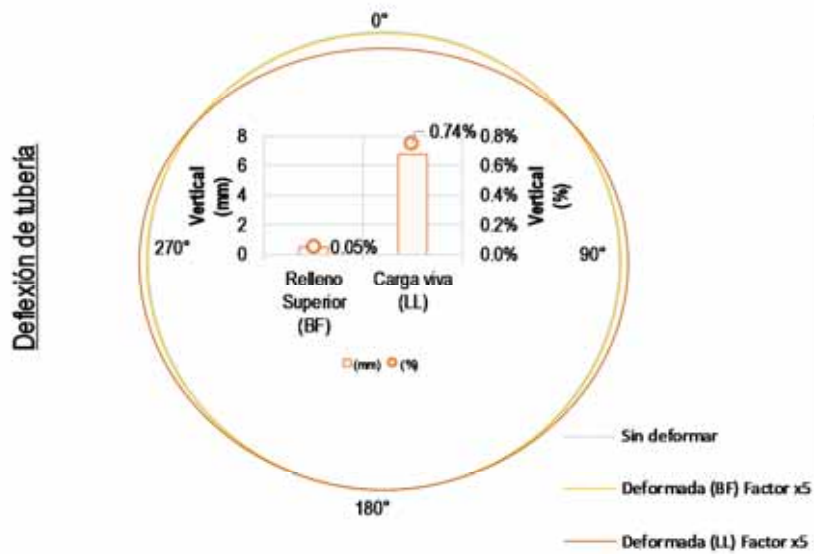
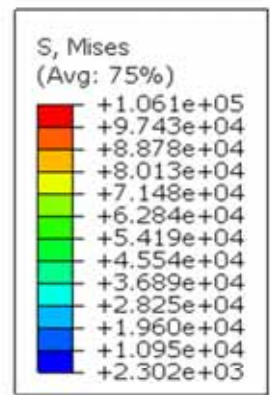
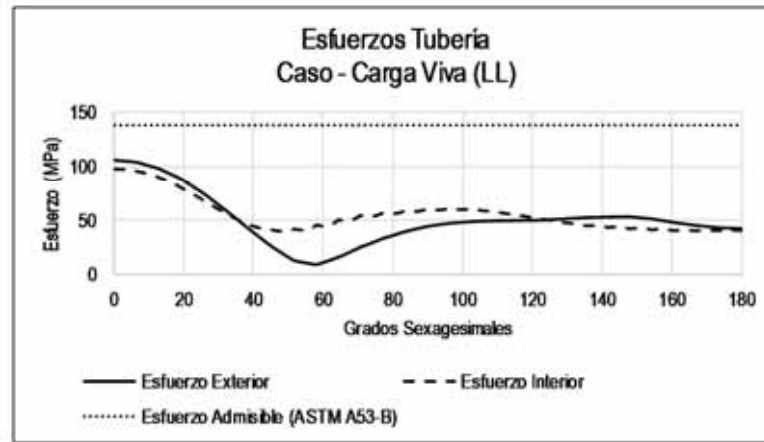
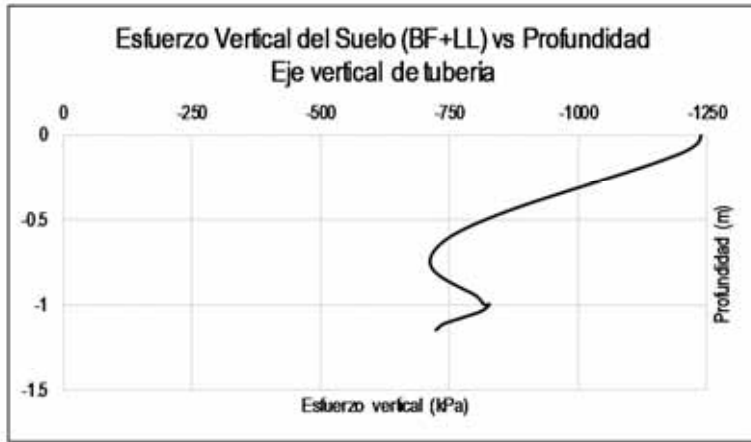


Figura A - 22: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

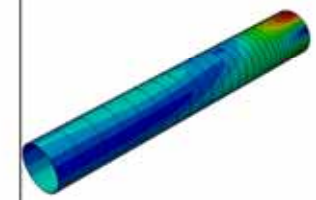
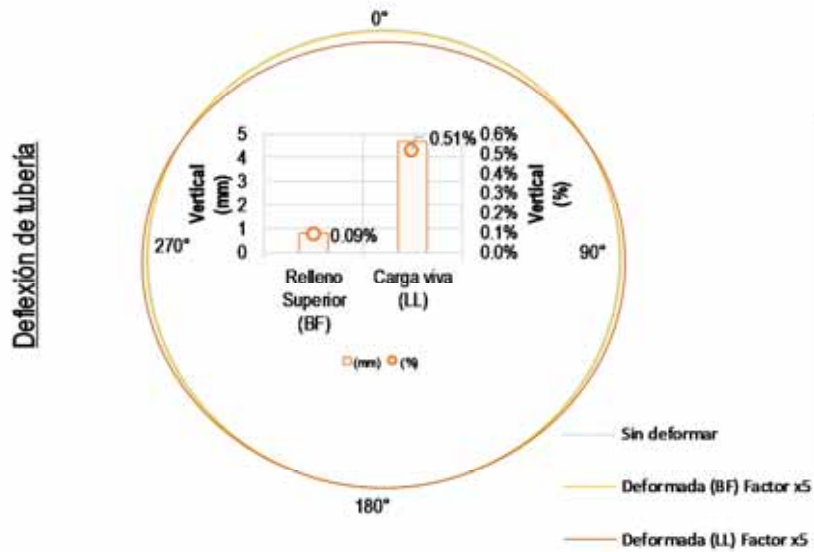
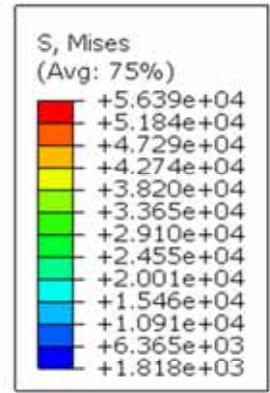
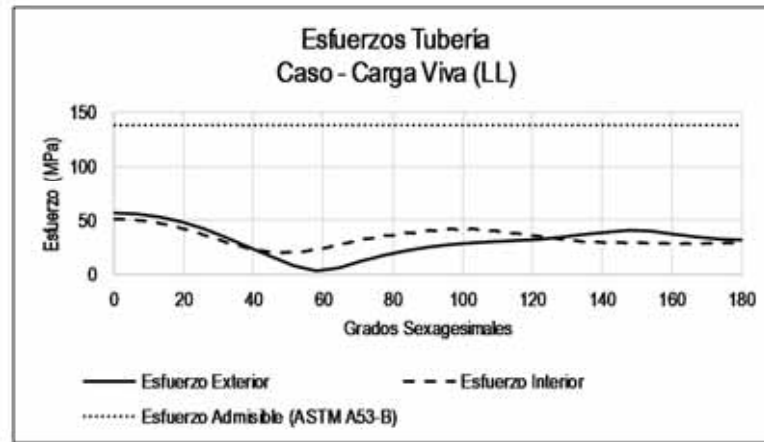


Figura A - 23: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

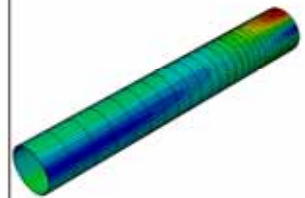
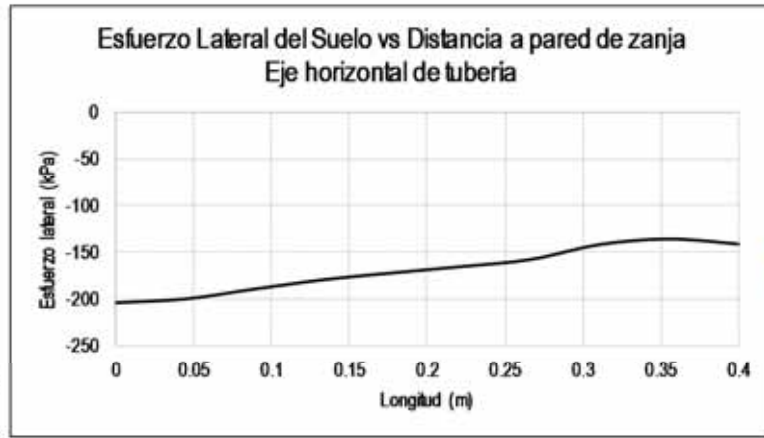
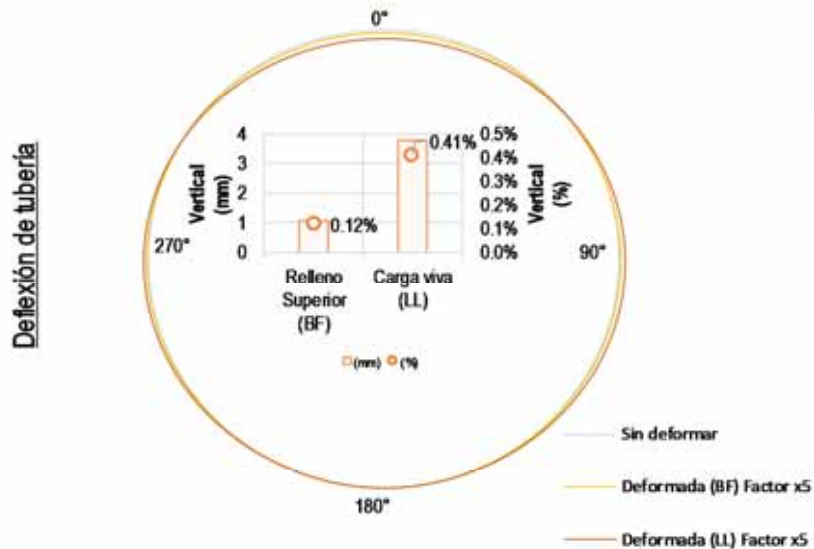
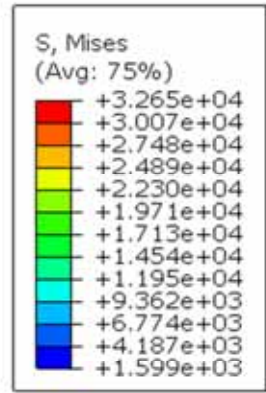
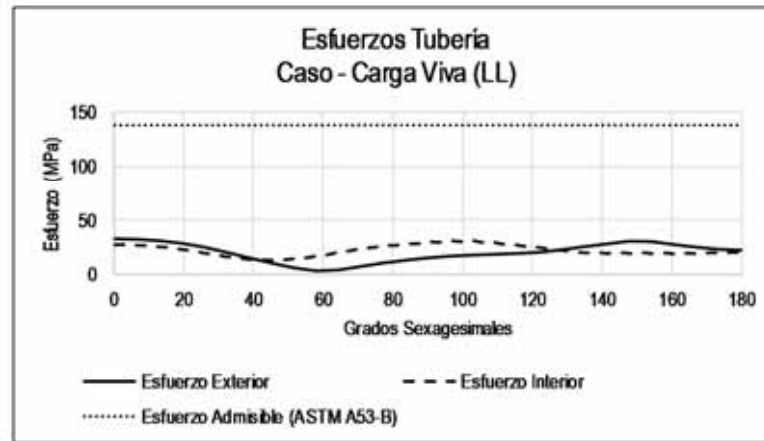
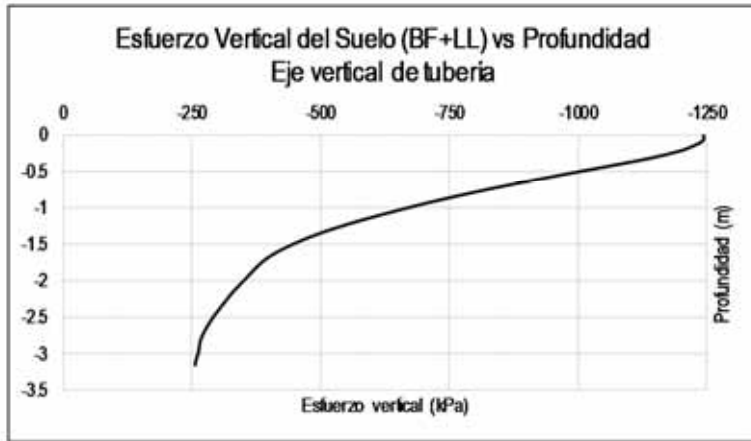


Figura A - 24: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

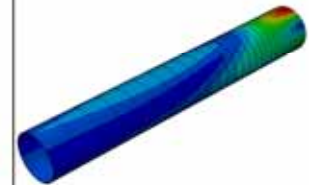
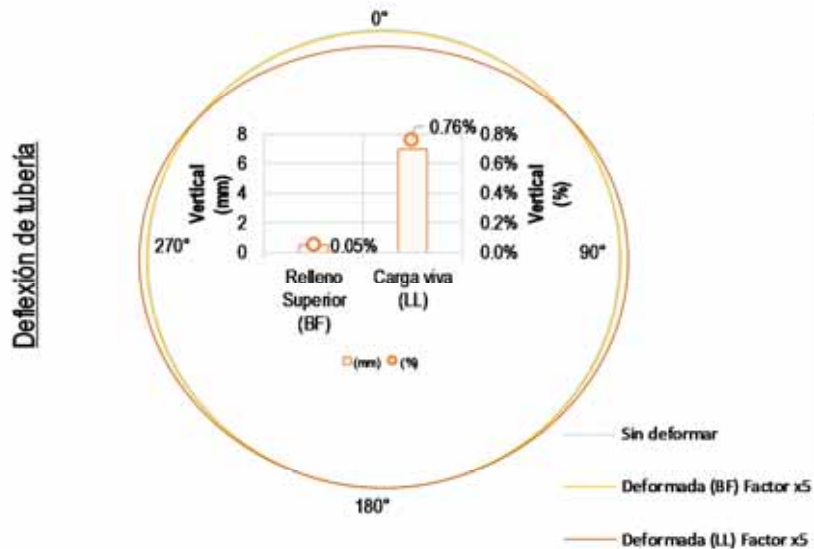
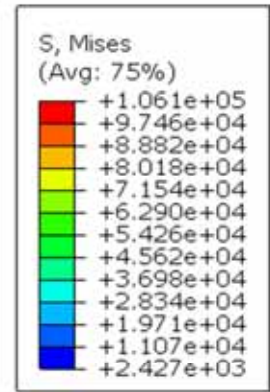
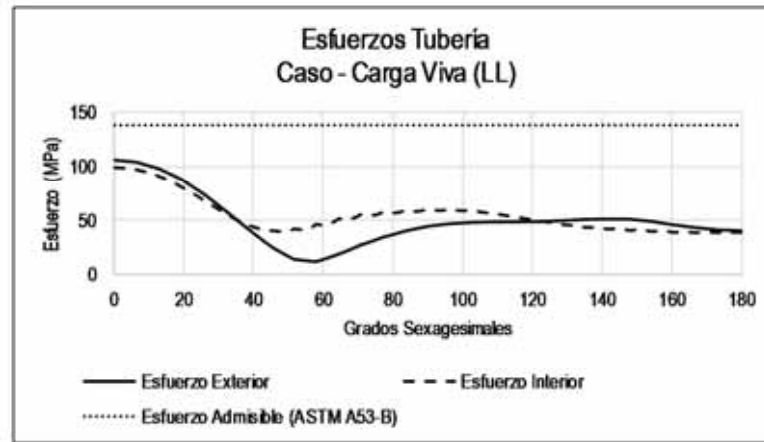
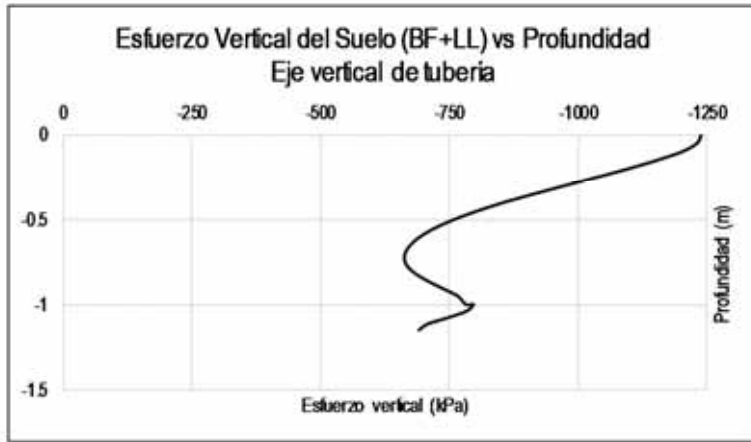


Figura A - 25: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

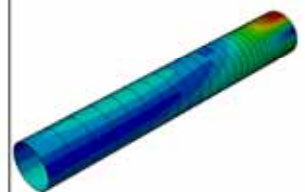
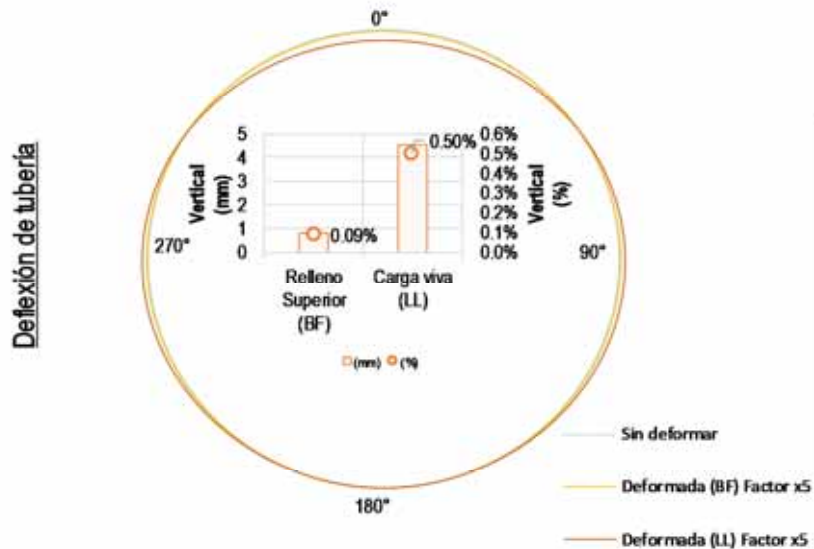
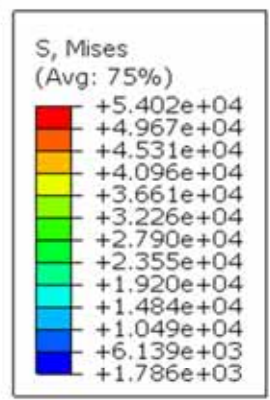
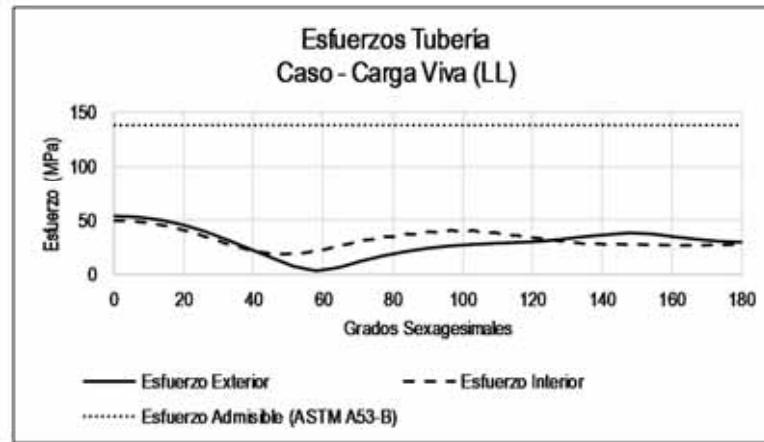


Figura A - 26: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

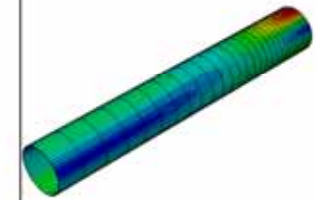
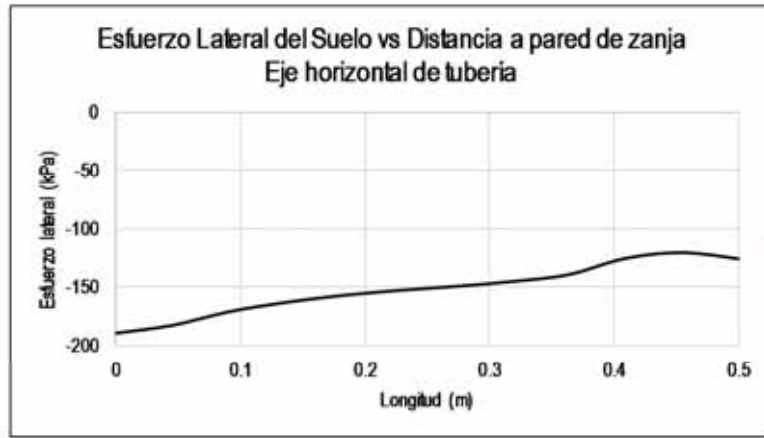
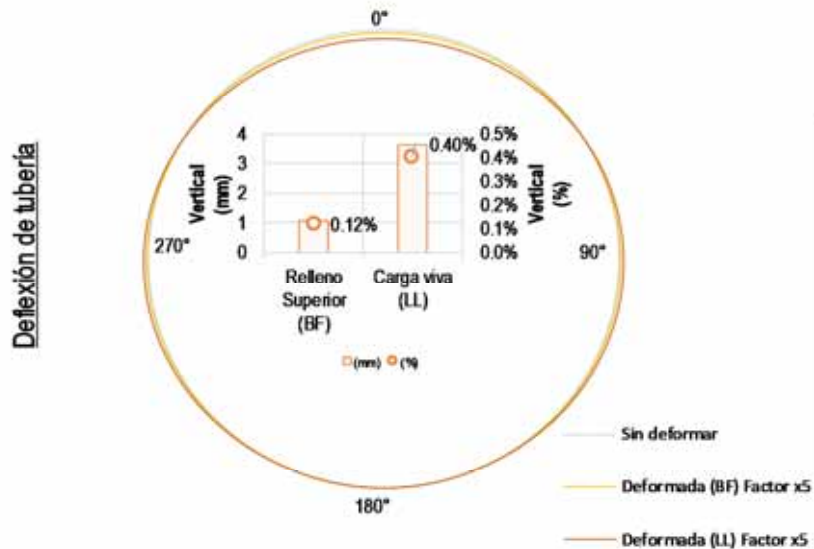
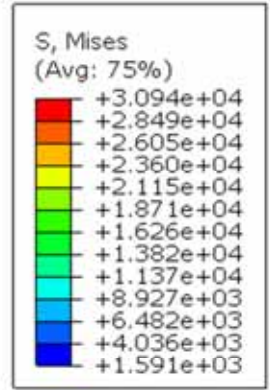
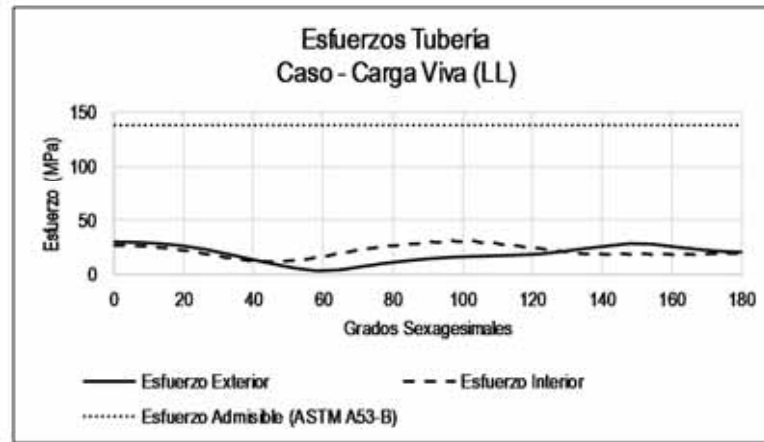


Figura A - 27: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM1-W(36"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

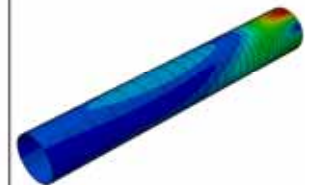
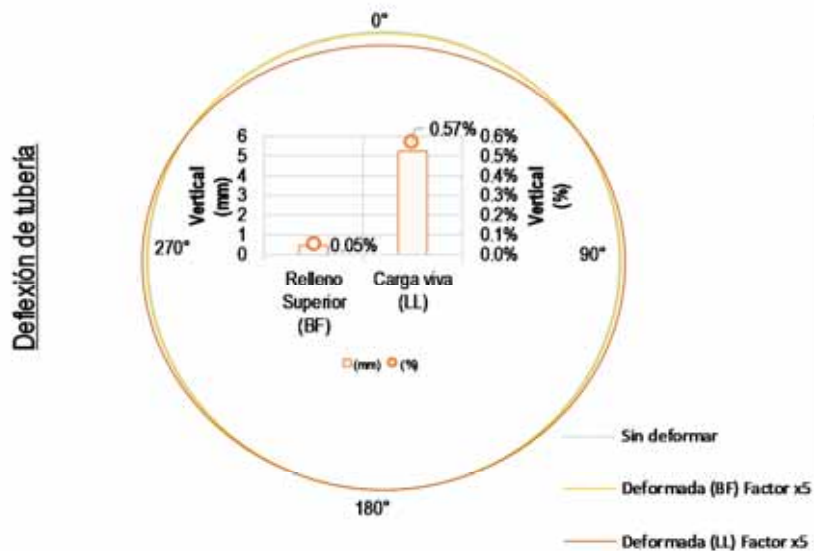
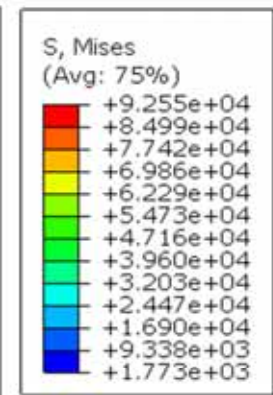
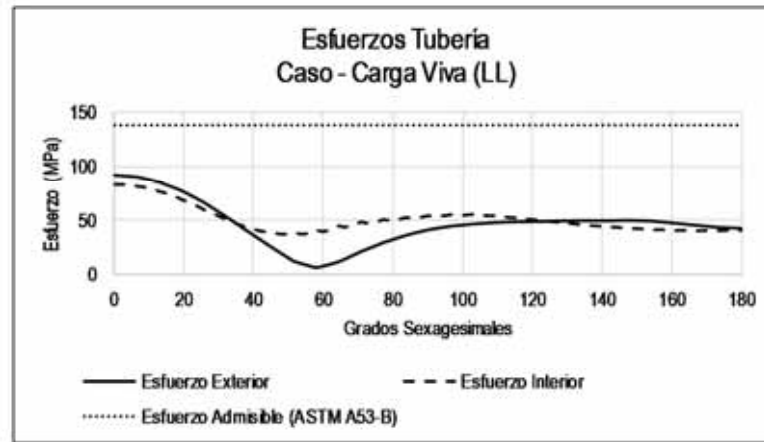
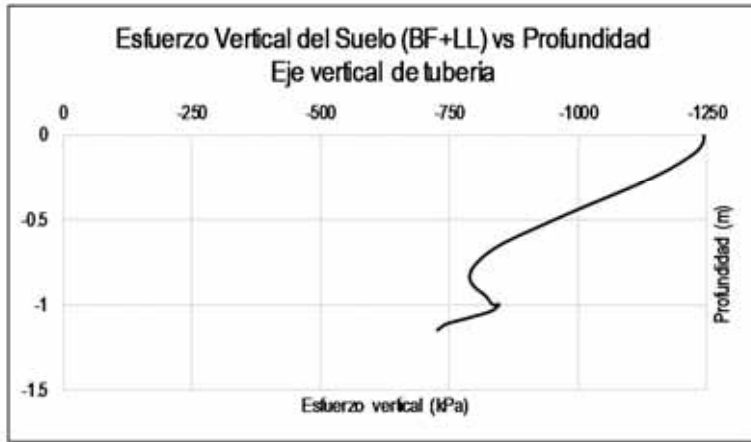


Figura A - 28: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

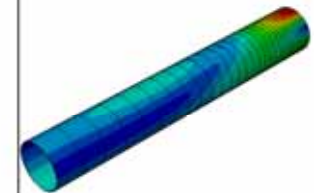
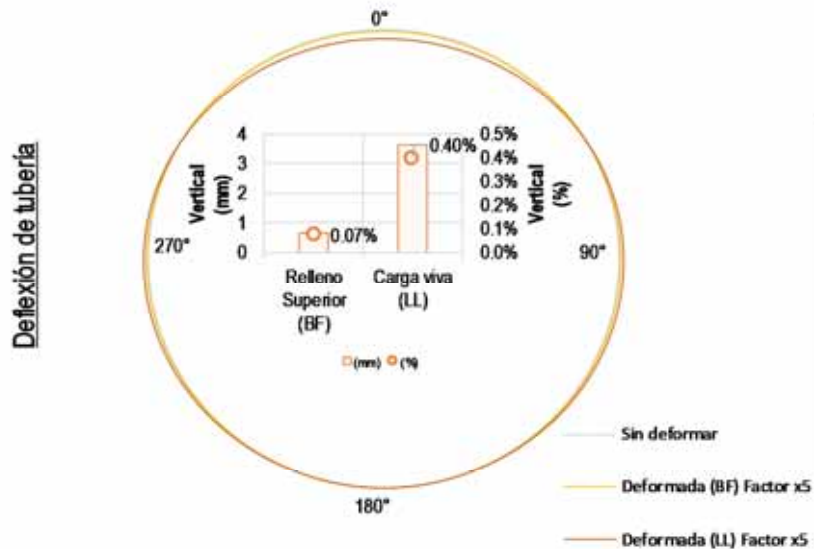
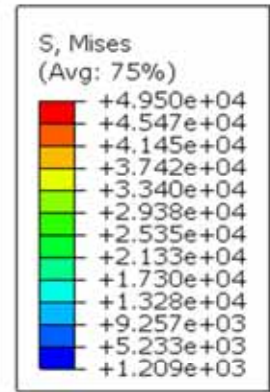
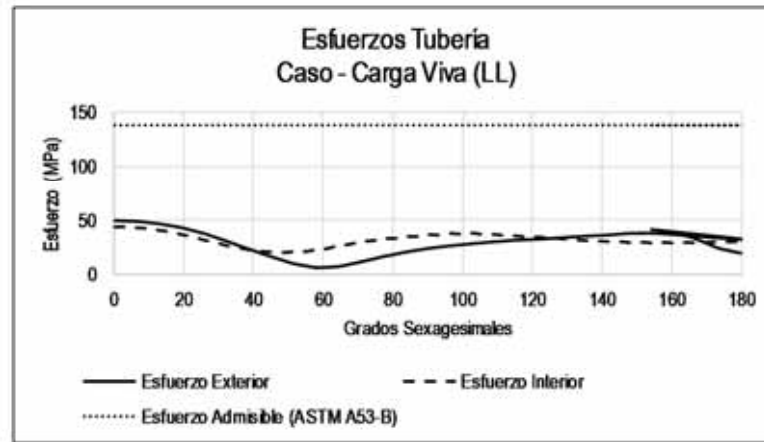
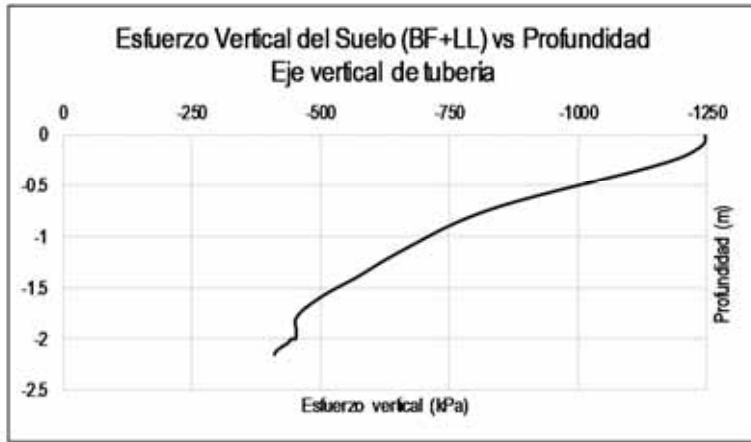


Figura A - 29: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

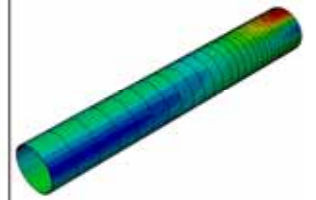
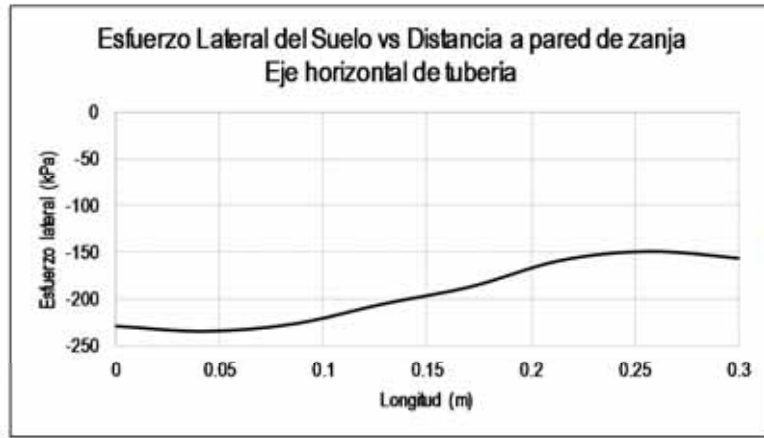
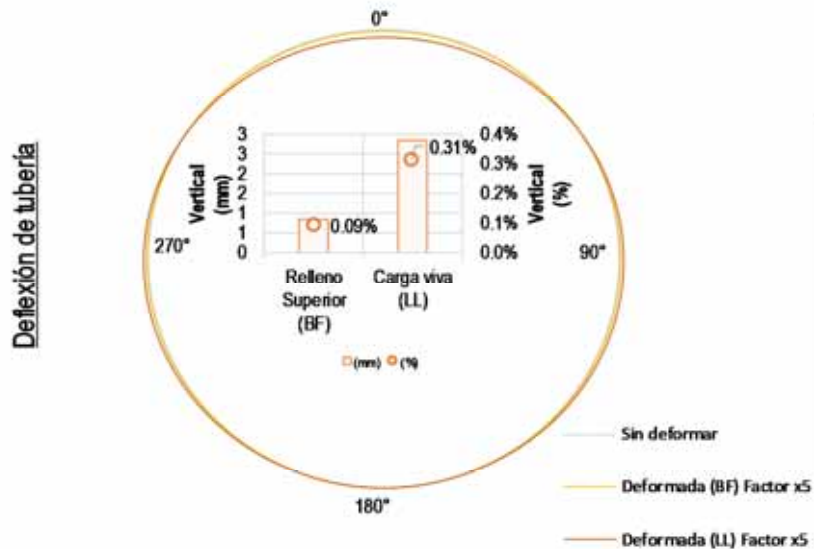
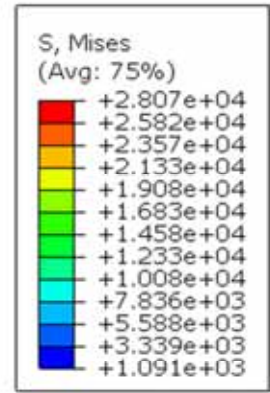
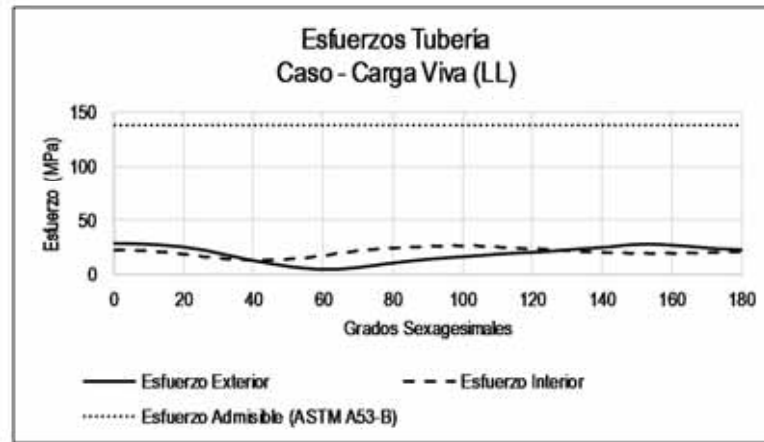


Figura A - 30: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

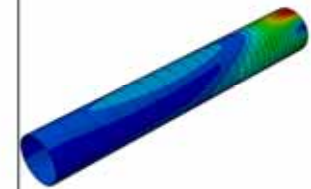
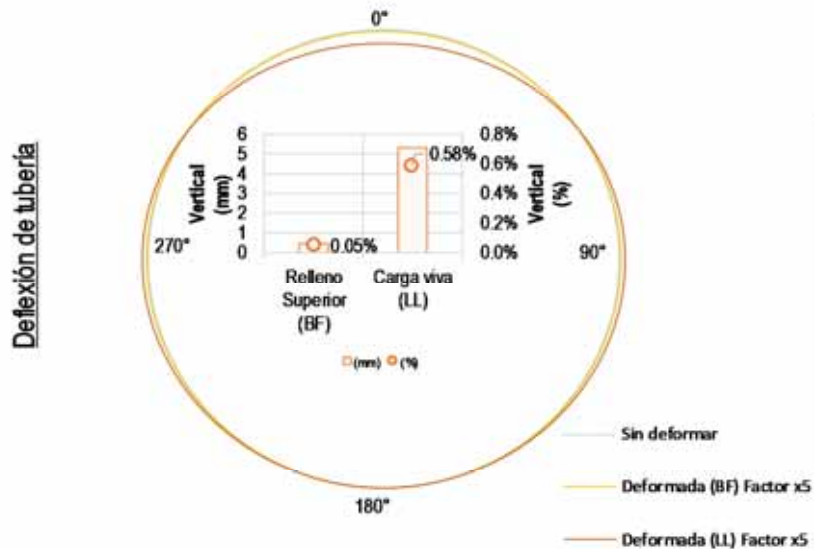
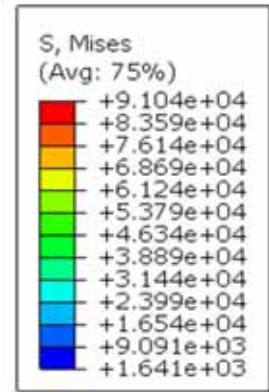
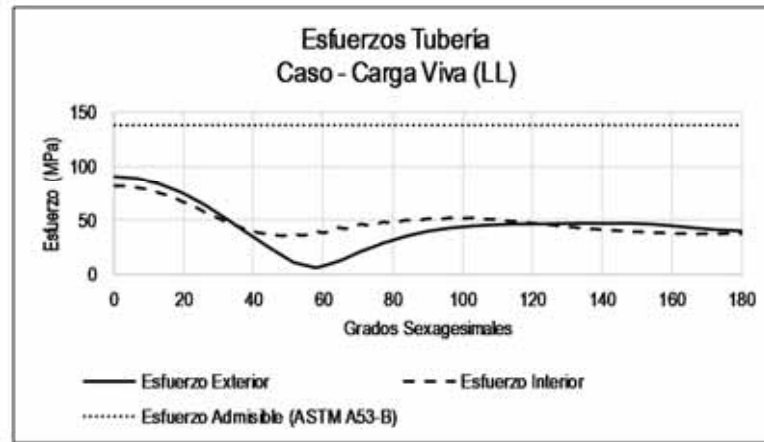
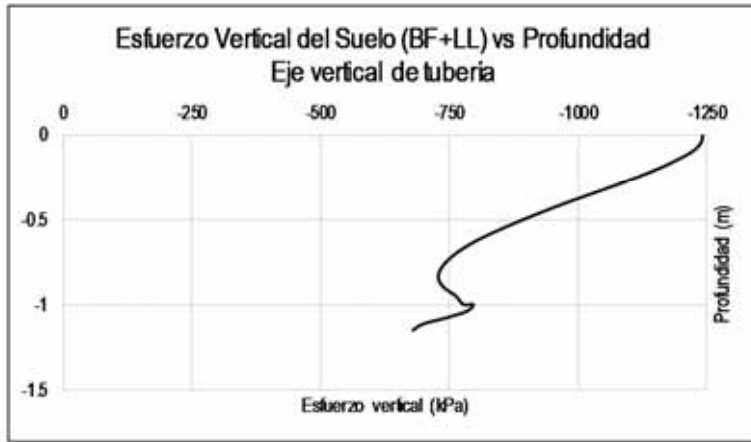


Figura A - 31: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

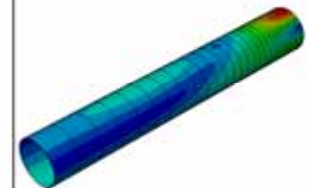
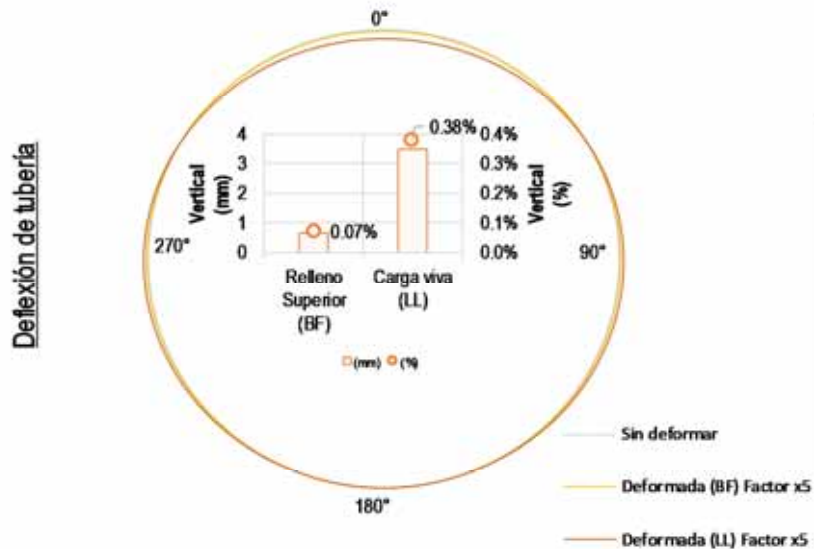
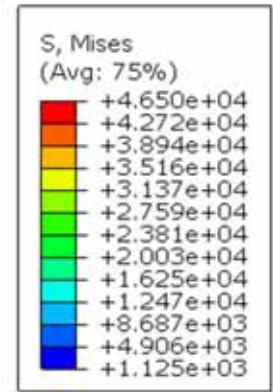
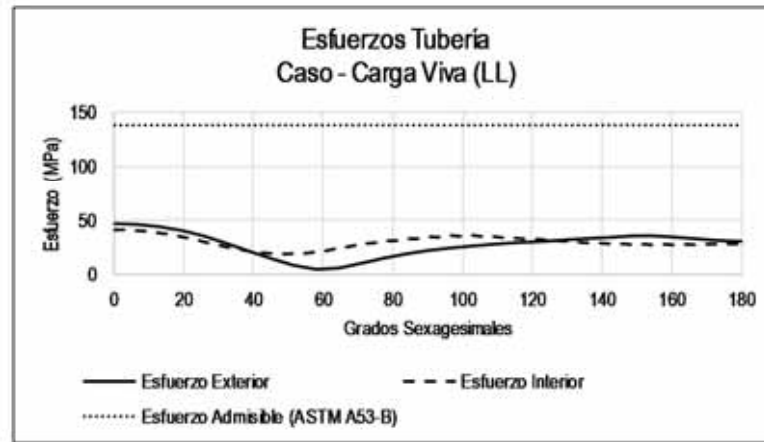


Figura A - 32: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

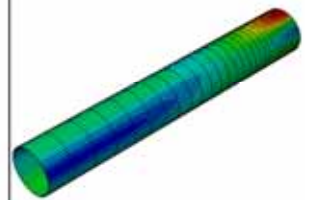
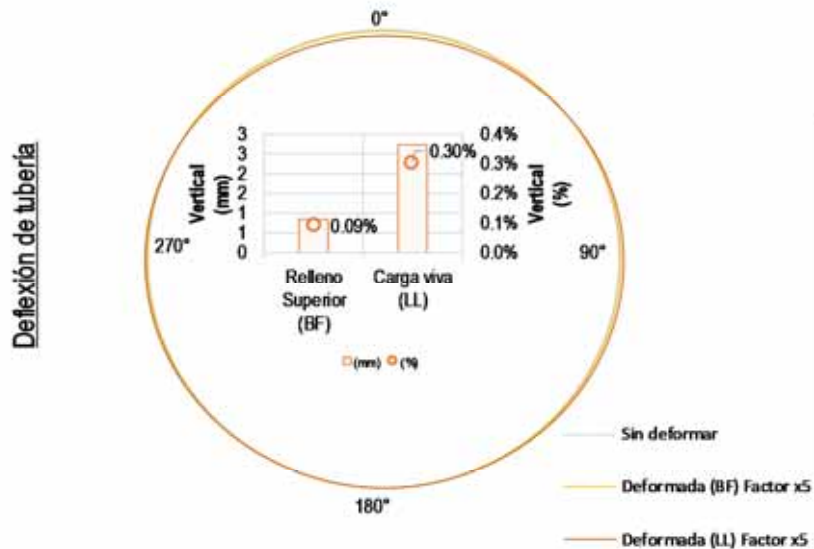
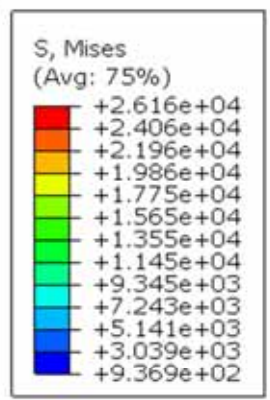
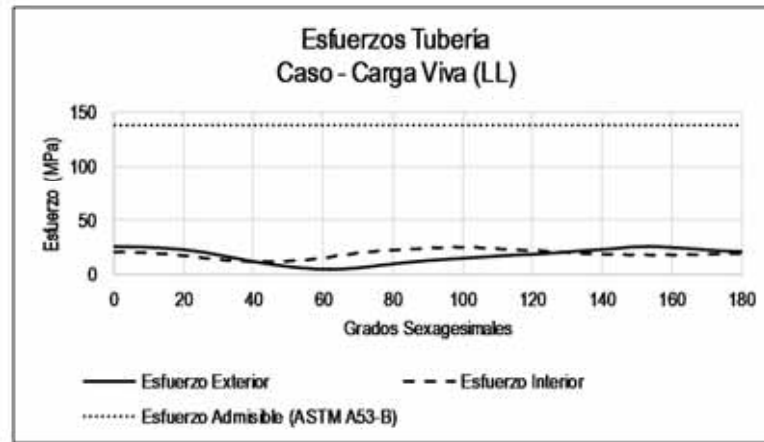


Figura A - 33: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

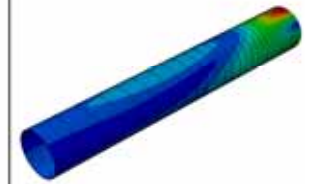
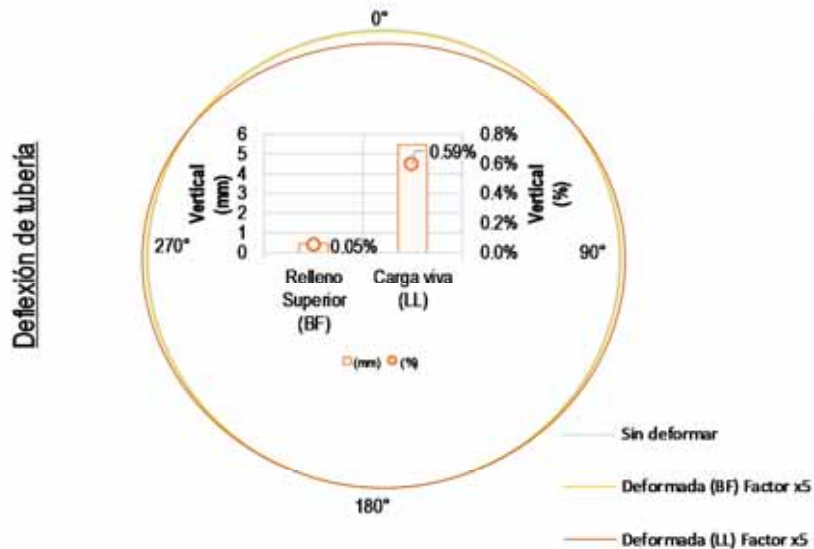
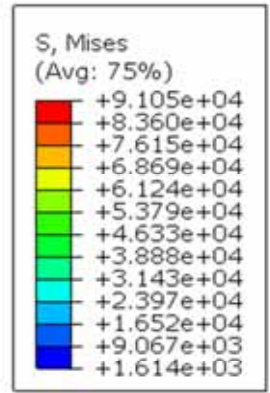
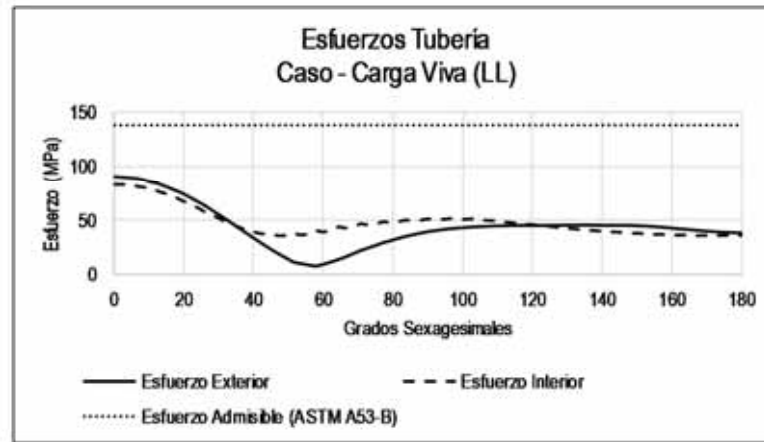
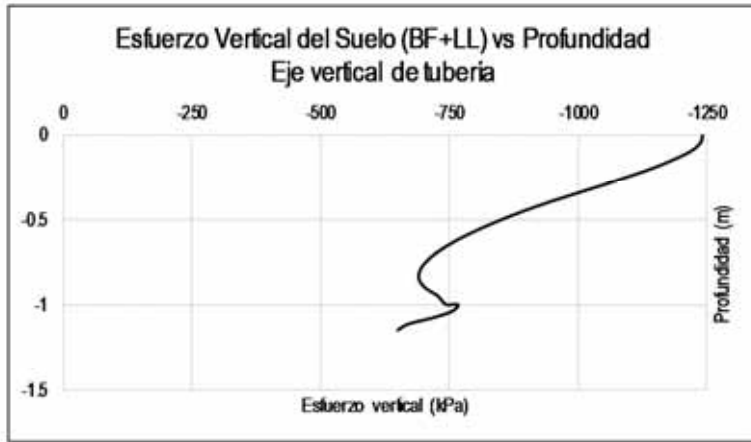


Figura A - 34: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

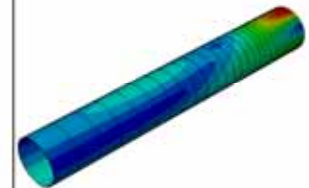
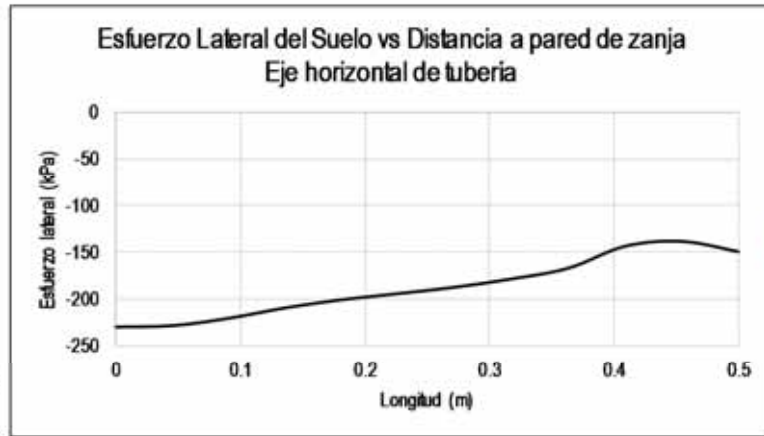
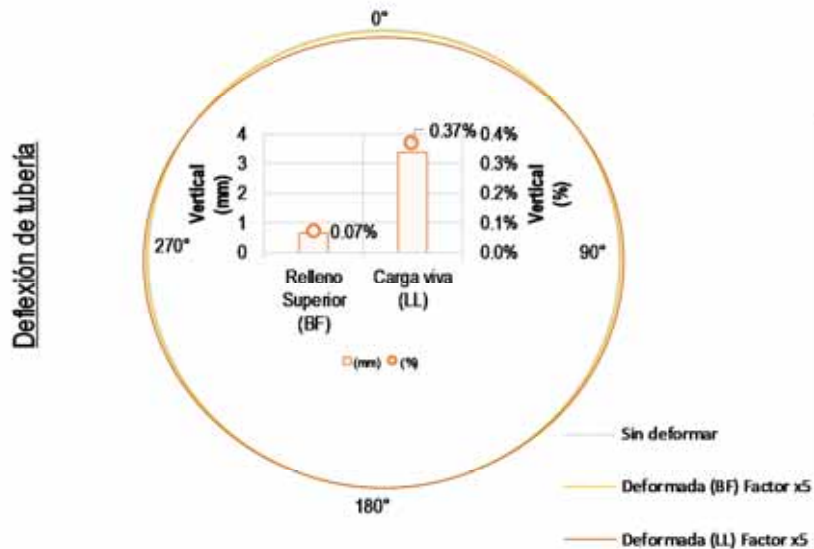
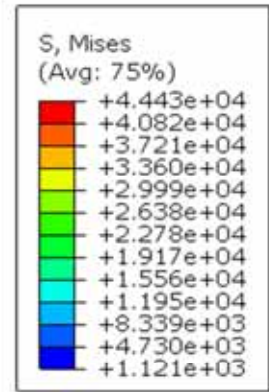
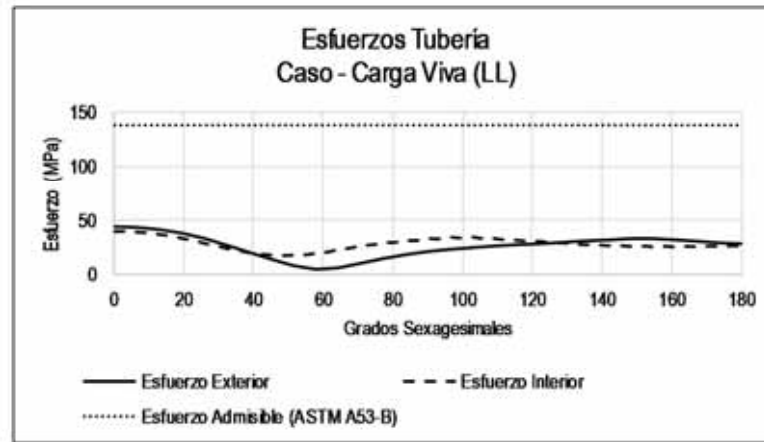


Figura A - 35: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

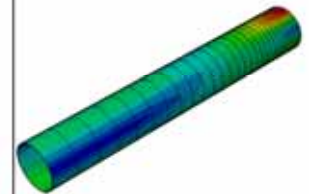
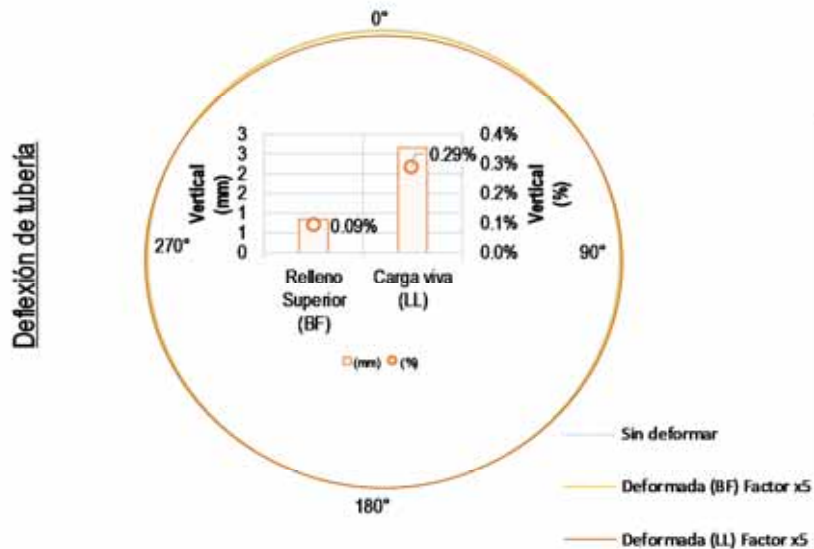
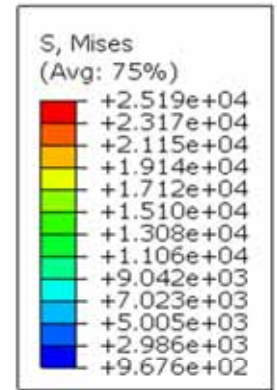
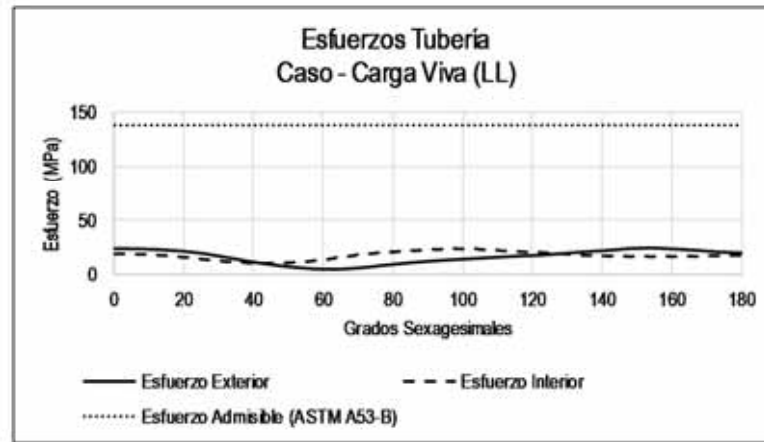


Figura A - 36: T(36"STD)-B(0.15m+1/12x36")-EM2-W(36"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

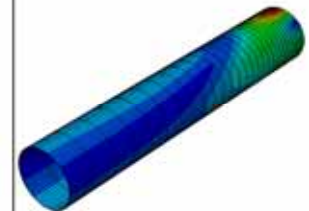
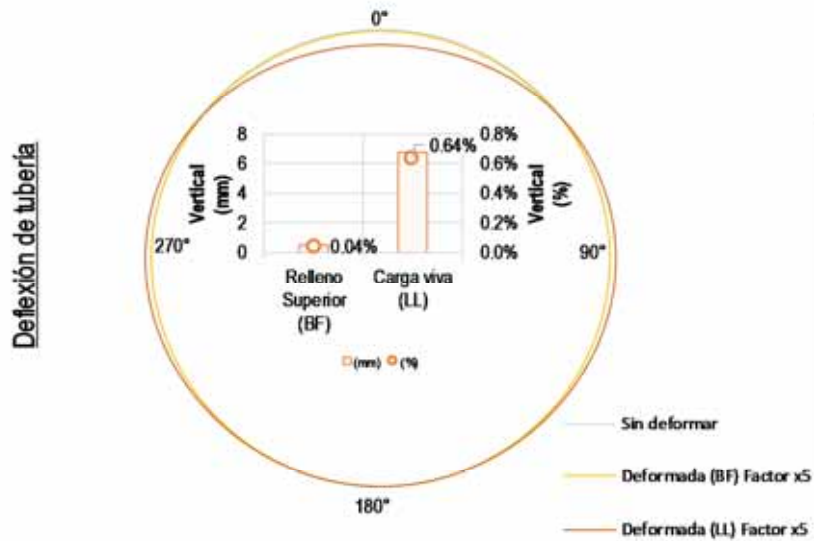
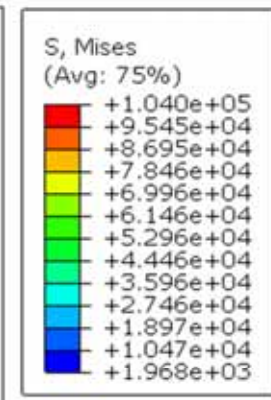
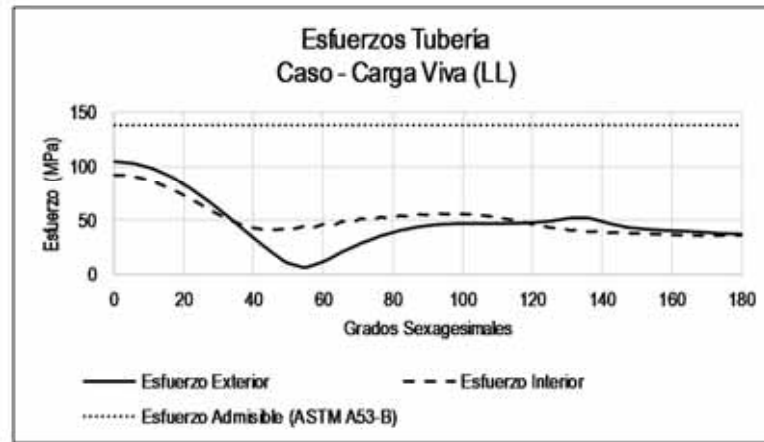
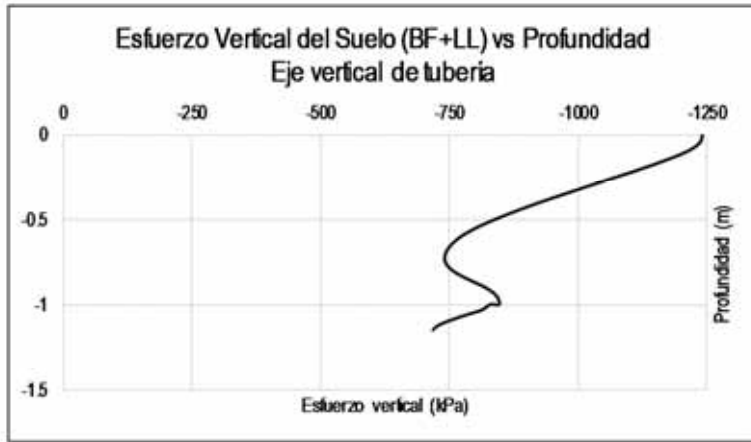


Figura A - 37: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM1-W(42"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

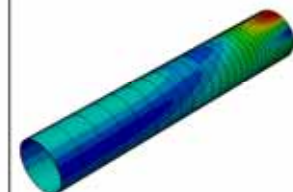
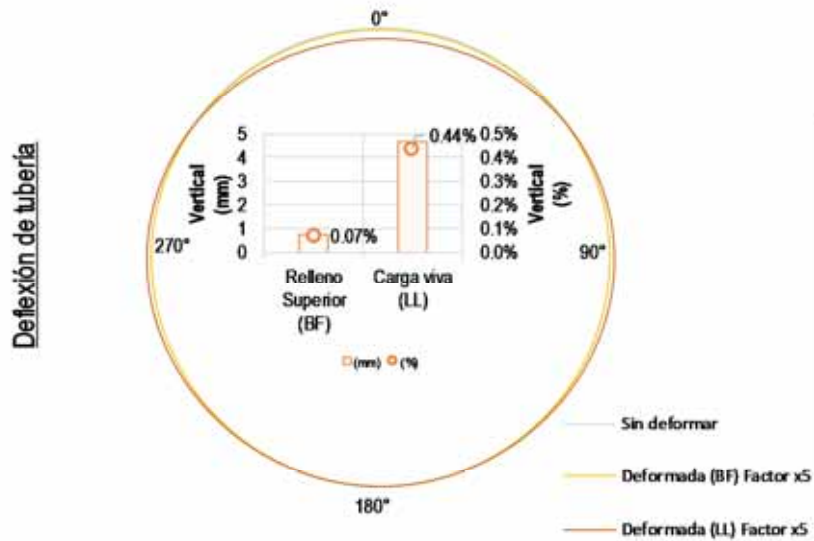
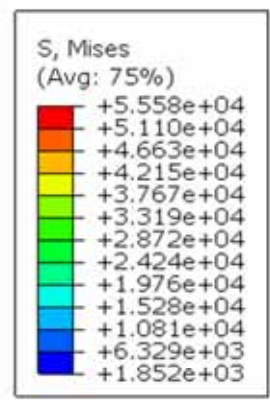
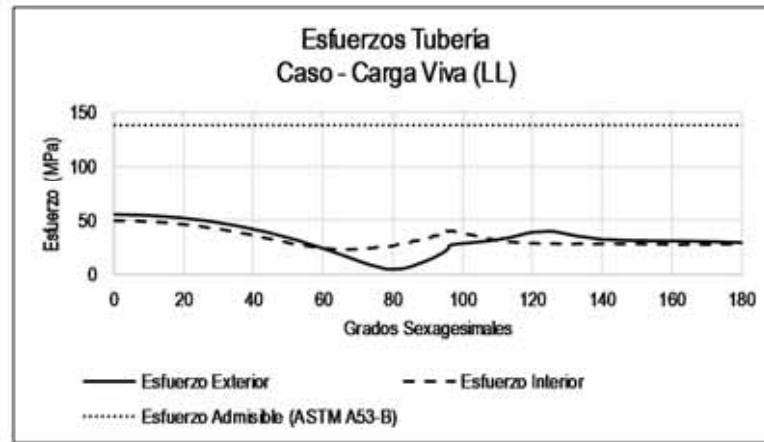


Figura A - 38: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM1-W(42"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

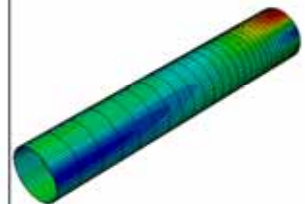
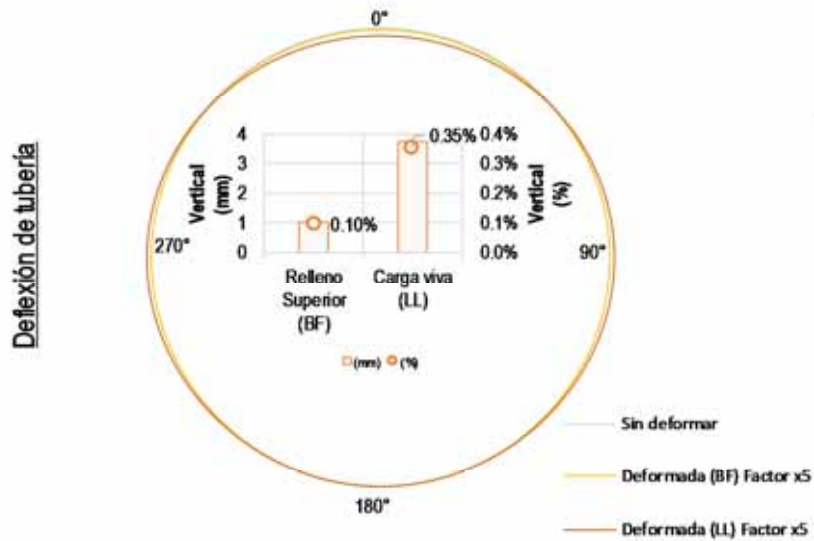
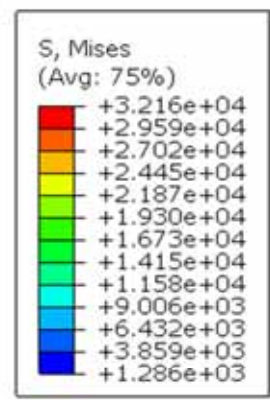
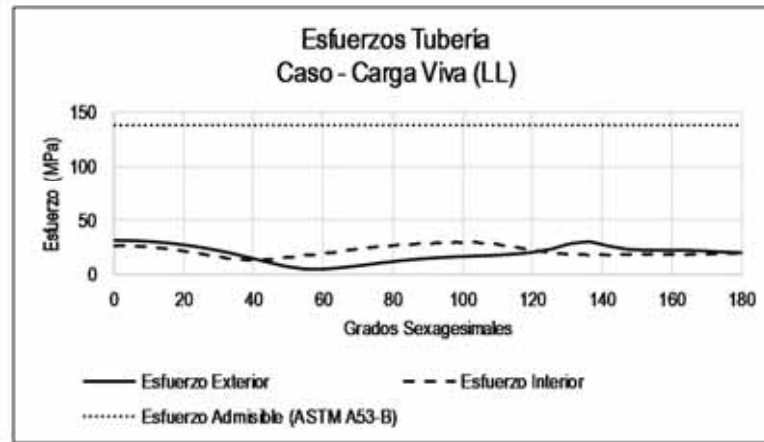


Figura A - 39: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM1-W(42"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

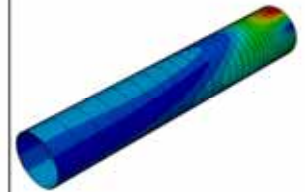
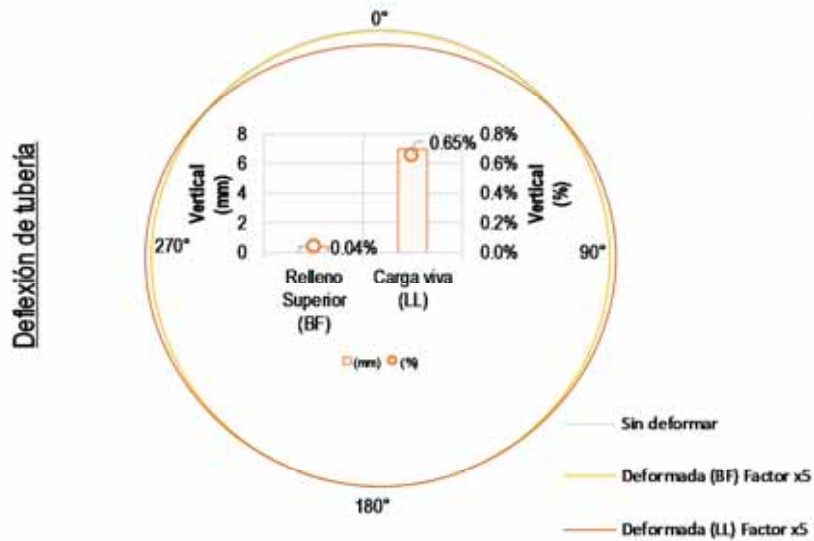
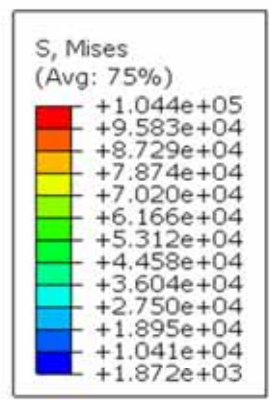
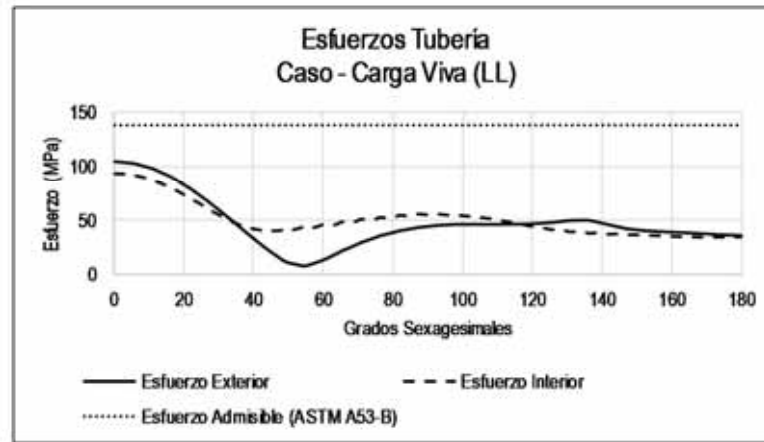
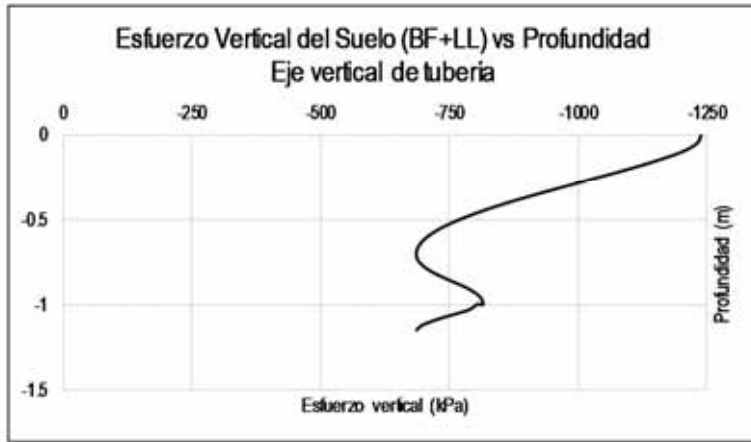


Figura A - 40: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM1-W(42"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

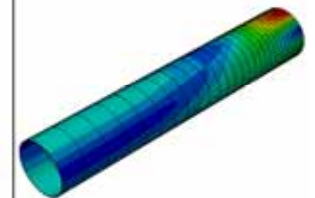
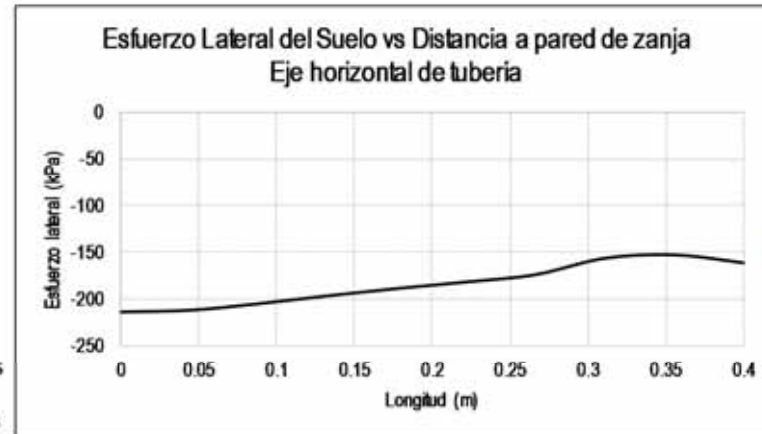
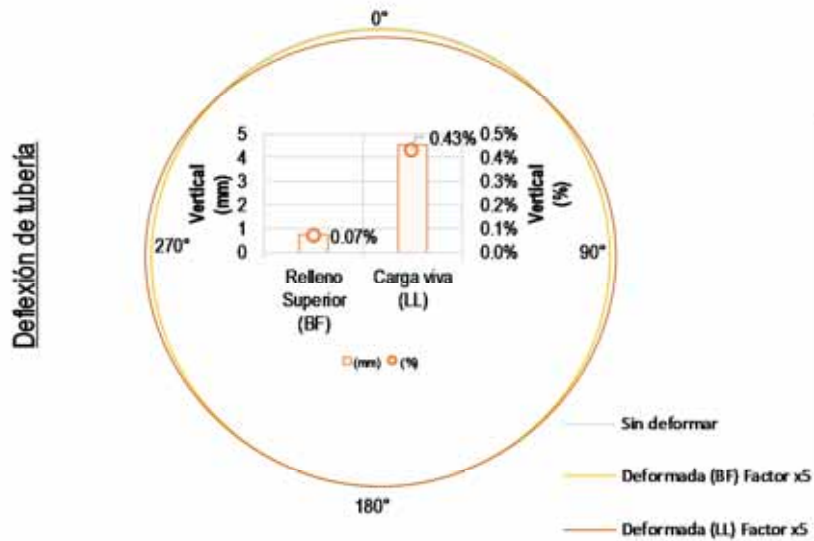
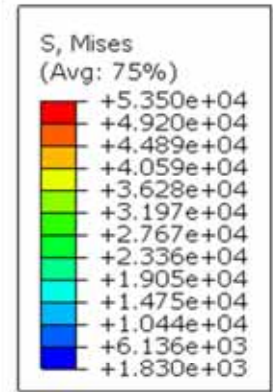
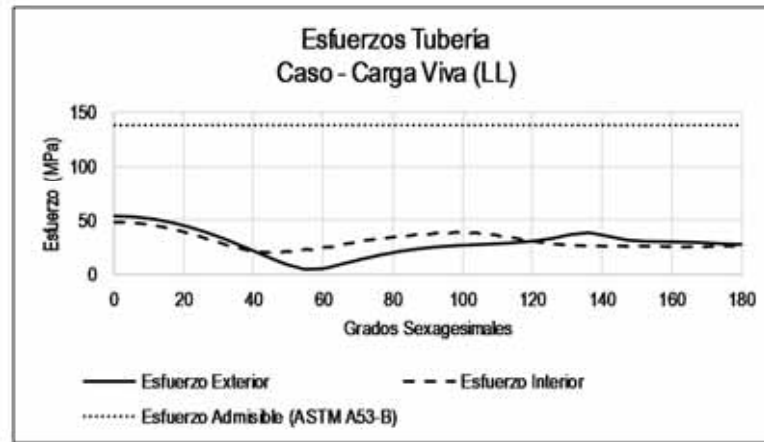


Figura A - 41: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM1-W(42"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

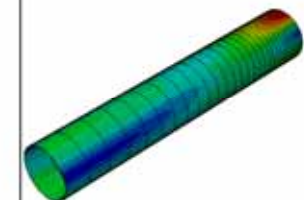
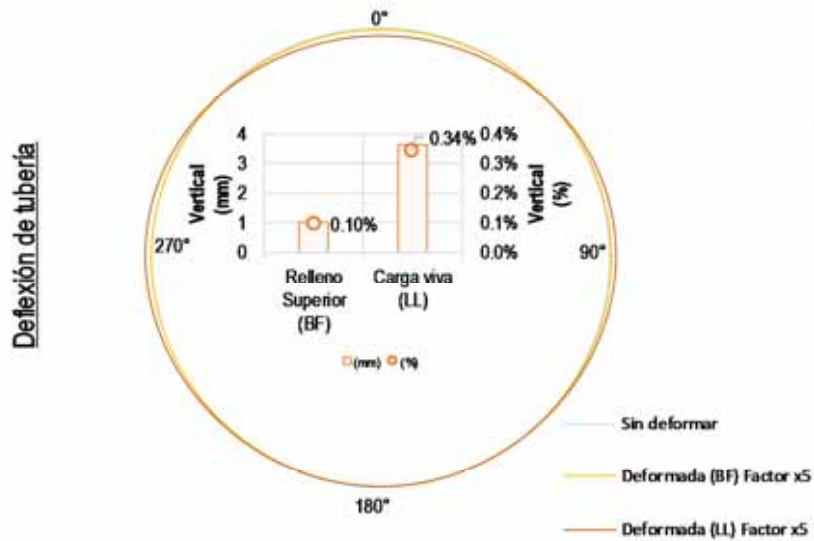
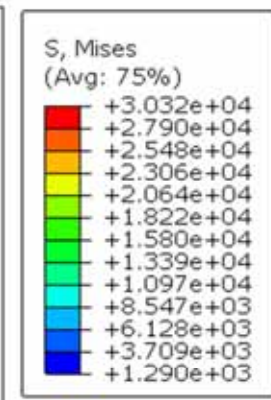
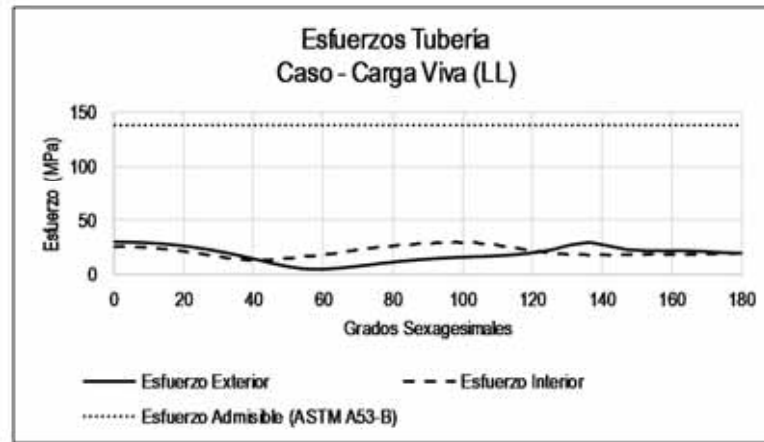


Figura A - 42: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM1-W(42"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

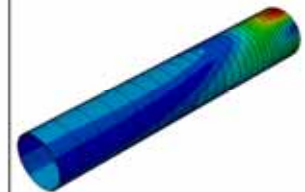
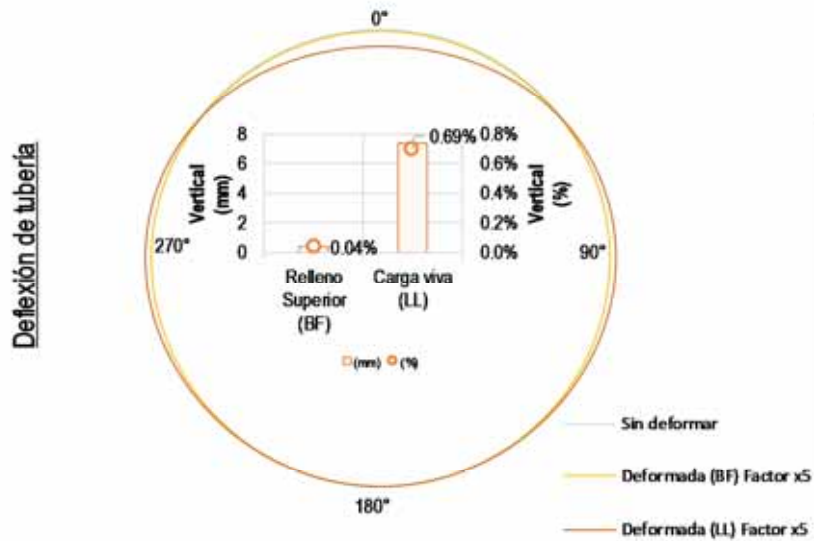
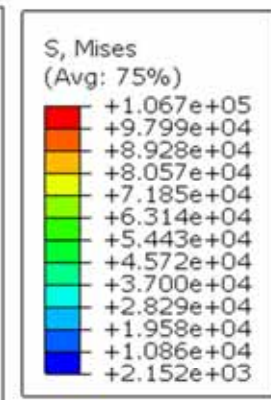
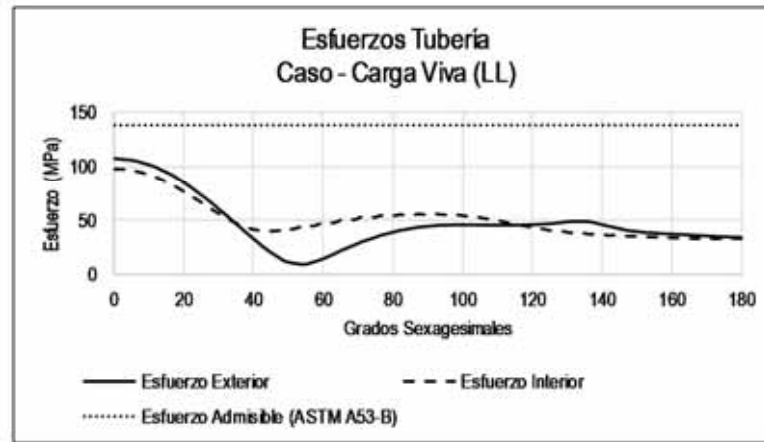
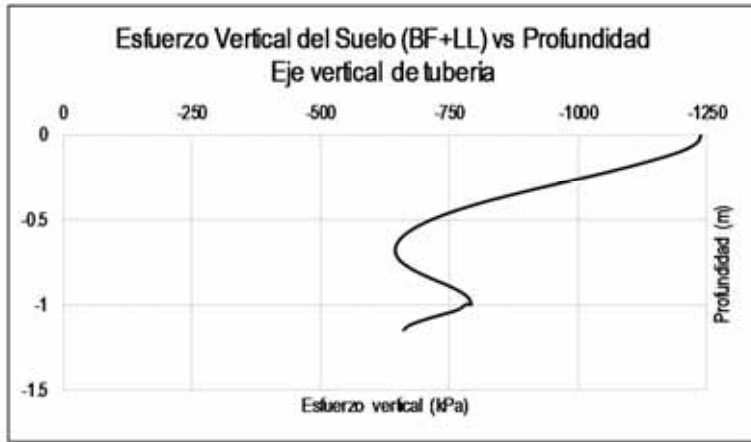


Figura A - 43: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM1-W(42"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

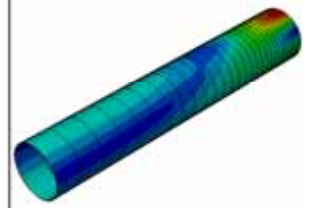
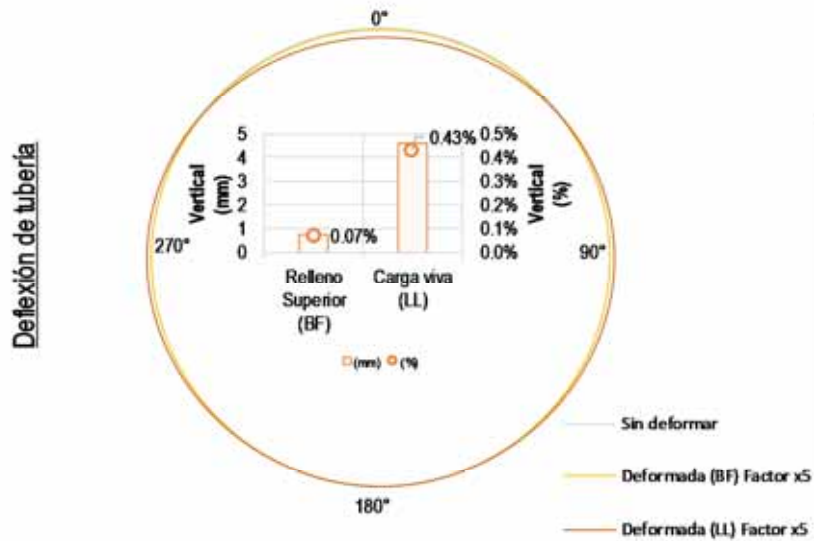
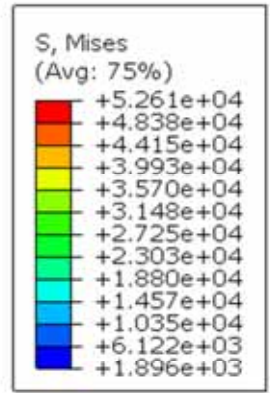
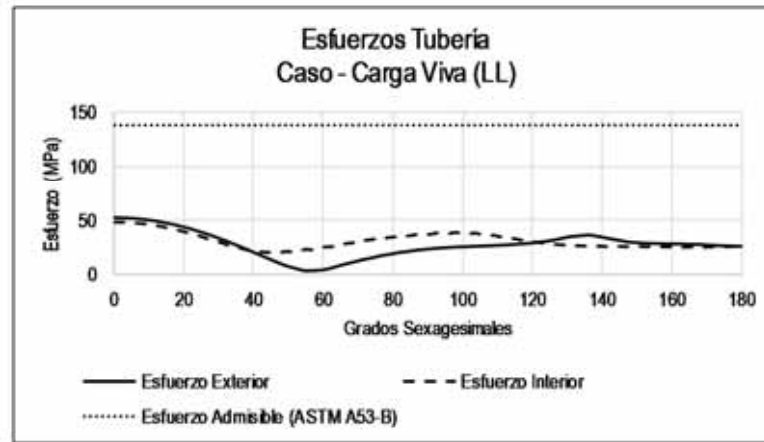


Figura A - 44: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM1-W(42"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

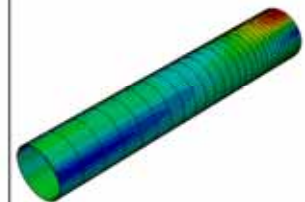
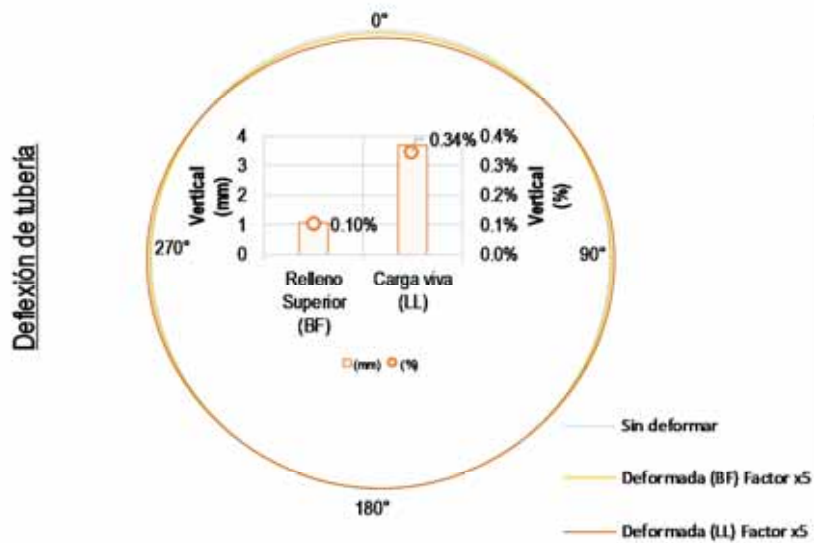
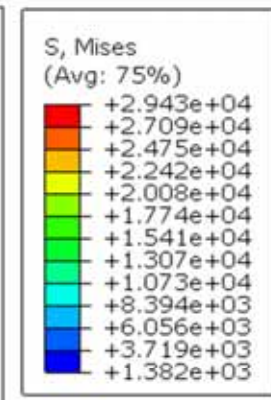
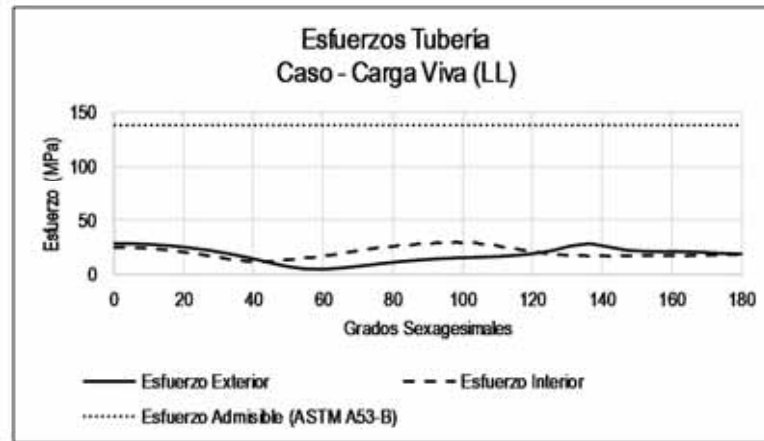
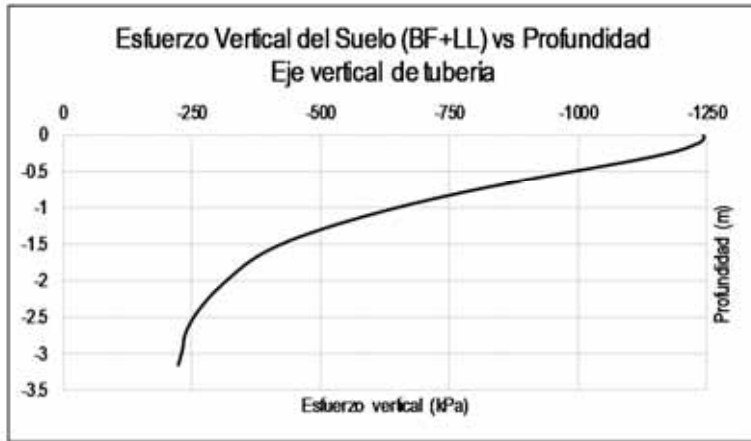


Figura A - 45: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM1-W(42"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

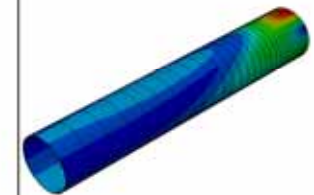
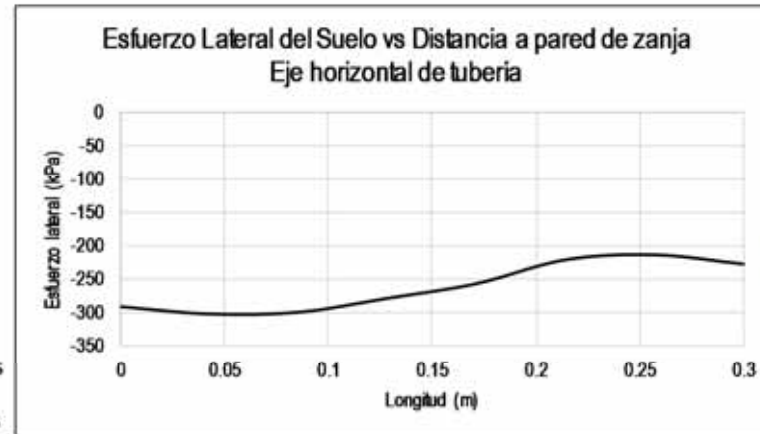
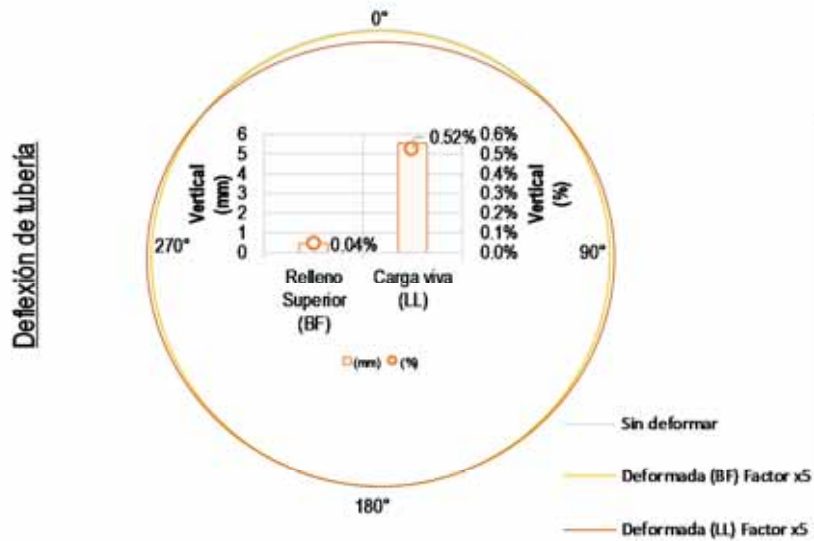
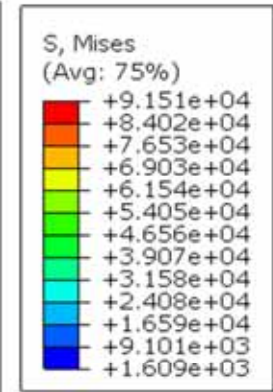
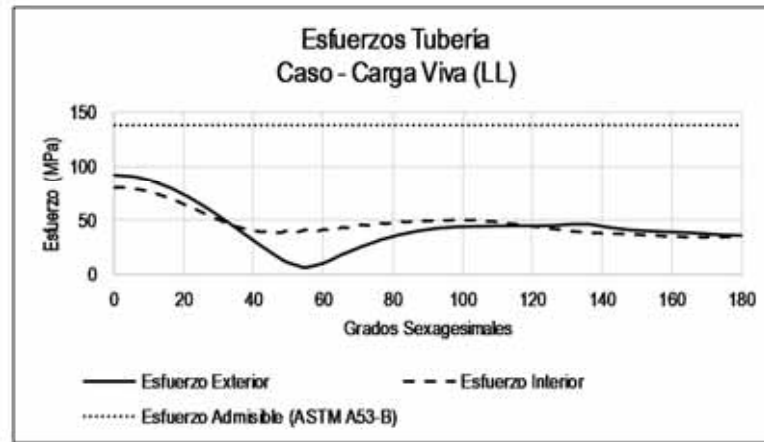
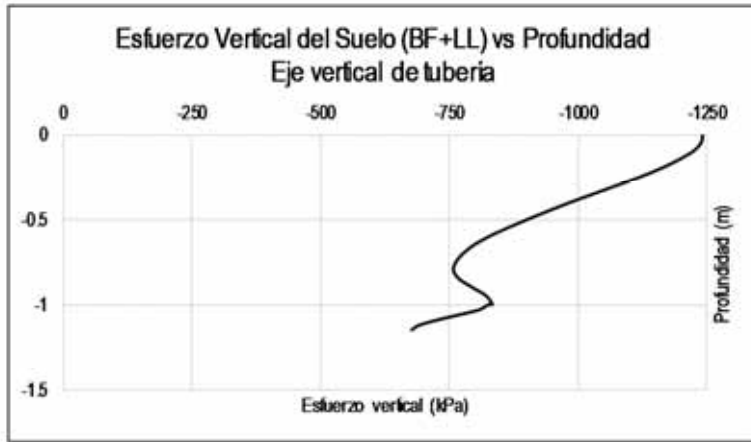


Figura A - 46: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM2-W(42"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

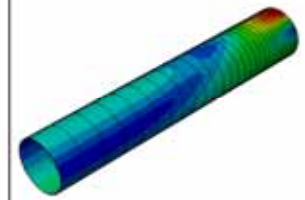
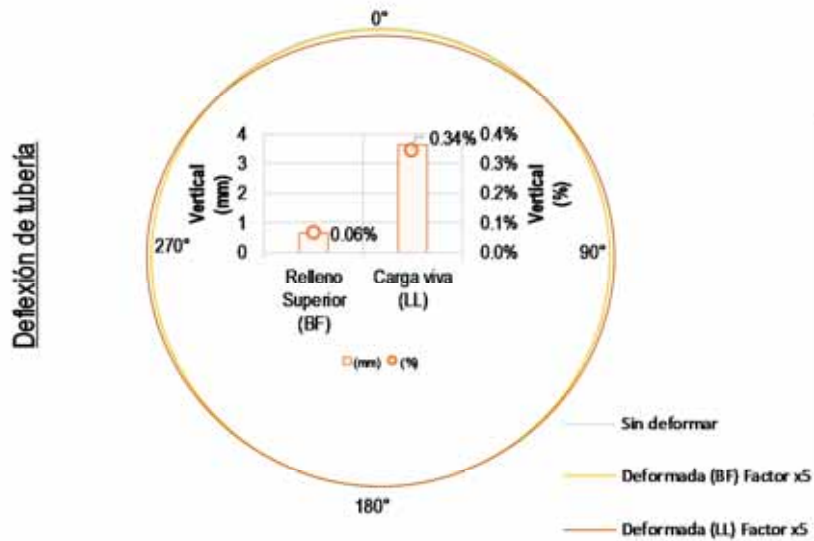
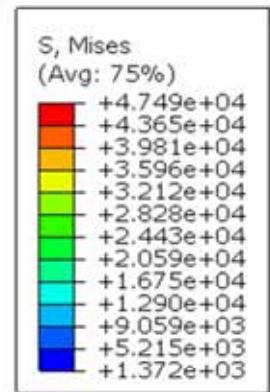
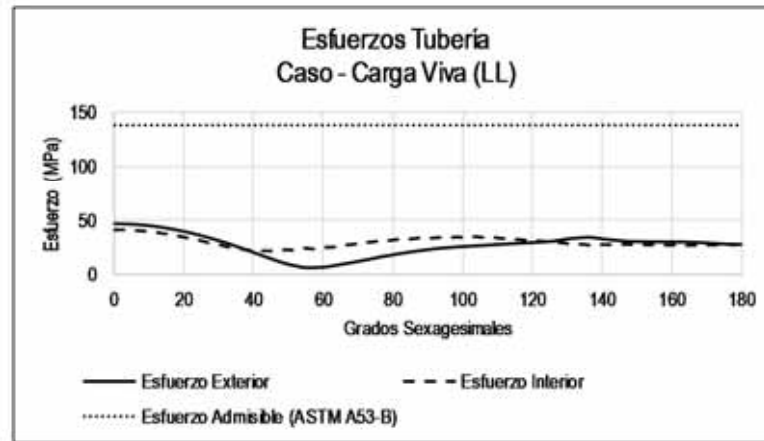
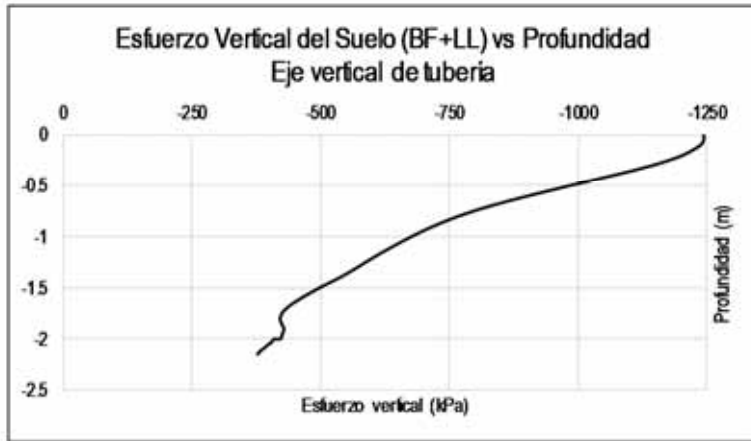


Figura A - 47: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM2-W(42"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

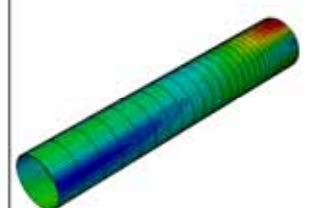
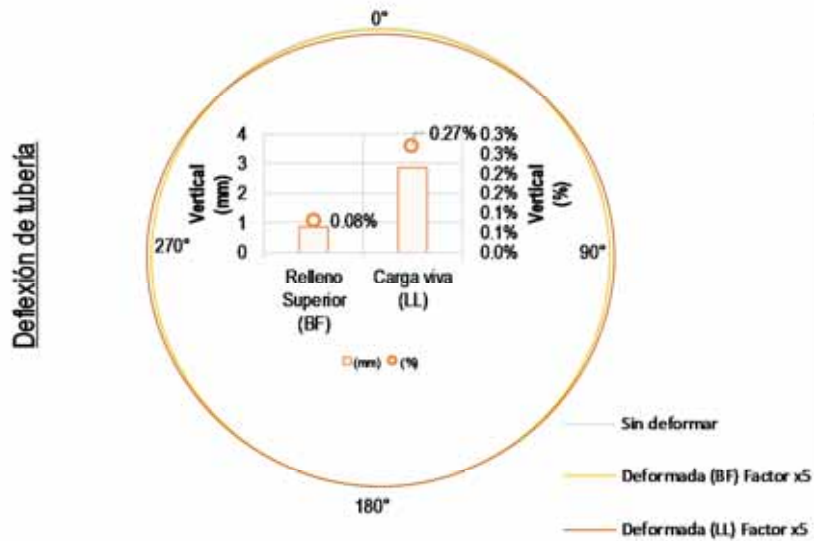
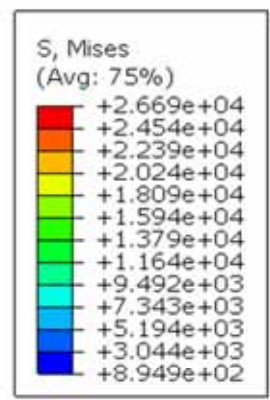
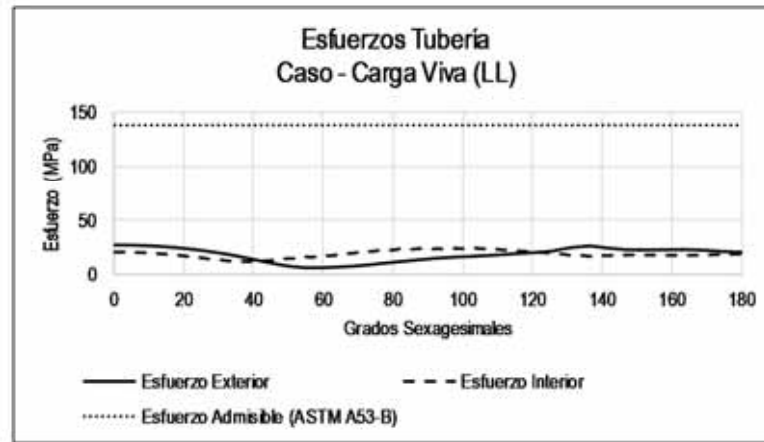


Figura A - 48: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM2-W(42"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

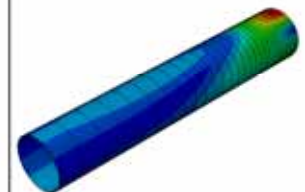
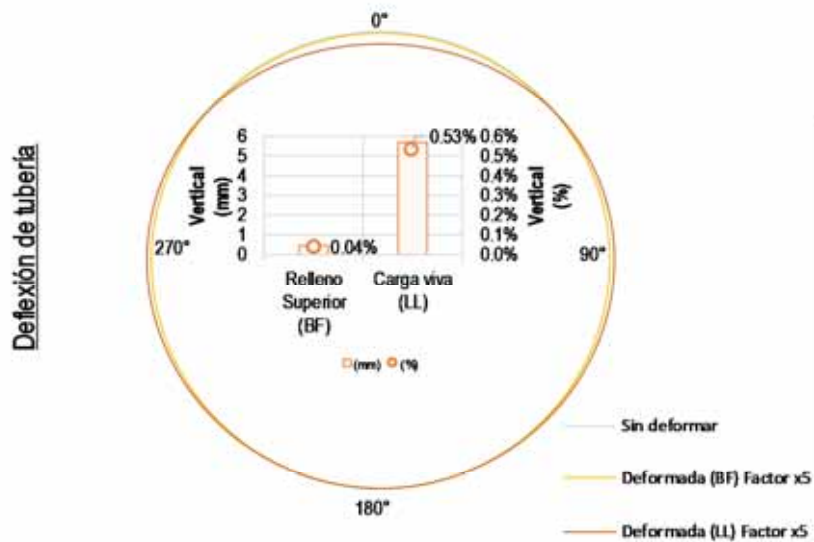
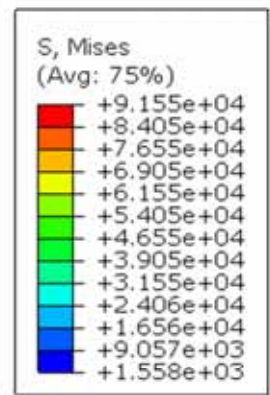
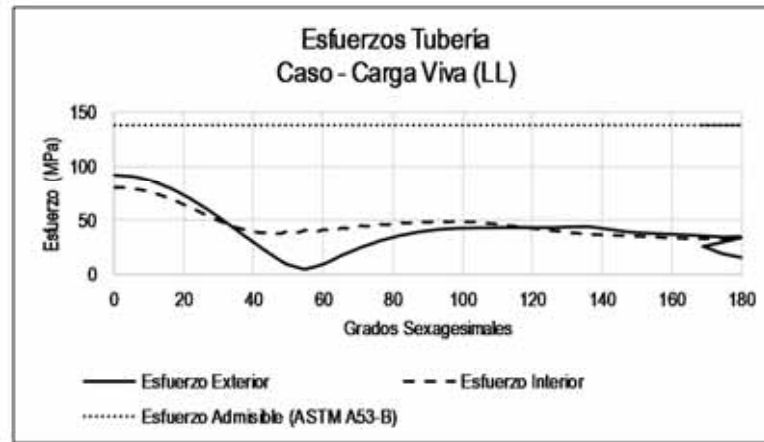
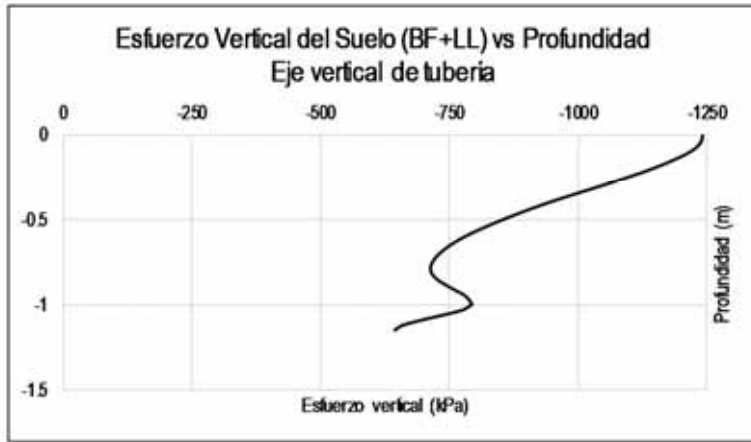


Figura A - 49: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM2-W(42"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

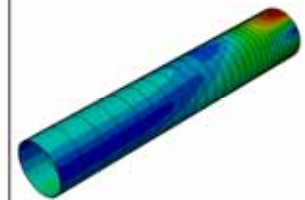
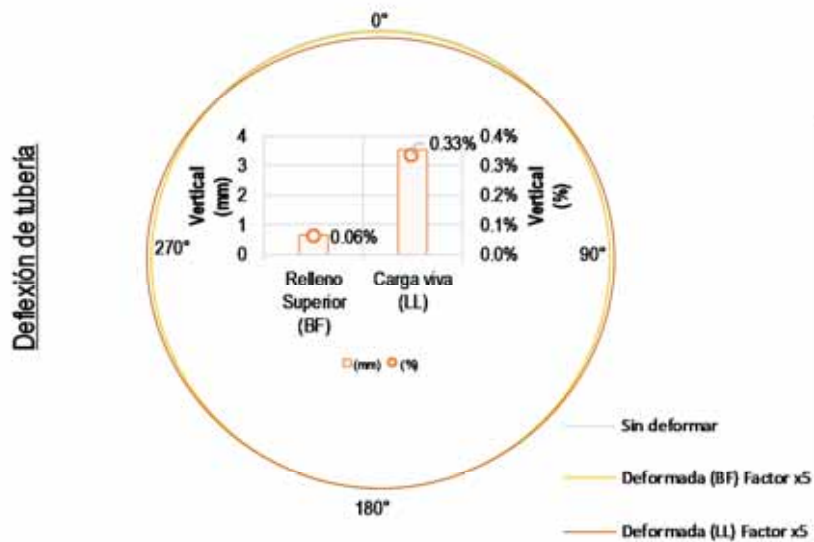
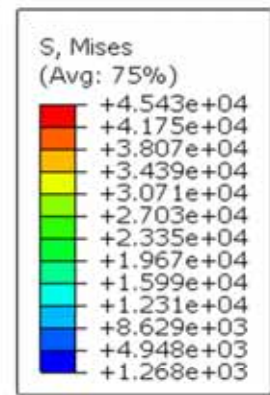
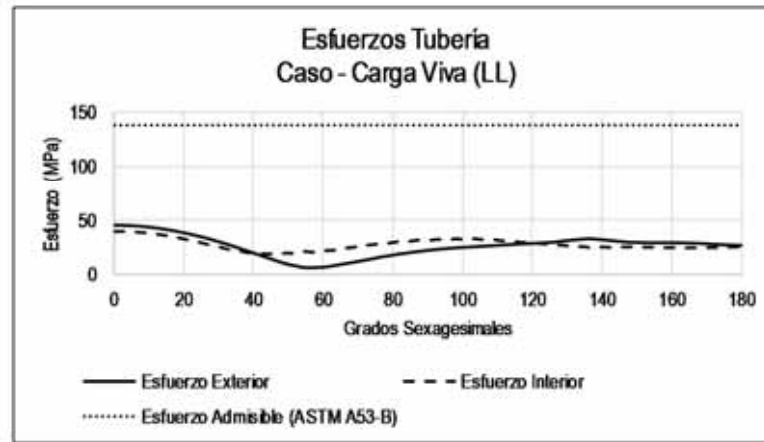


Figura A - 50: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM2-W(42"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

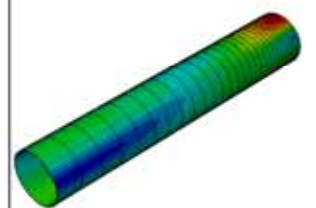
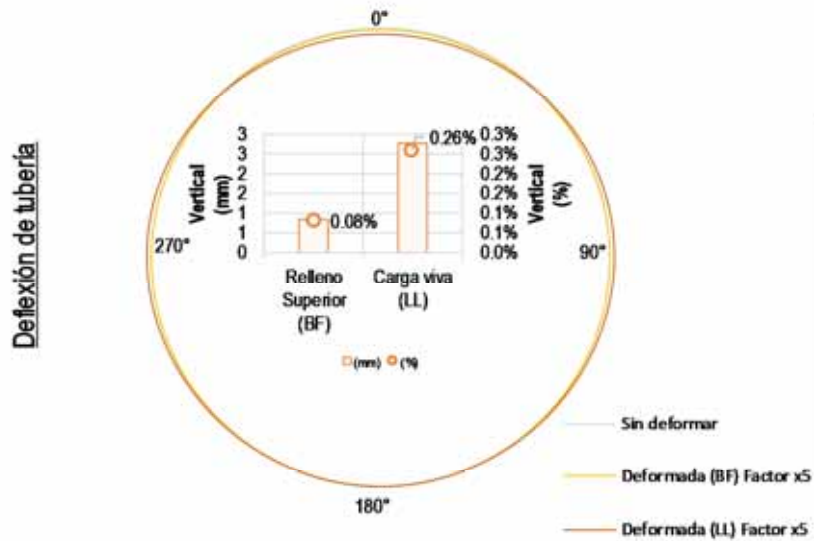
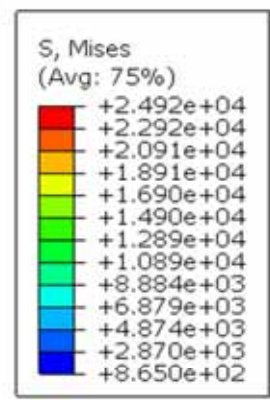
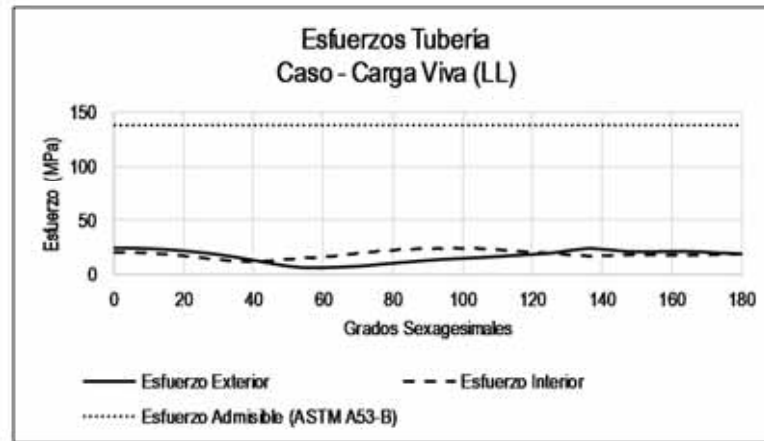
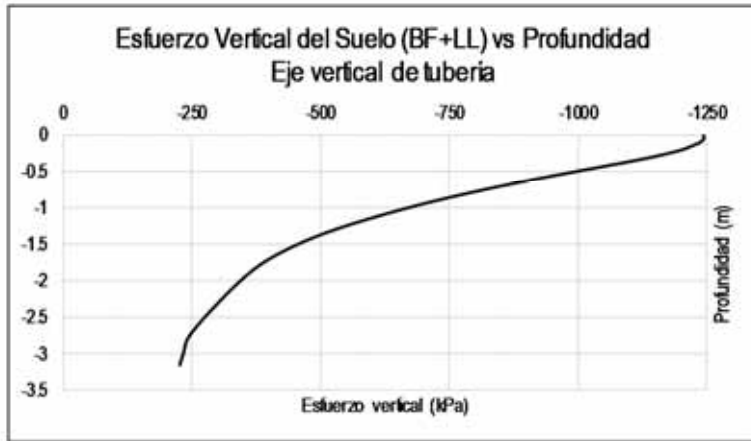


Figura A - 51: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM2-W(42"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

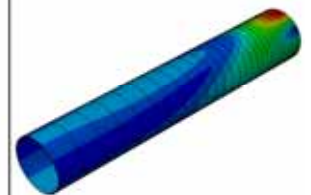
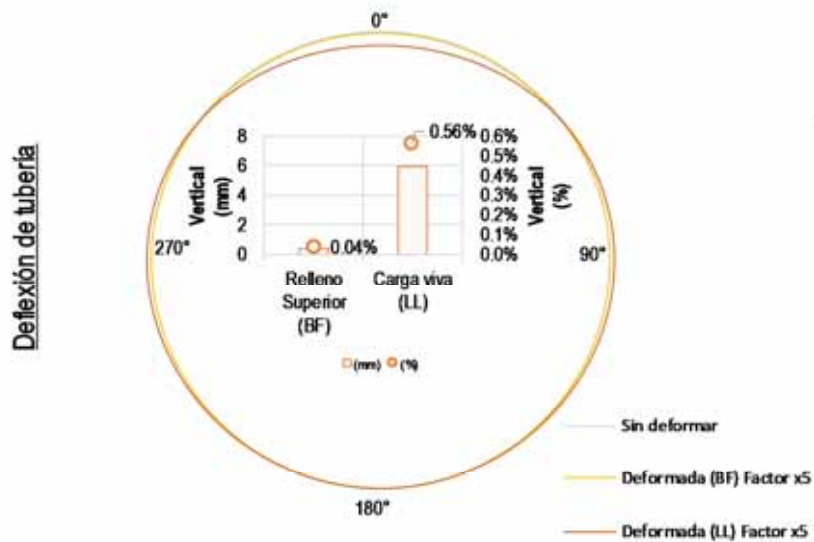
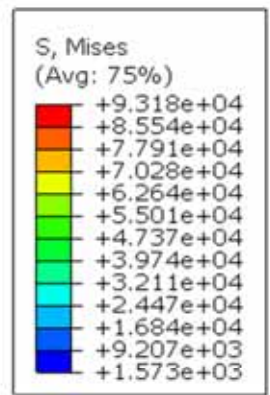
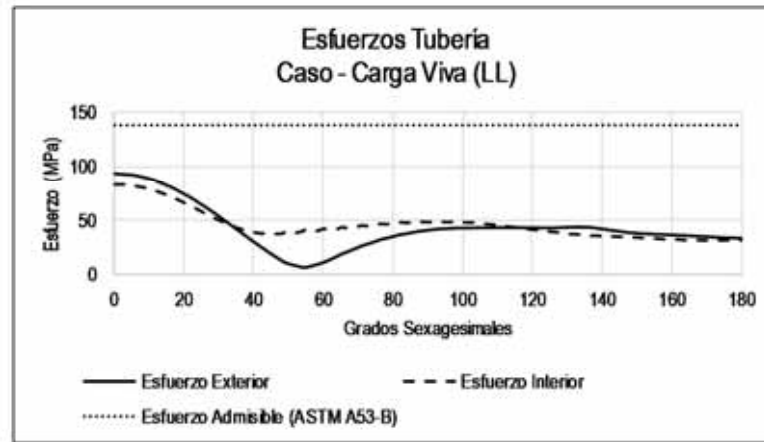
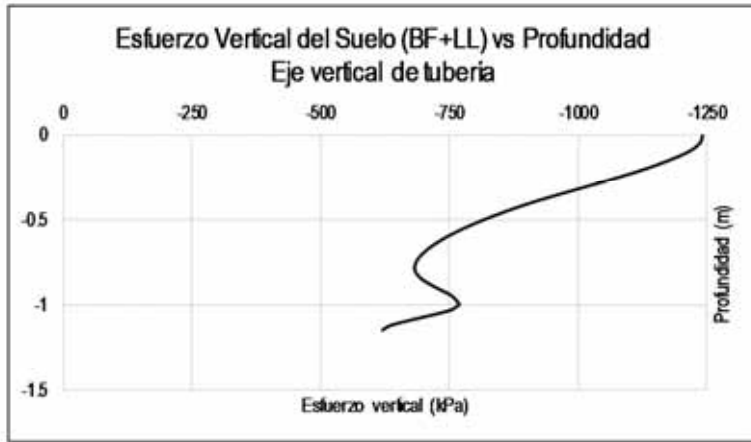


Figura A - 52: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM2-W(42"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

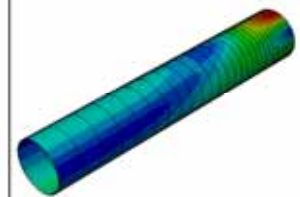
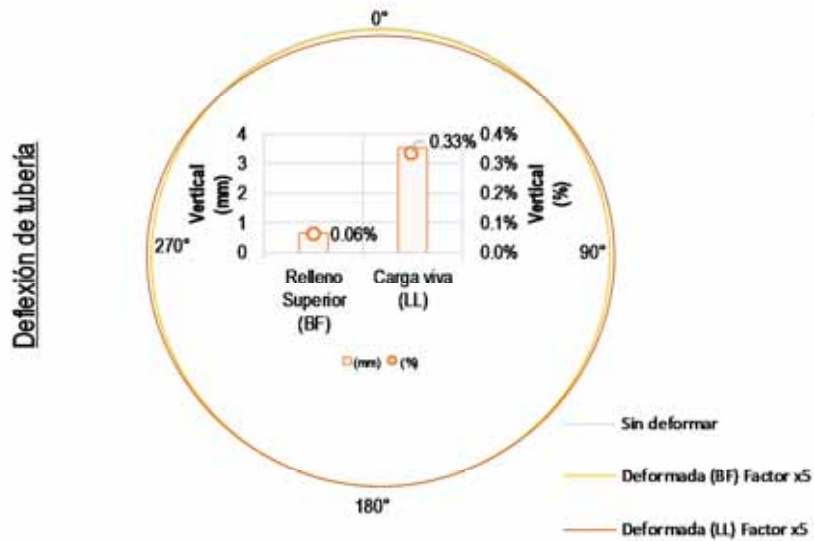
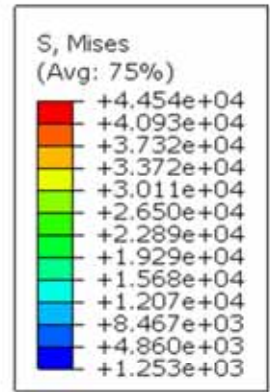
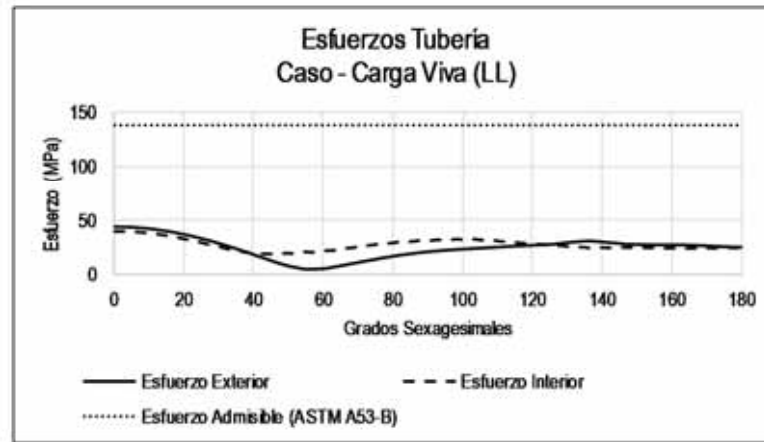


Figura A - 53: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM2-W(42"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

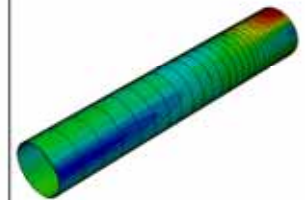
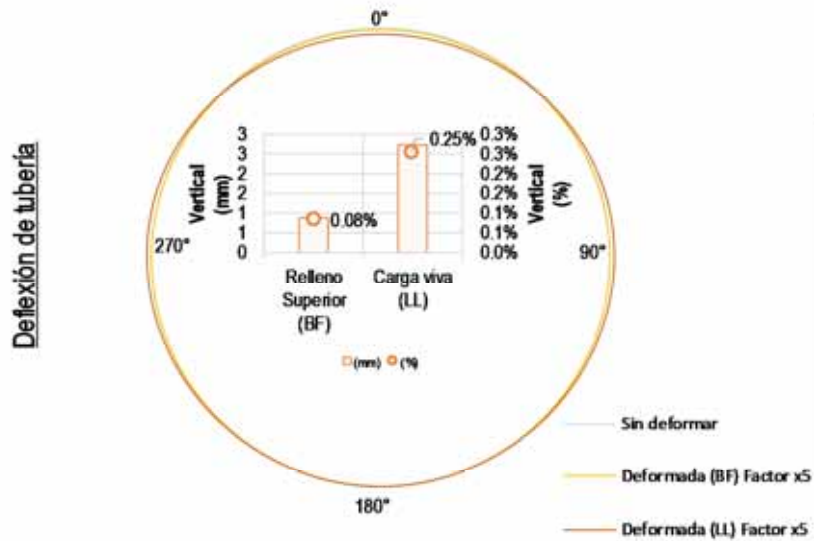
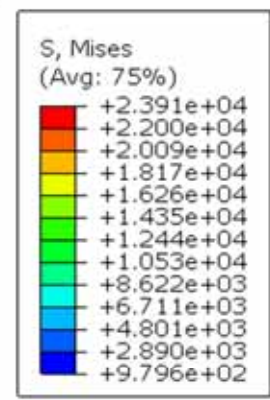
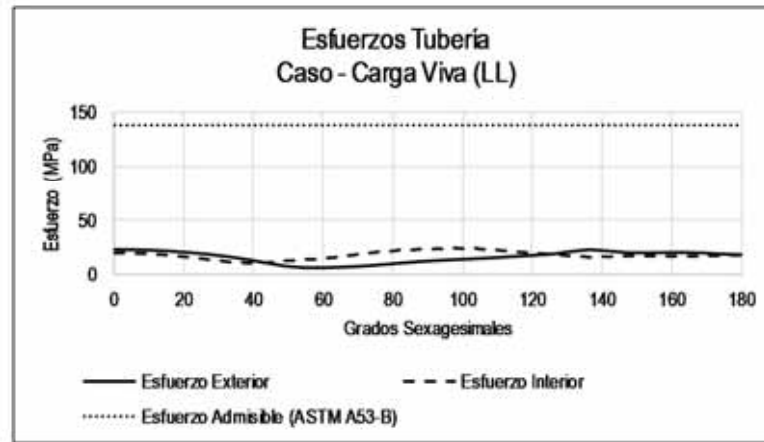


Figura A - 54: T(42"STD)-B(0.15m+1/6x42")-EM2-W(42"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

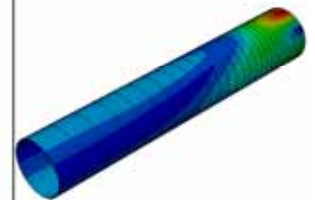
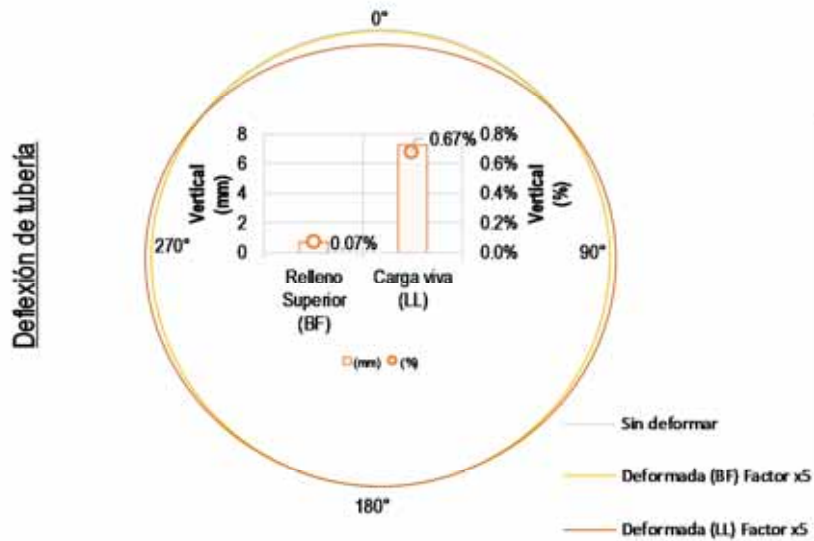
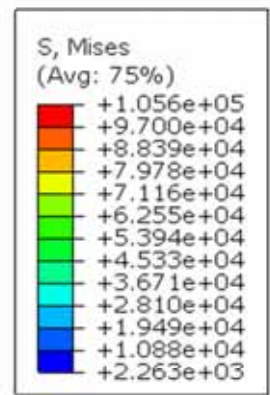
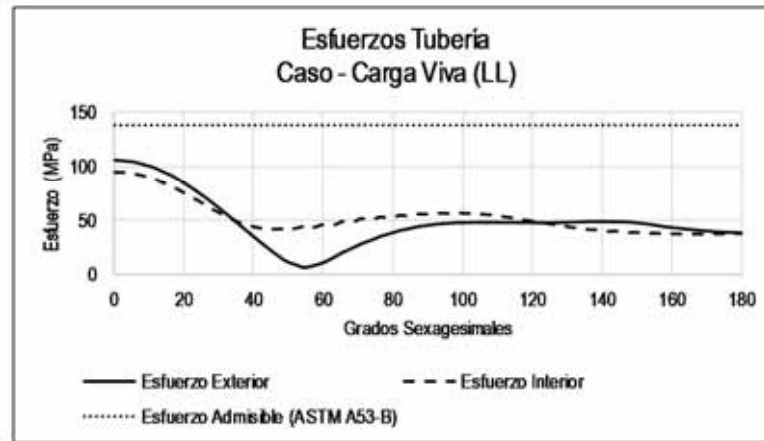
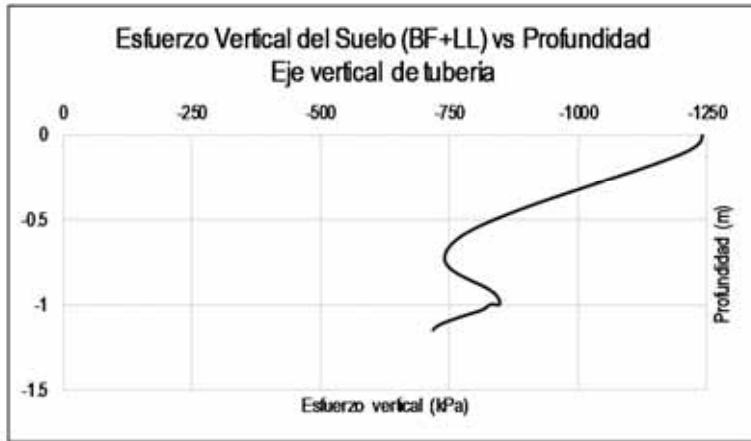


Figura A - 55: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM1-W(42"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

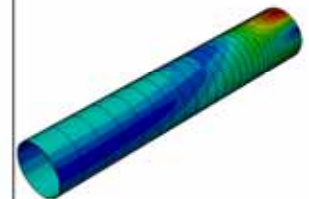
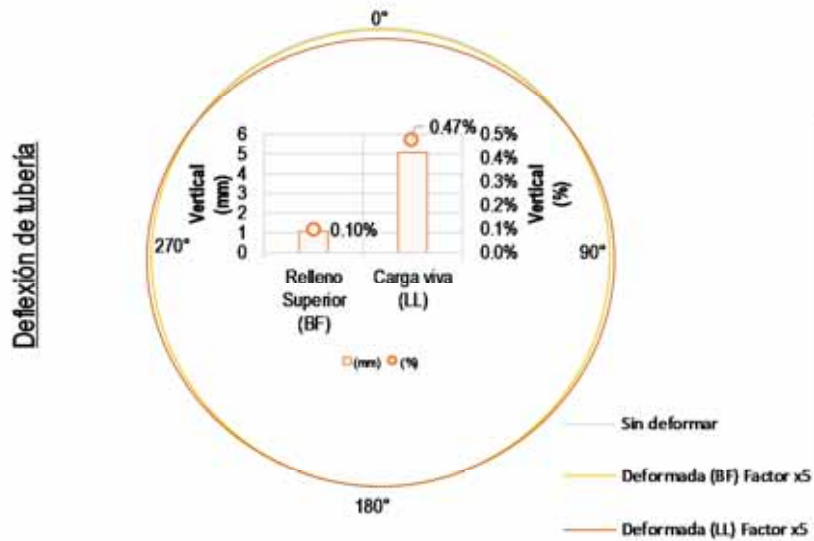
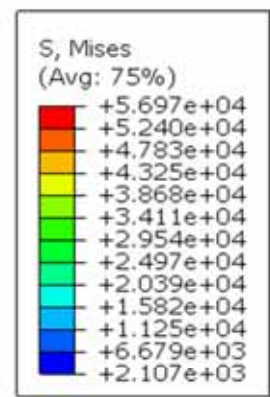
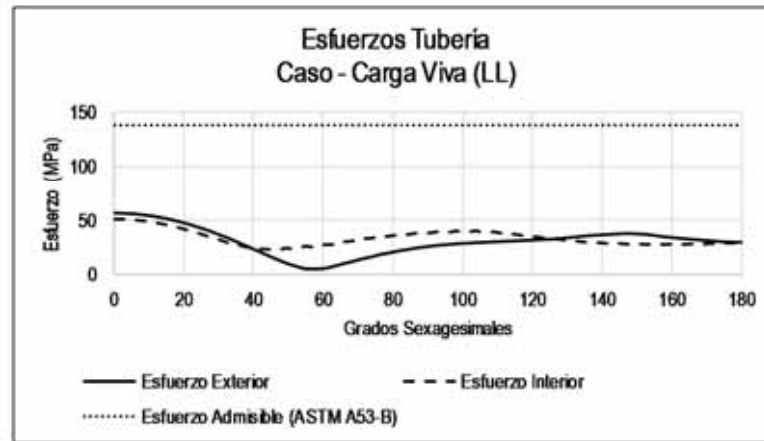
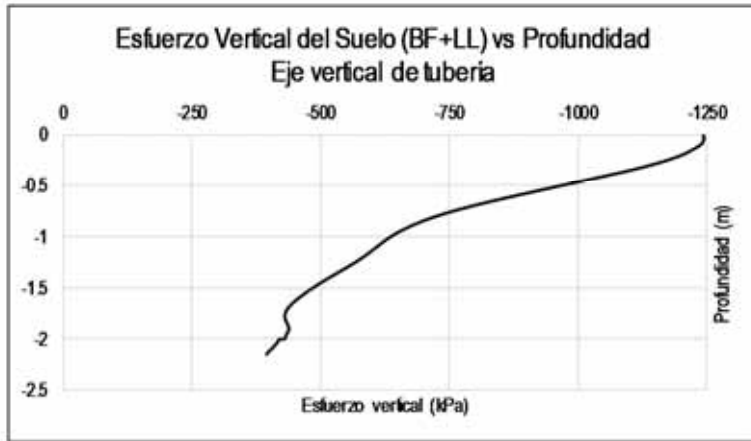


Figura A - 56: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM1-W(42"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

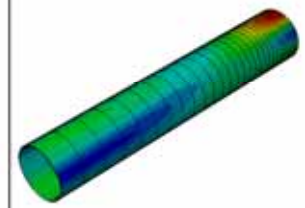
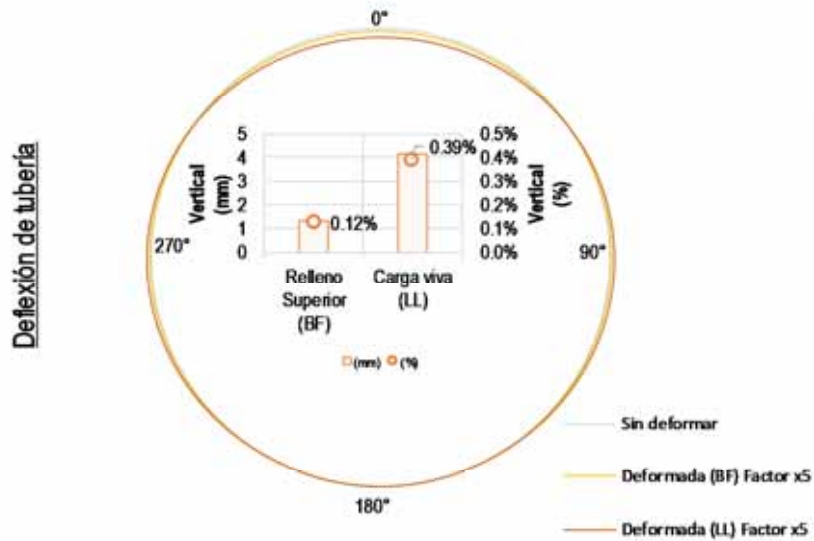
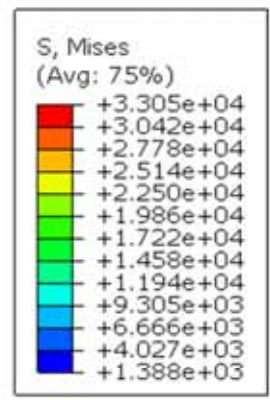
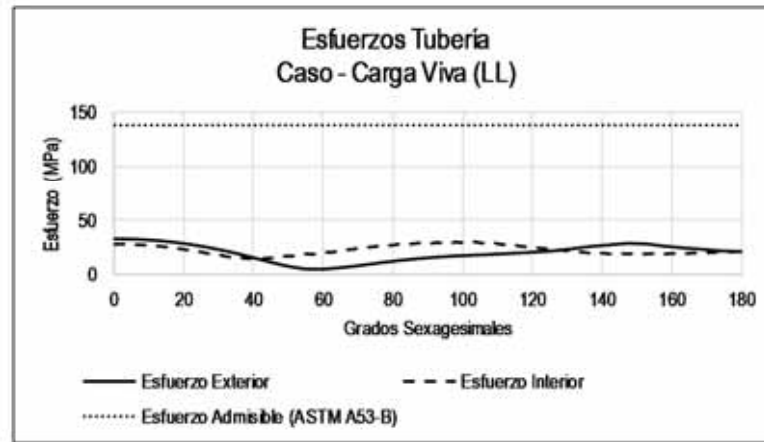


Figura A - 57: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM1-W(42"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

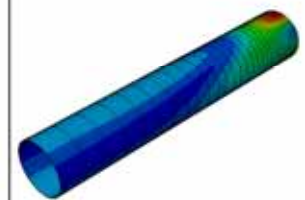
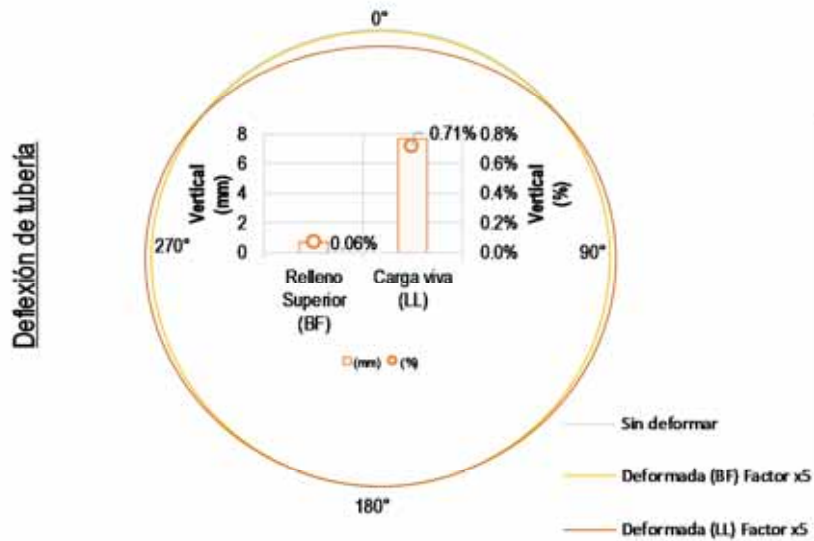
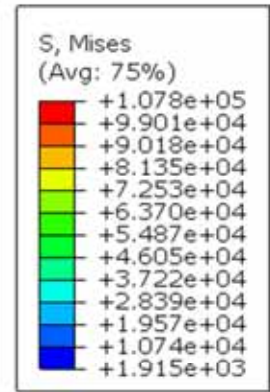
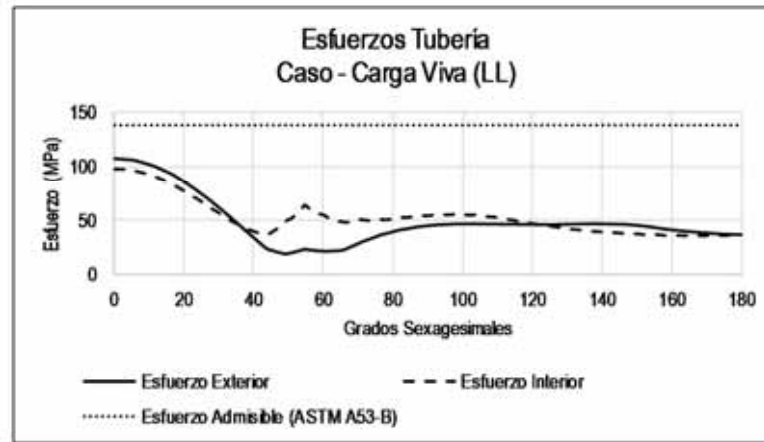
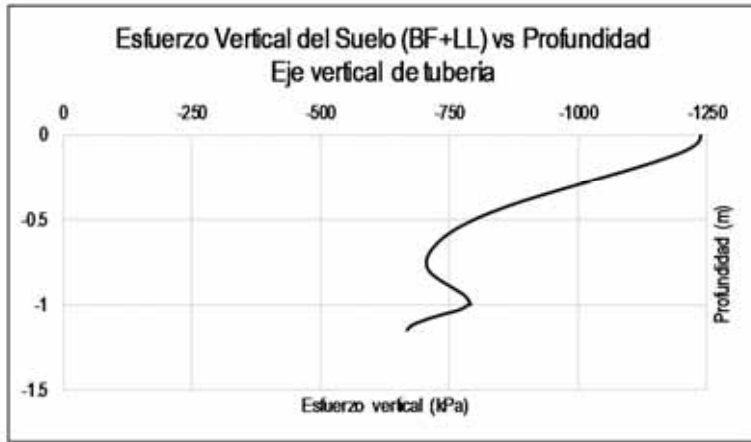


Figura A - 58: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM1-W(42"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

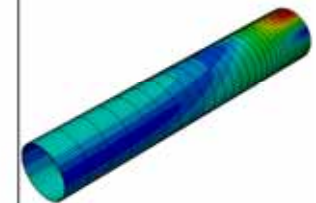
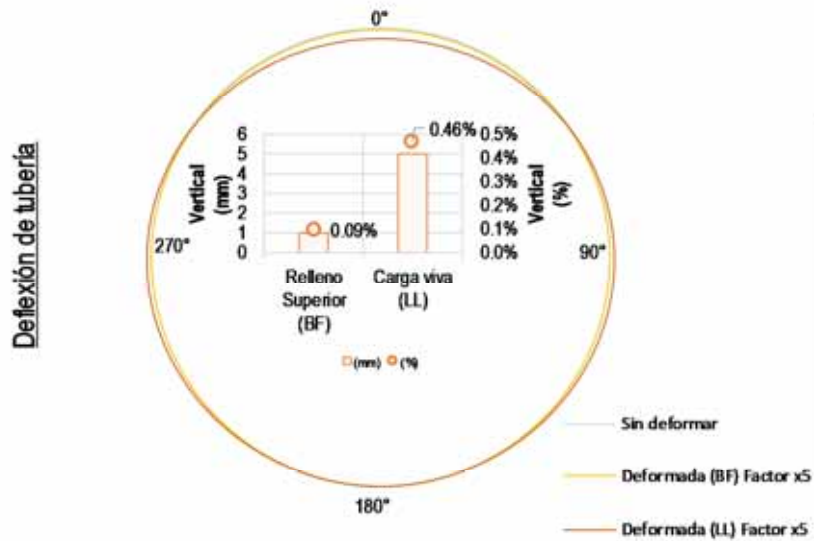
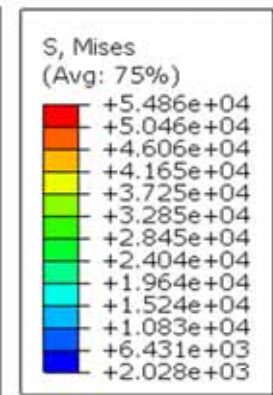
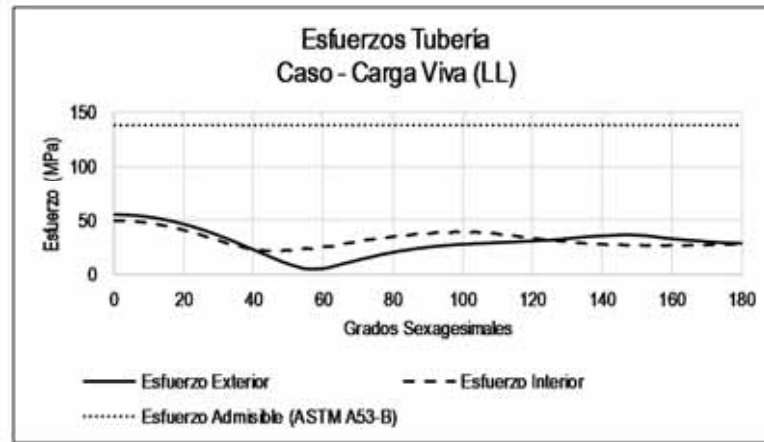


Figura A - 59: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM1-W(42"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

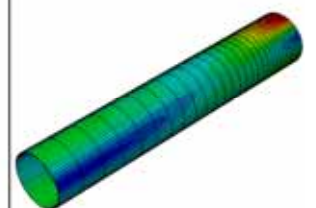
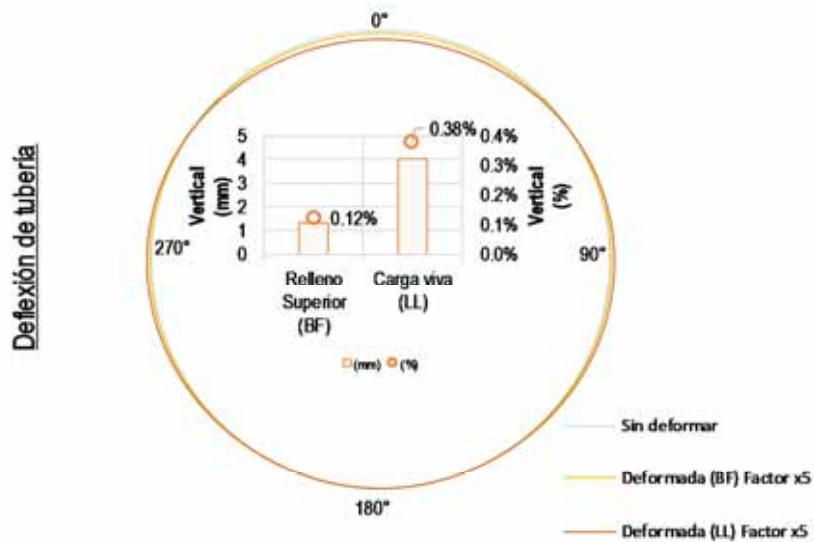
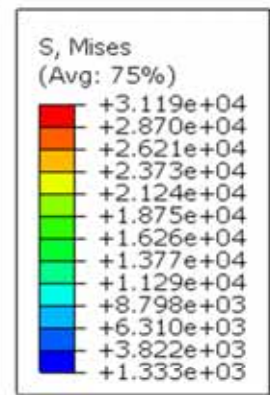
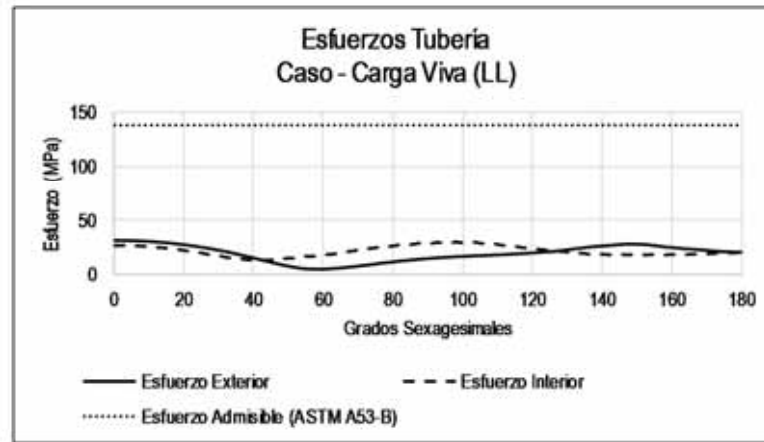


Figura A - 60: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM1-W(42"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

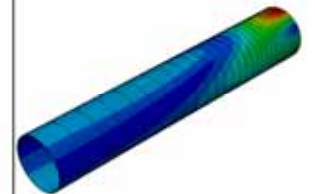
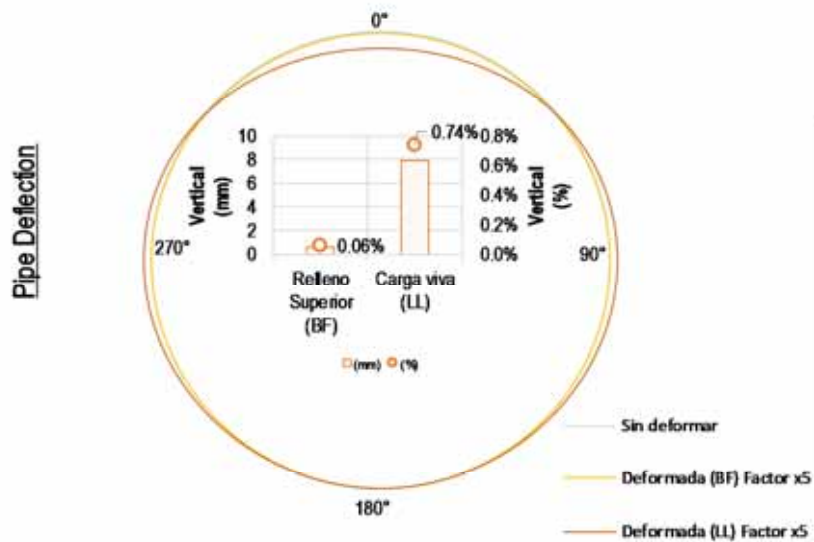
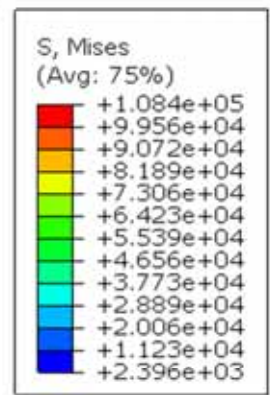
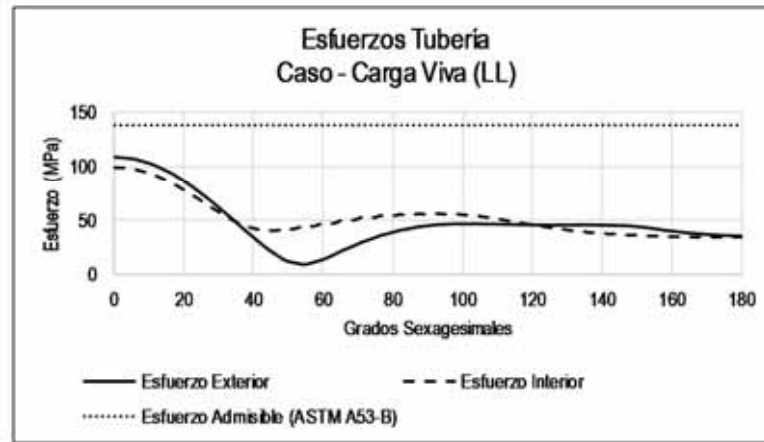
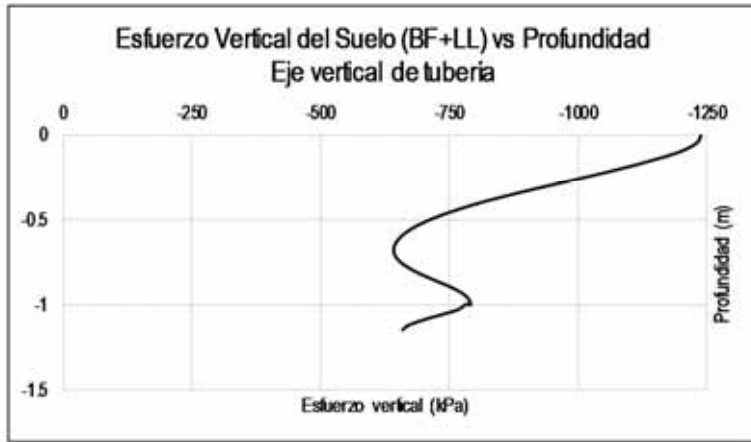


Figura A - 61: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM1-W(42"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

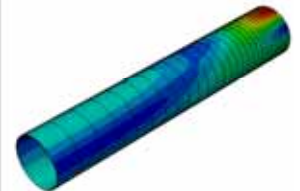
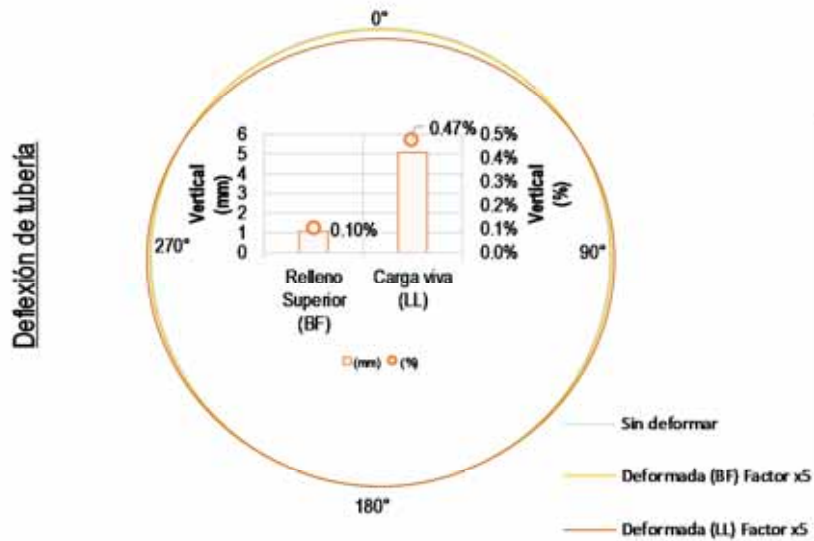
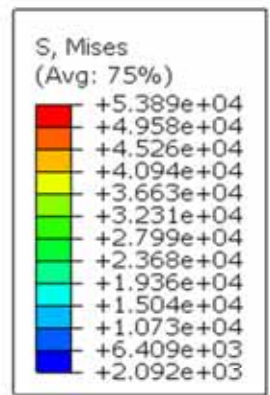
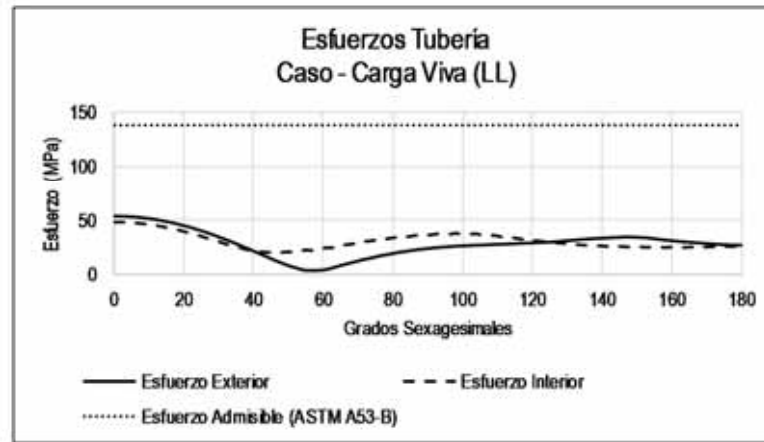


Figura A - 62: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM1-W(42"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

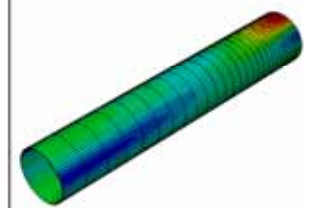
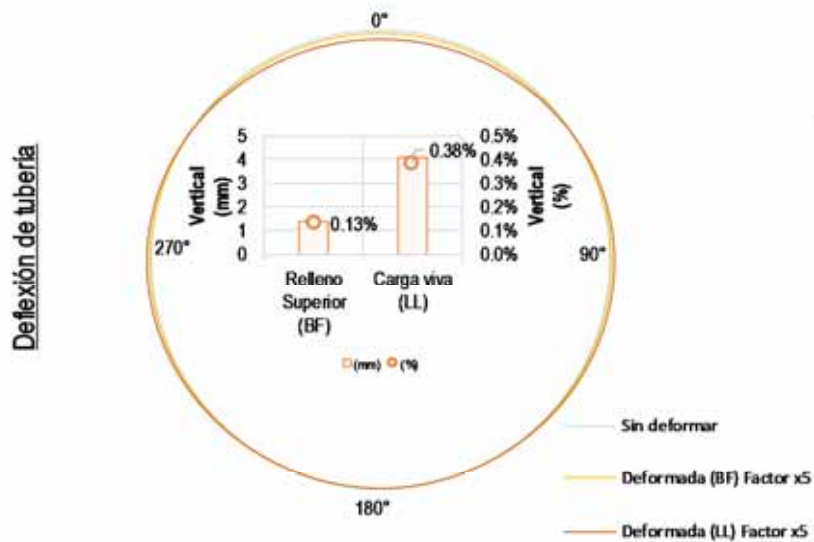
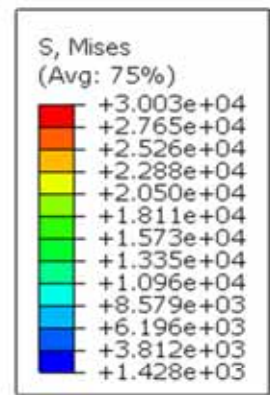
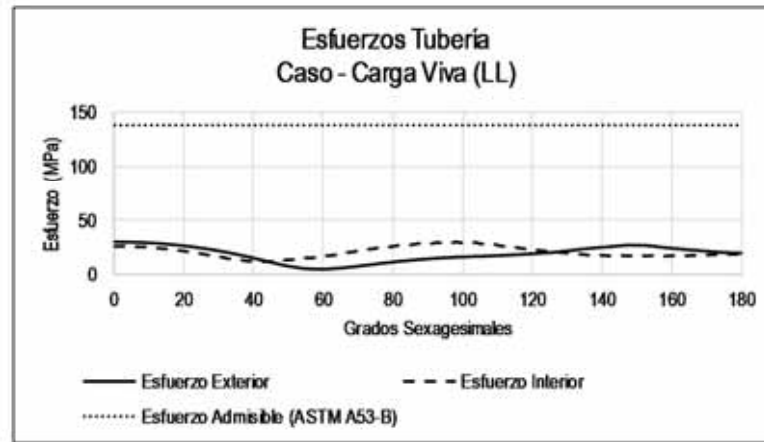


Figura A - 63: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM1-W(42"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

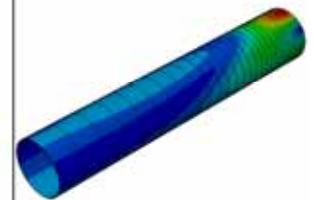
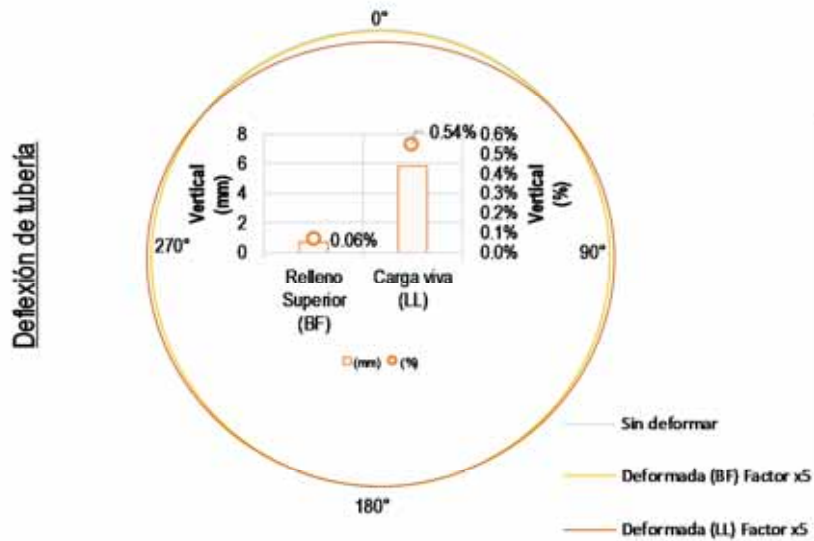
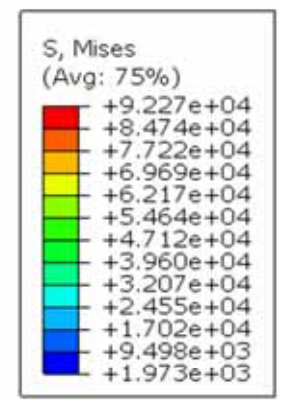
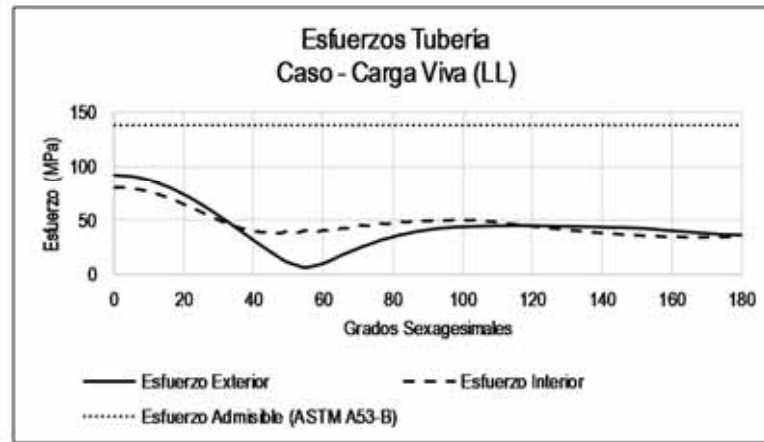
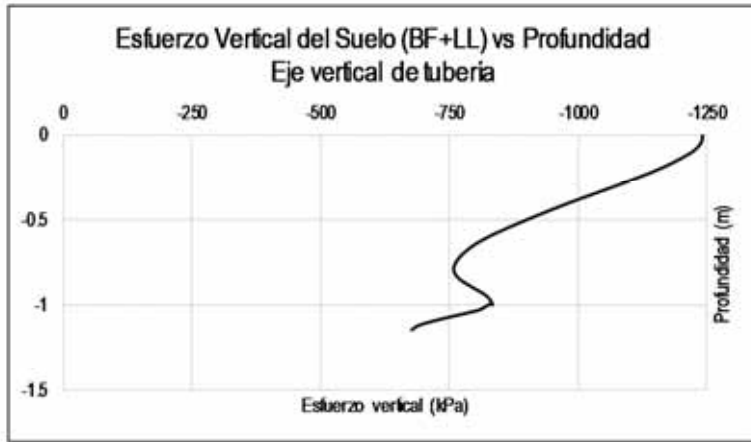


Figura A - 64: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM2-W(42"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

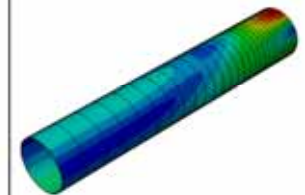
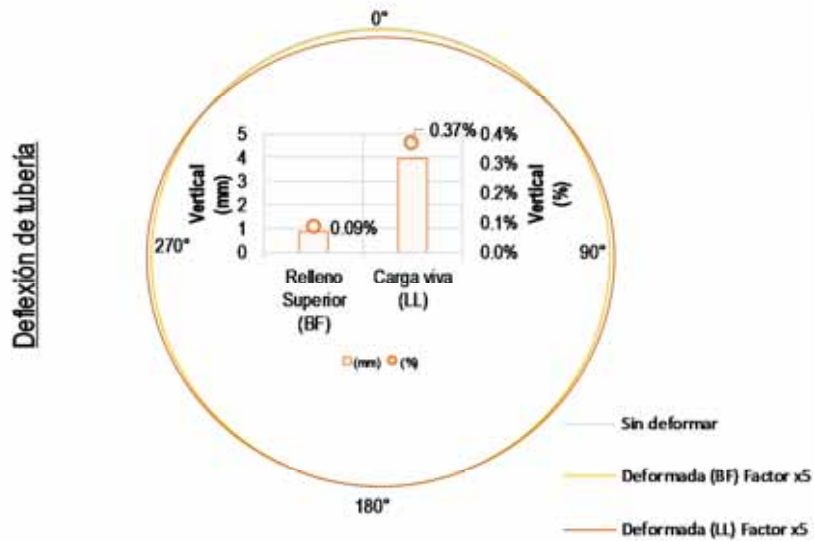
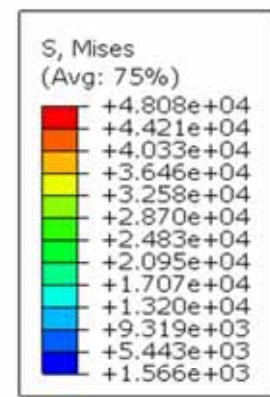
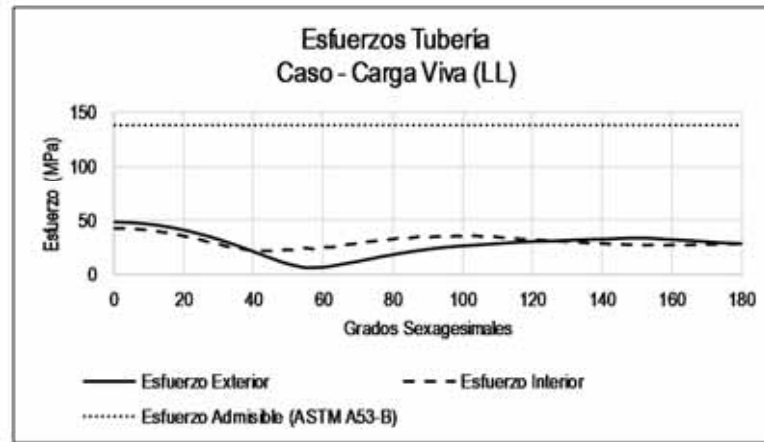


Figura A - 65: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM2-W(42"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

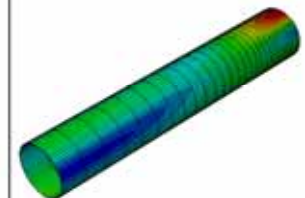
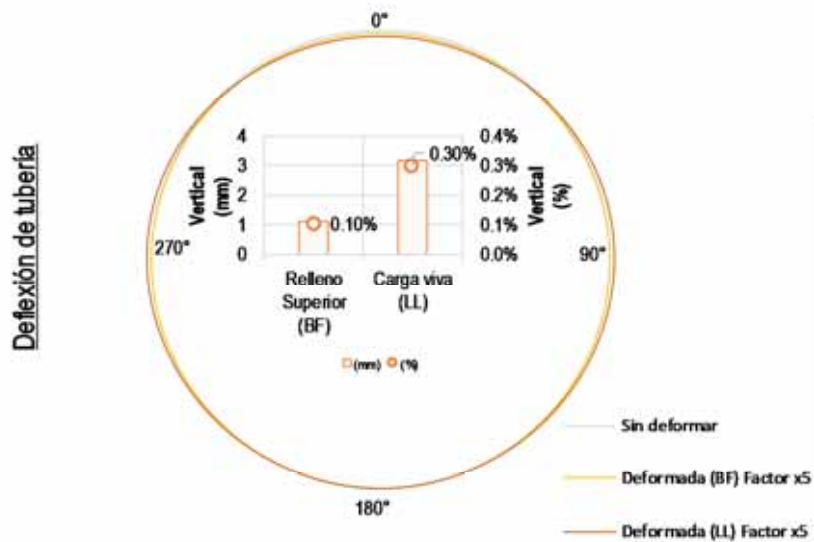
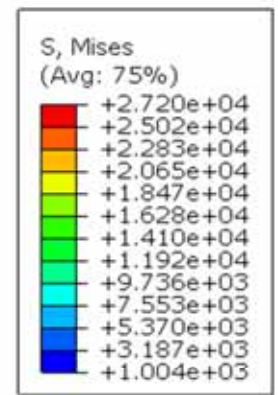
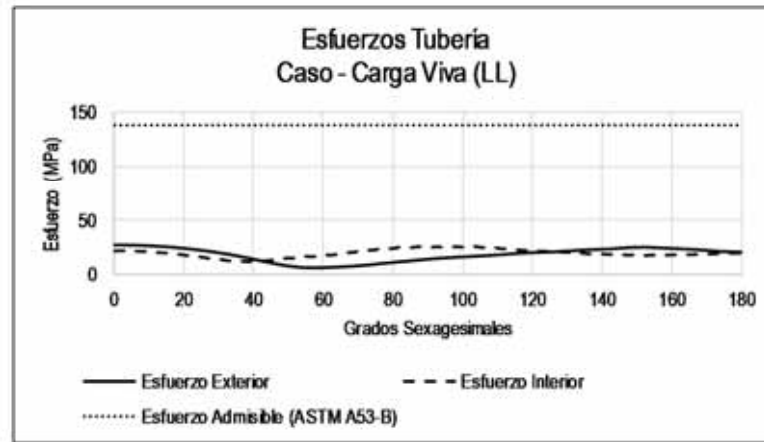


Figura A - 66: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM2-W(42"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

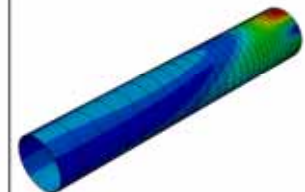
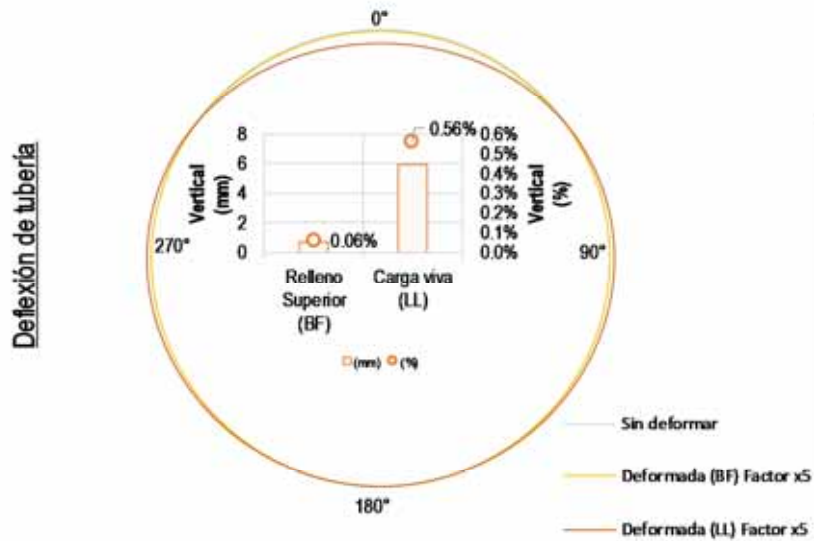
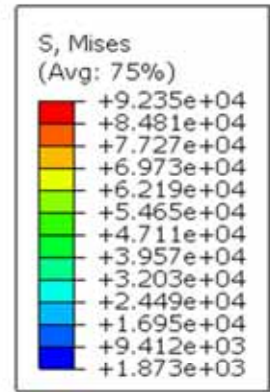
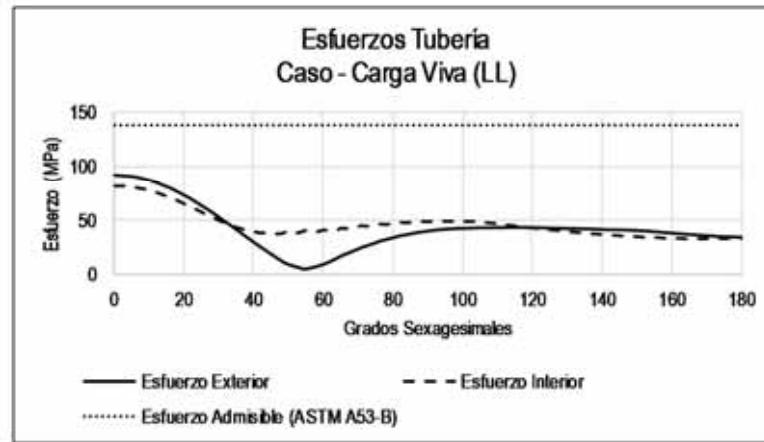
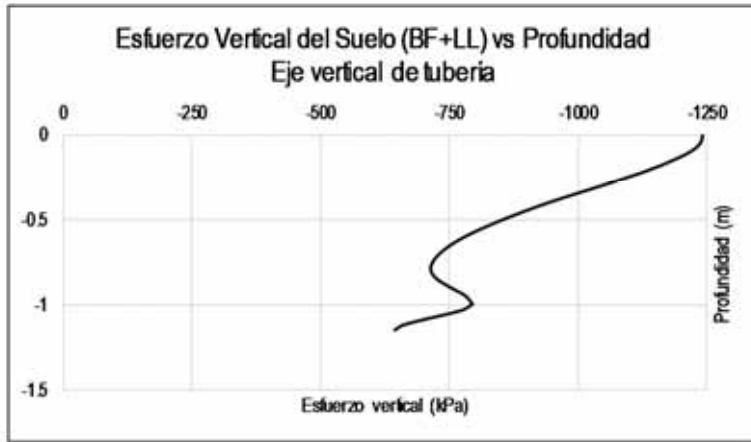


Figura A - 67: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM2-W(42"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

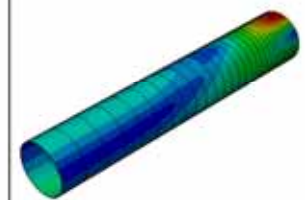
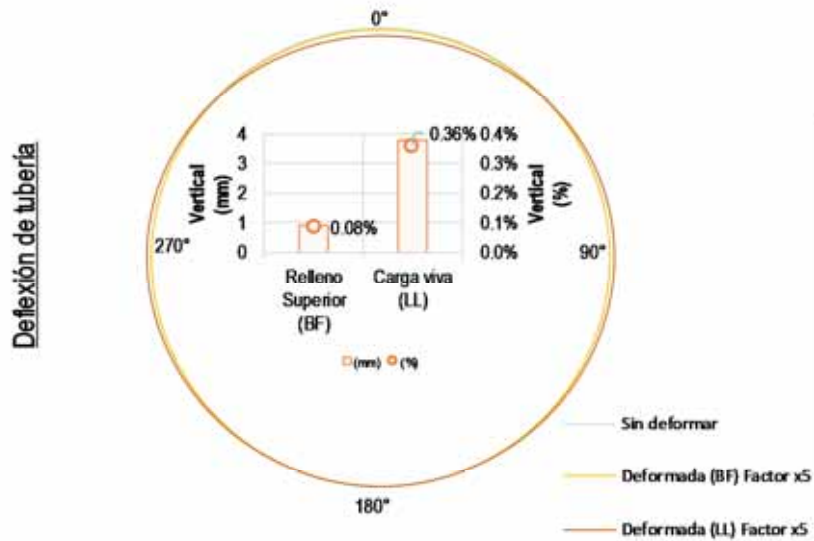
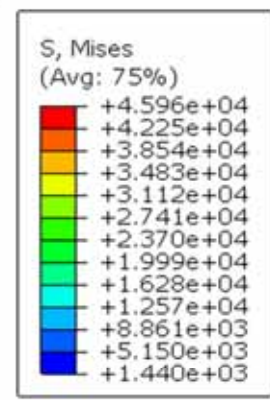
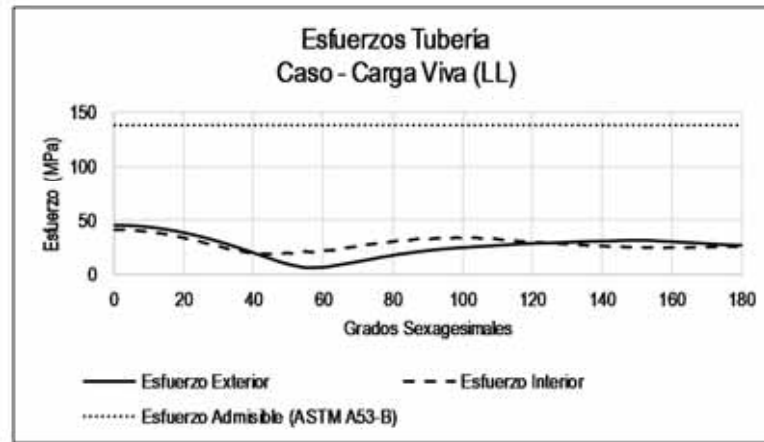


Figura A - 68: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM2-W(42"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

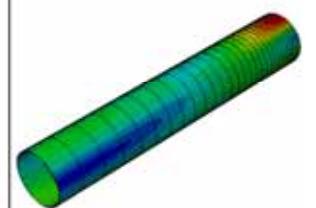
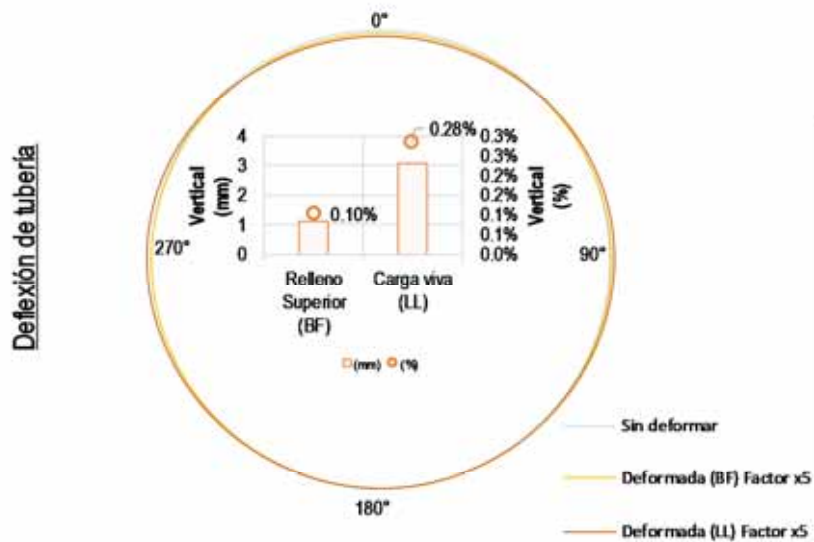
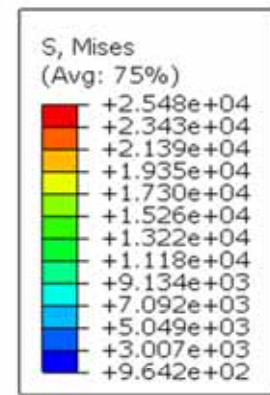
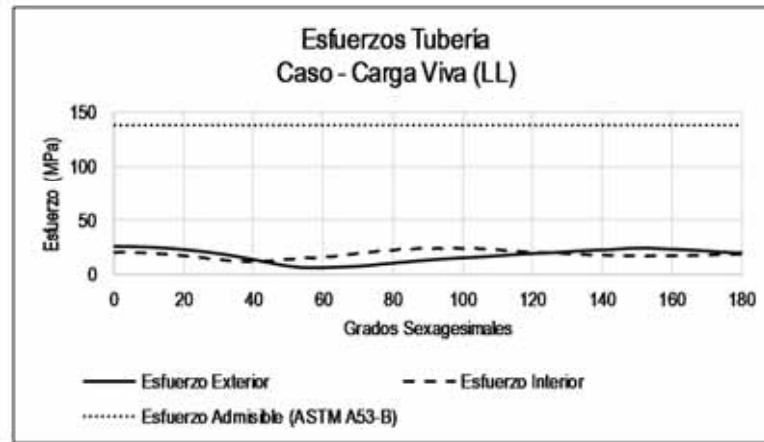


Figura A - 69: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM2-W(42"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

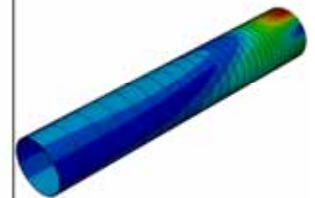
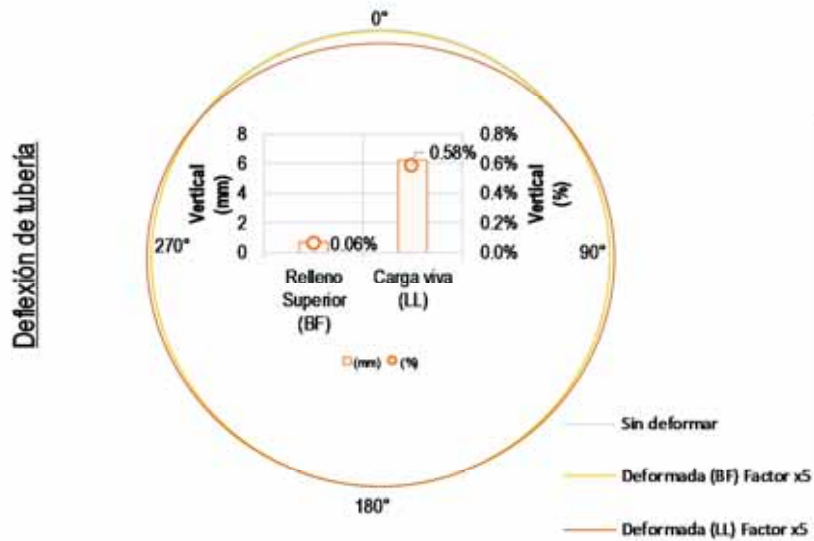
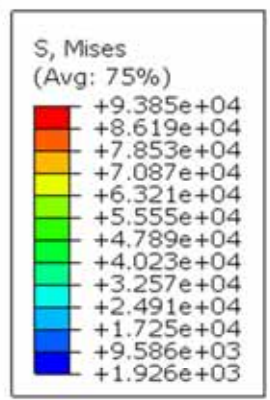
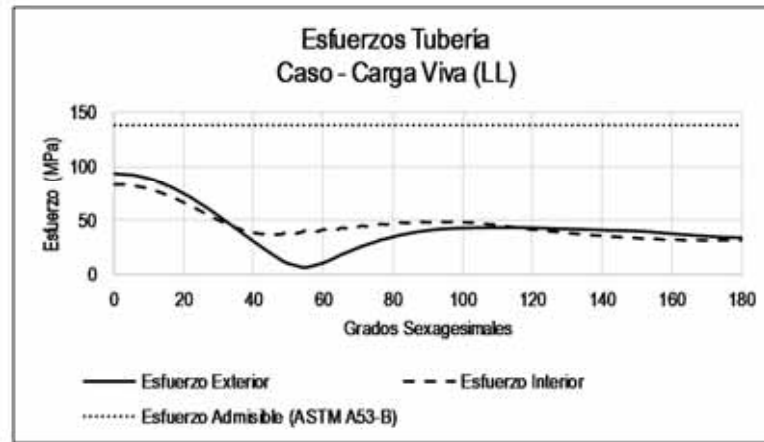
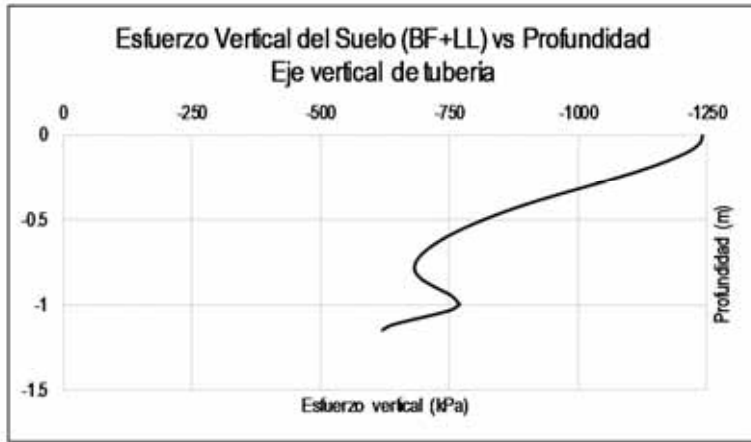


Figura A - 70: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM2-W(42"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

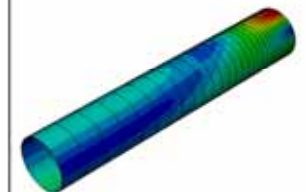
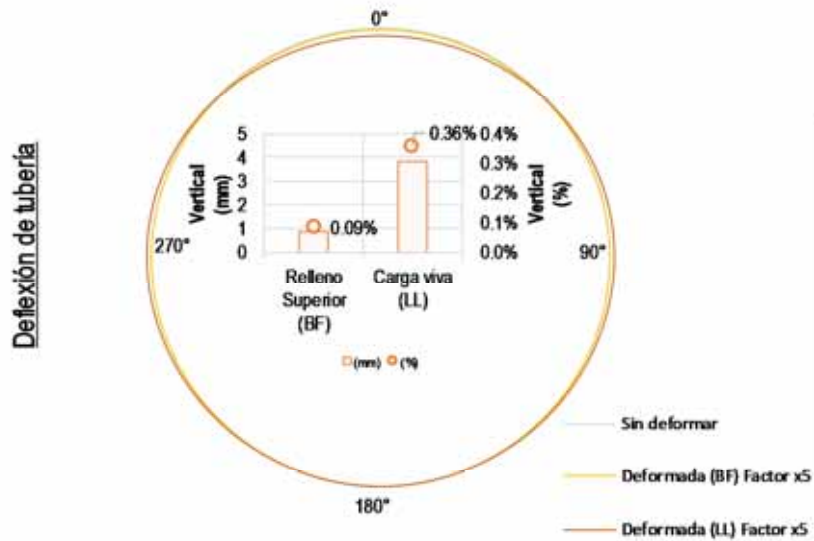
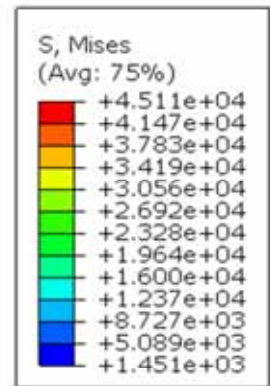
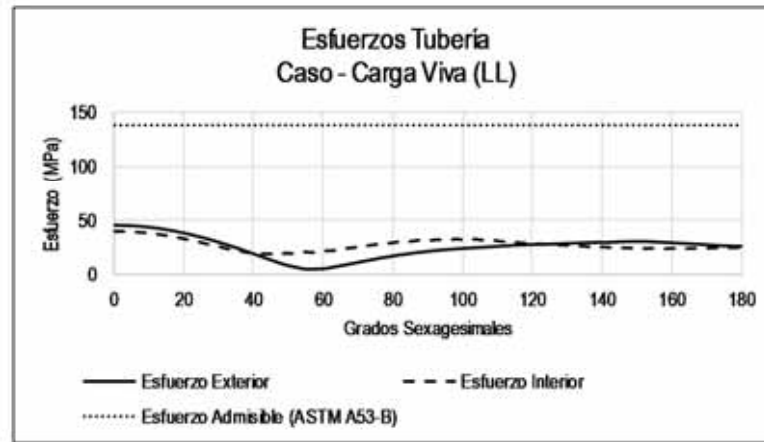


Figura A - 71: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM2-W(42"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

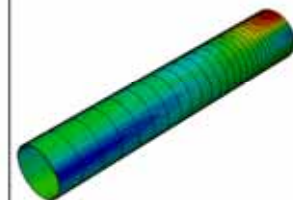
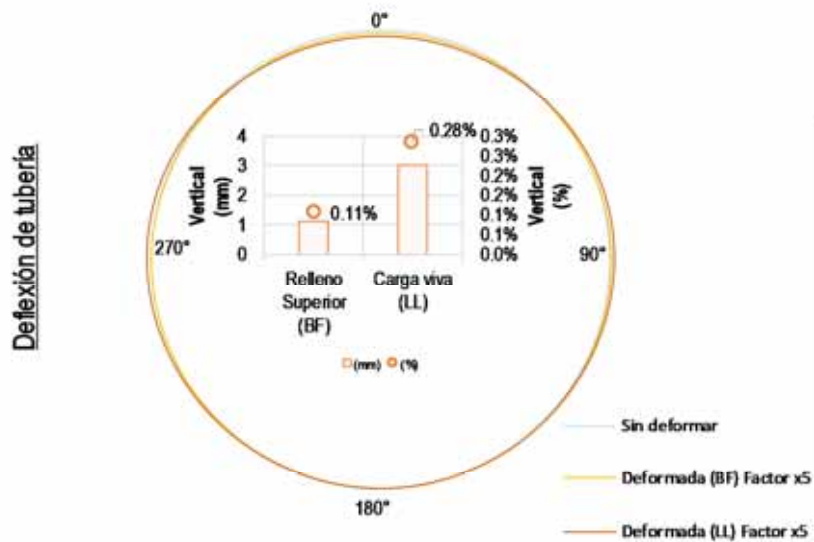
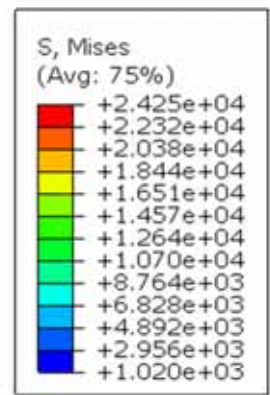
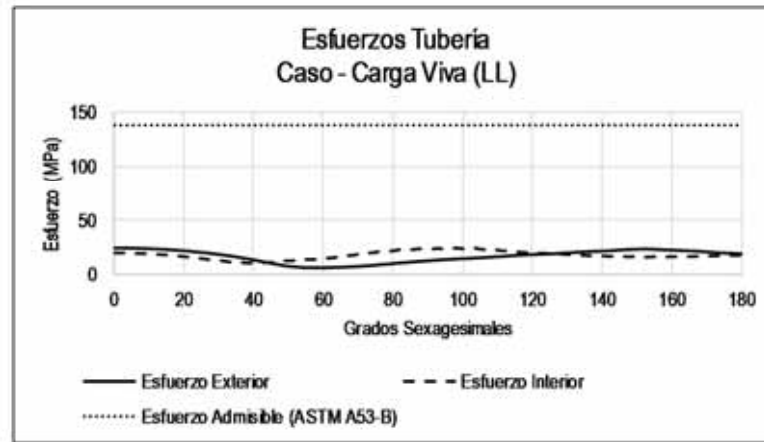
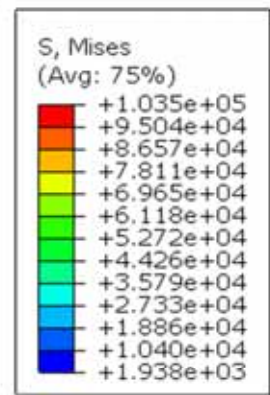
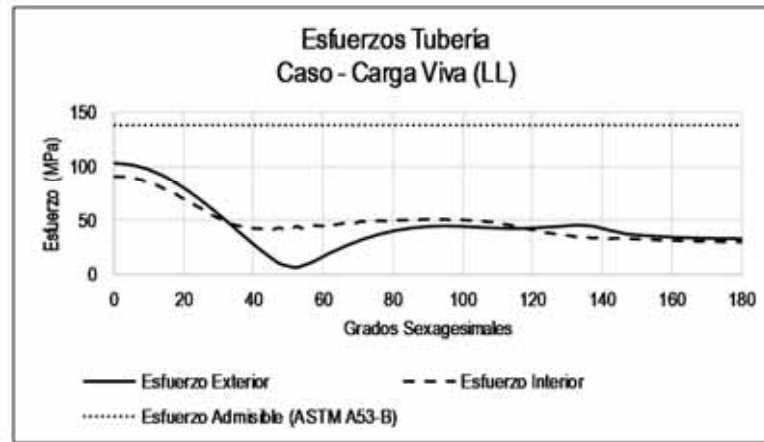
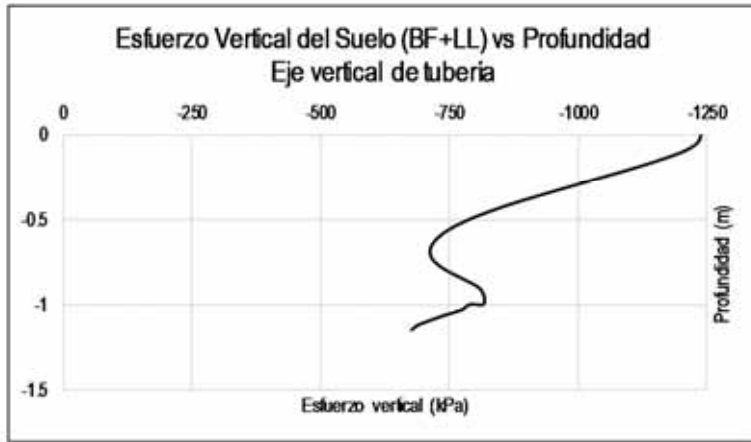


Figura A - 72: T(42"STD)-B(0.15m+1/12x42")-EM2-W(42"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)



Deflexión de tubería

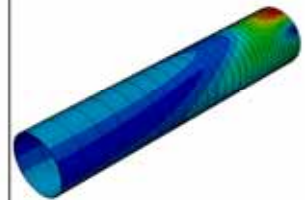
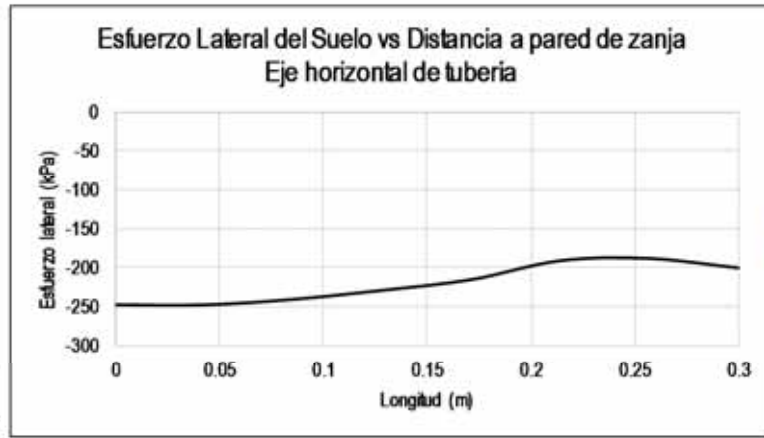
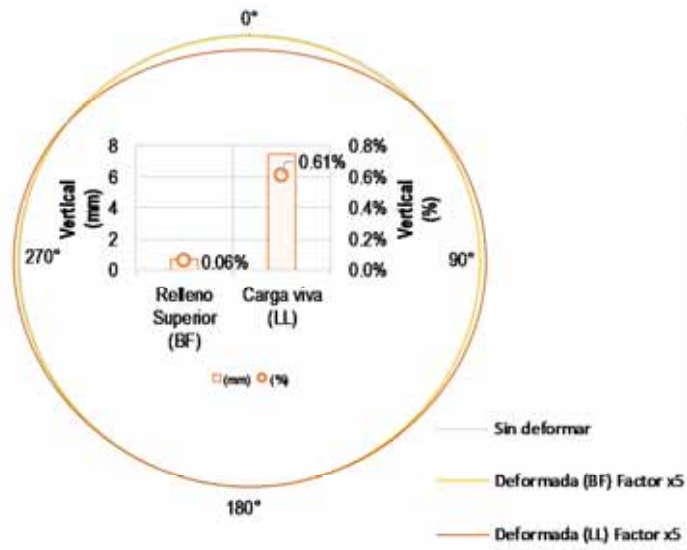


Figura A - 73: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM1-W(48"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

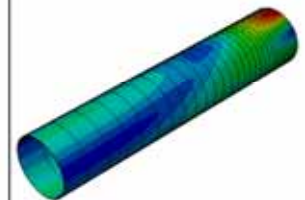
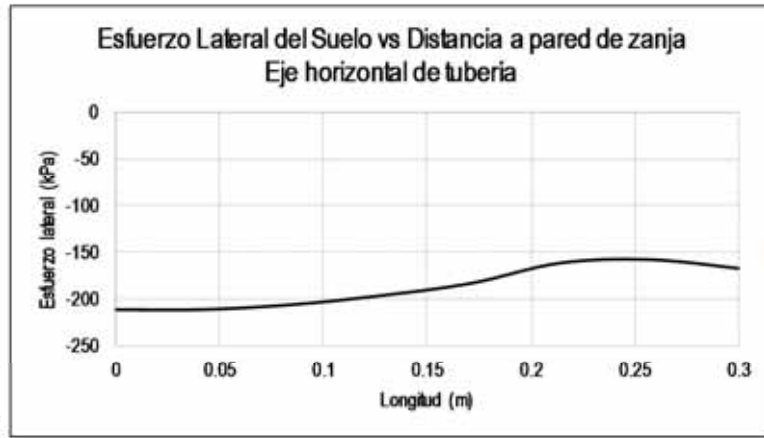
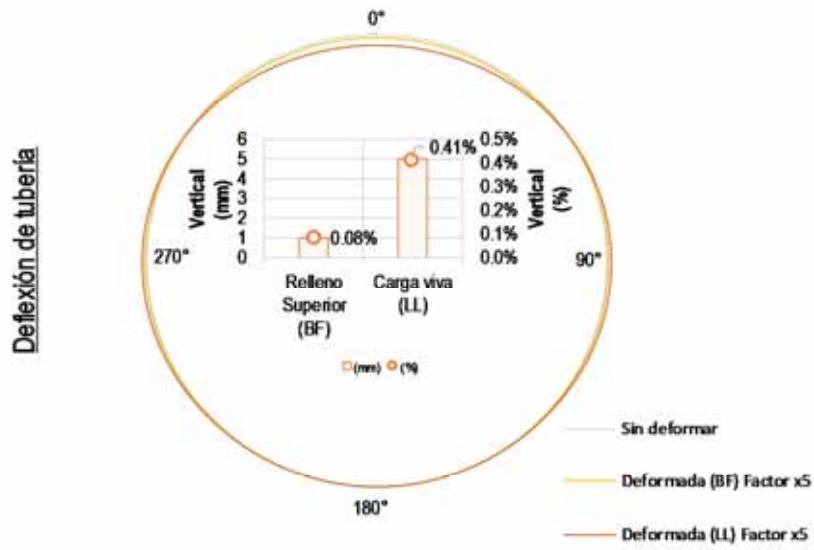
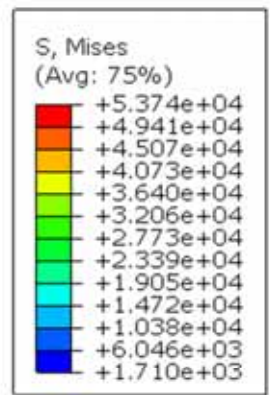
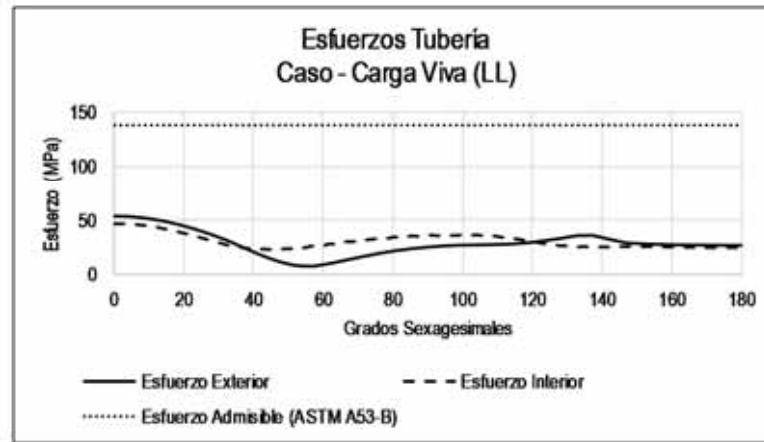


Figura A - 74: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM1-W(48"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

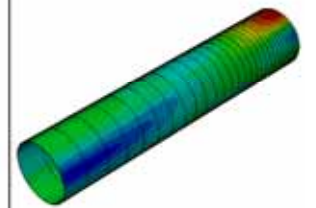
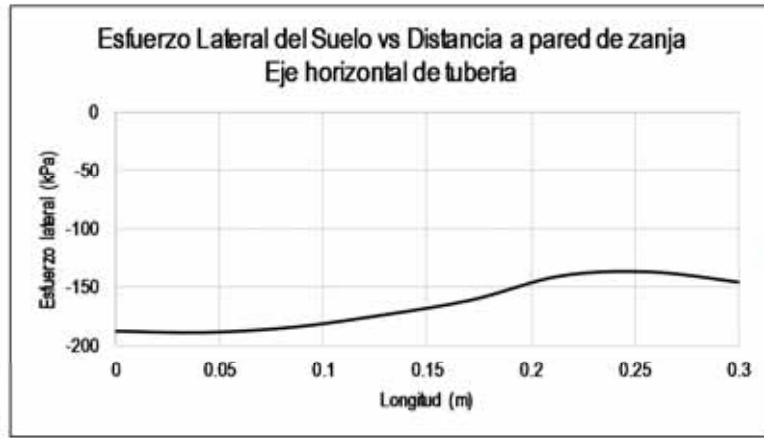
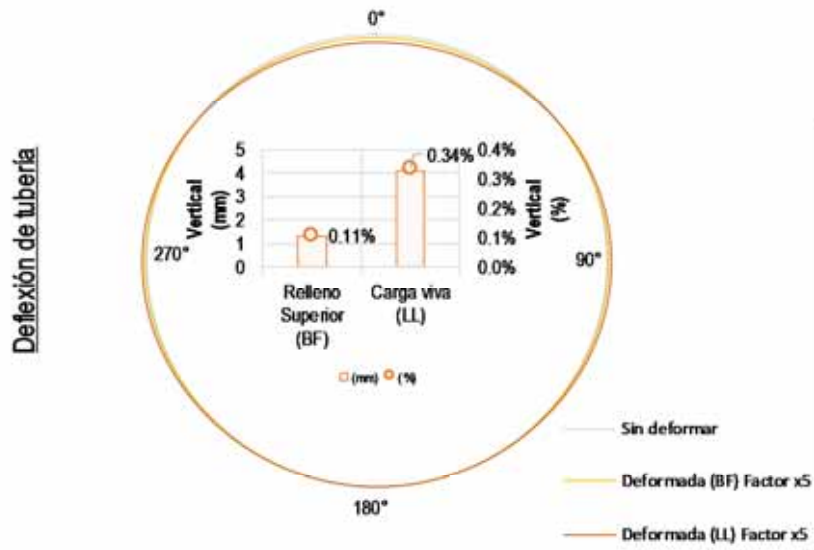
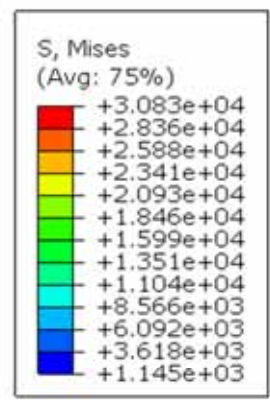
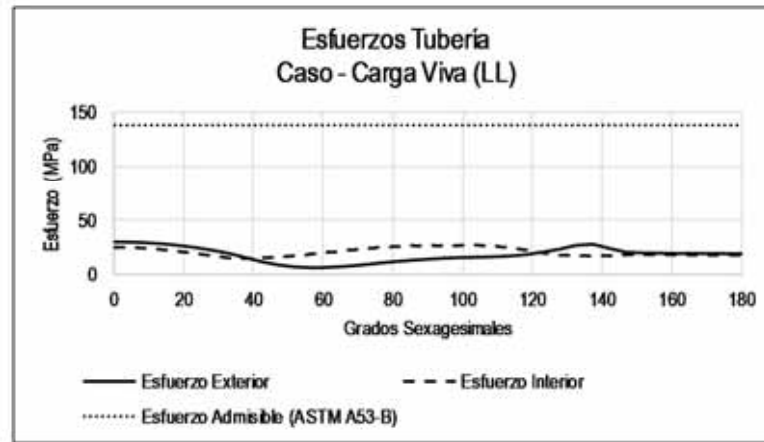


Figura A - 75: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM1-W(48"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

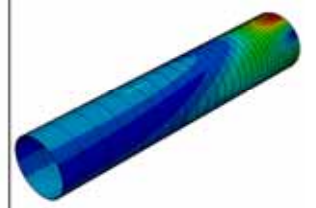
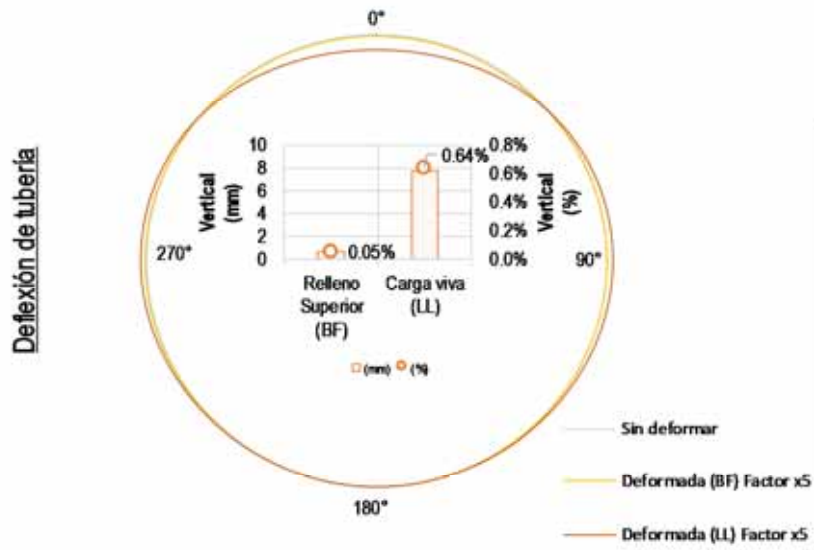
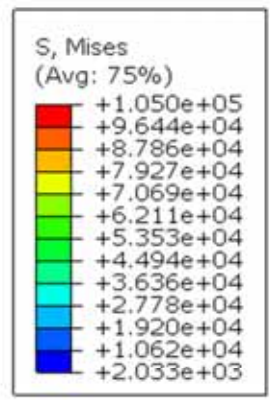
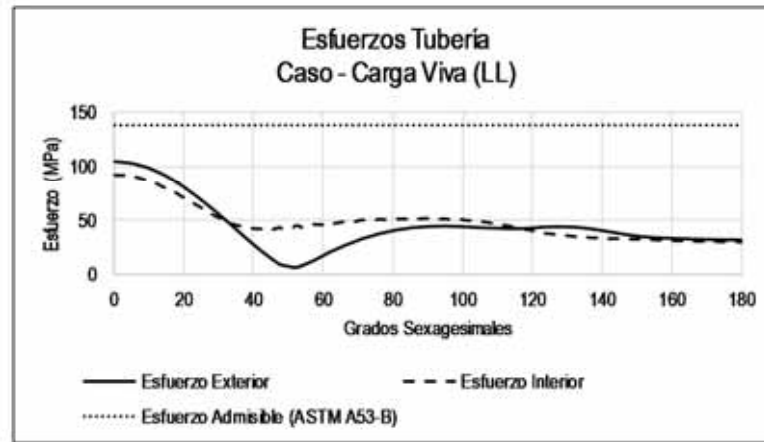
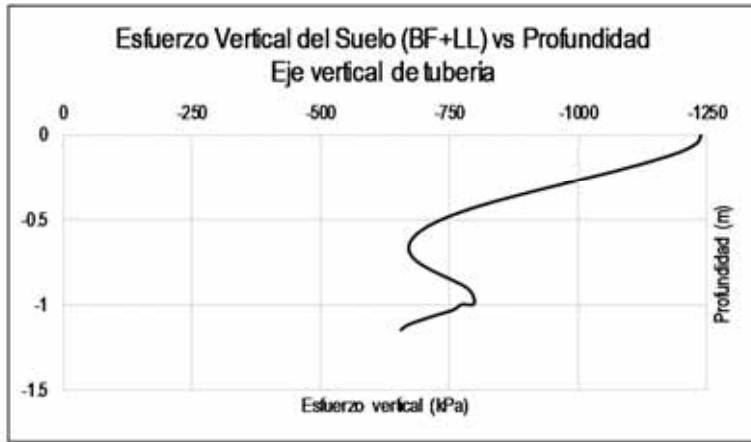


Figura A - 76: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM1-W(48"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

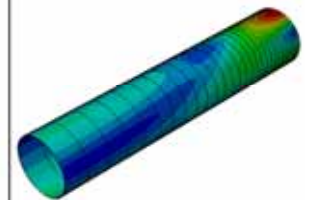
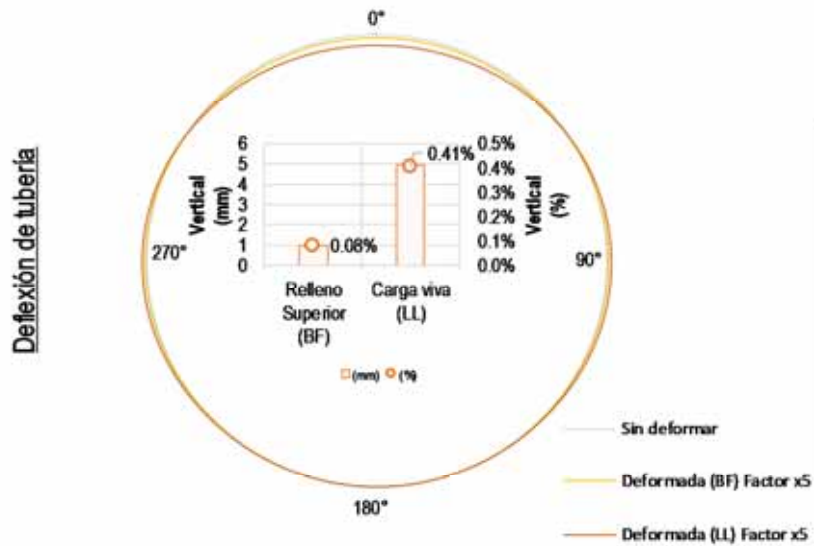
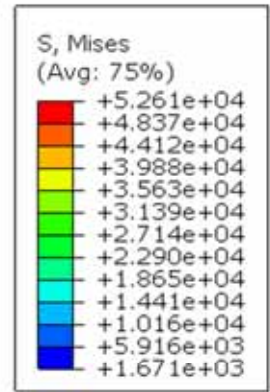
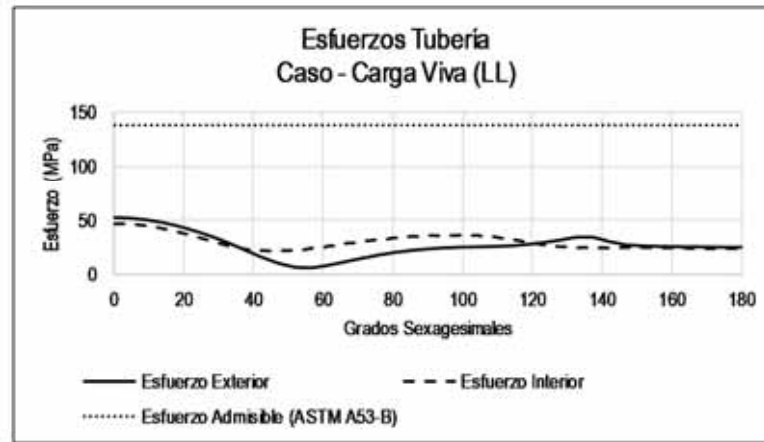


Figura A - 77: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM1-W(48"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

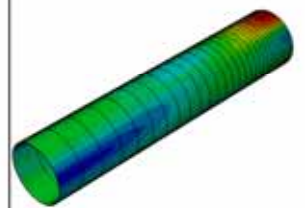
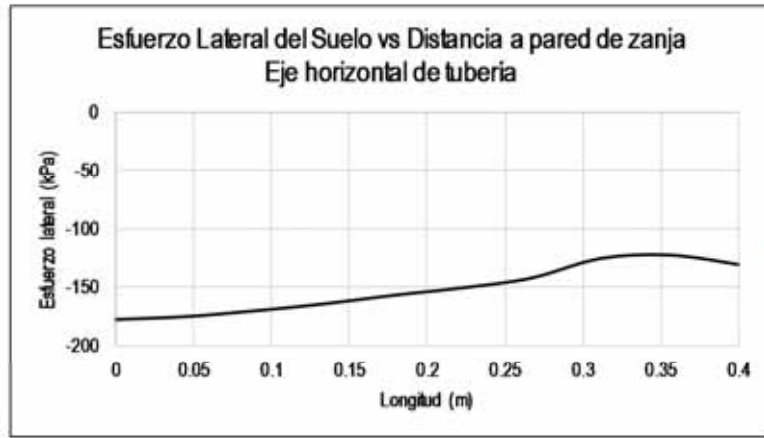
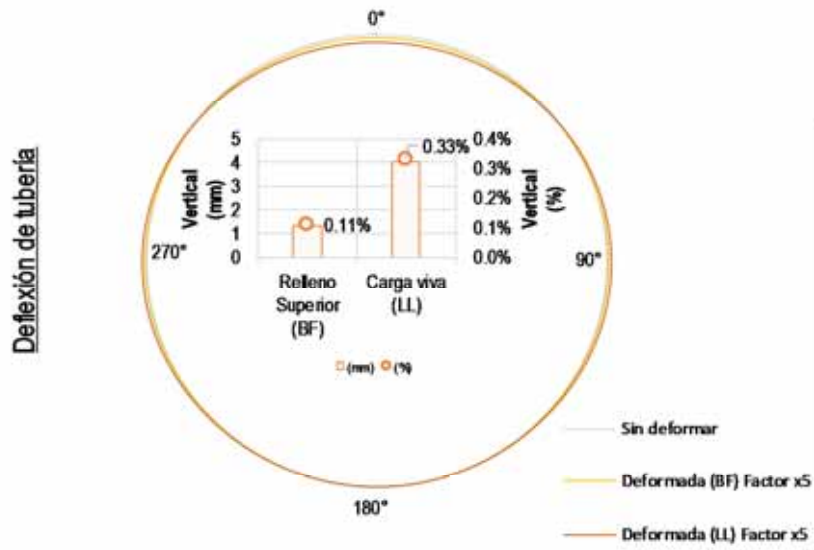
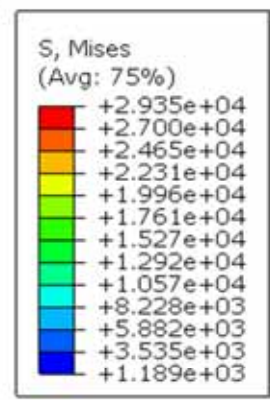
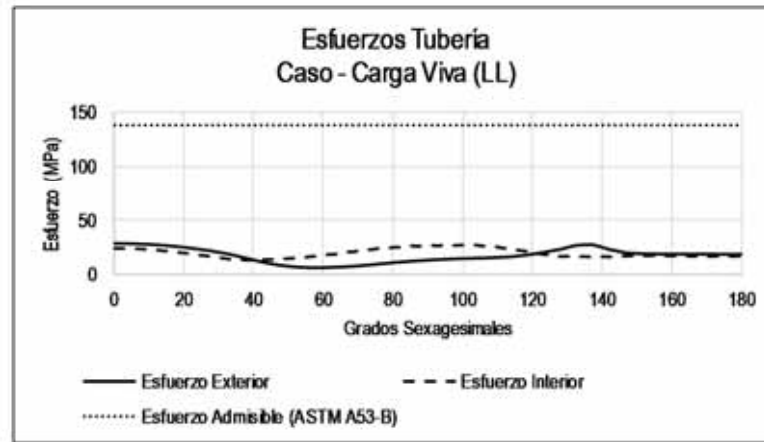
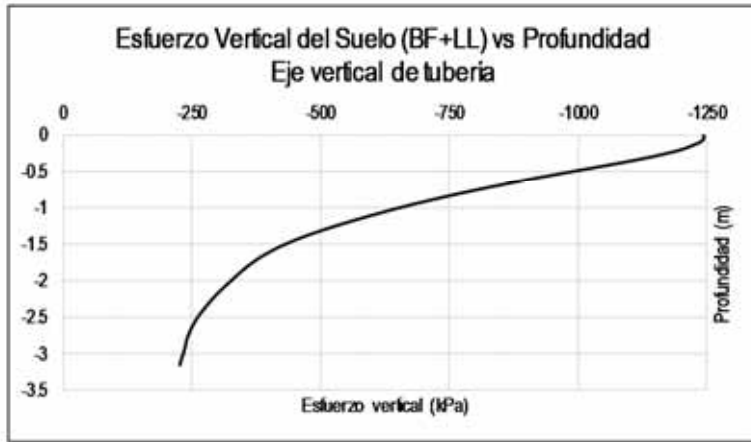
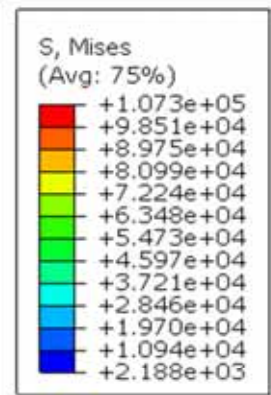
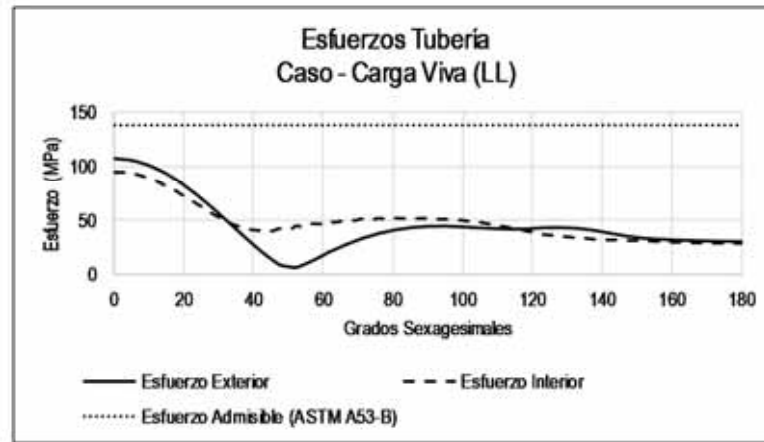
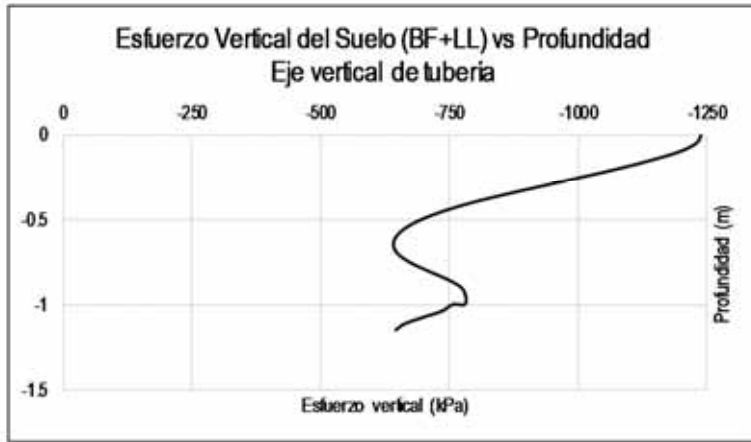


Figura A - 78: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM1-W(48"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)



Deflexión de tubería

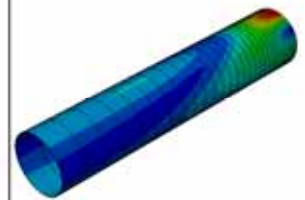
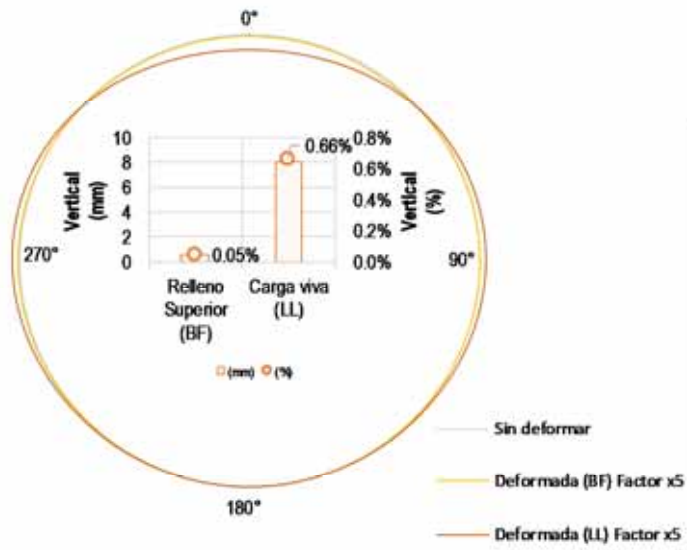


Figura A - 79: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM1-W(48"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

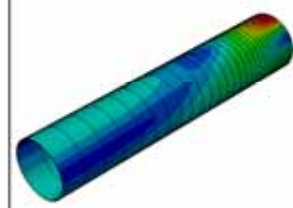
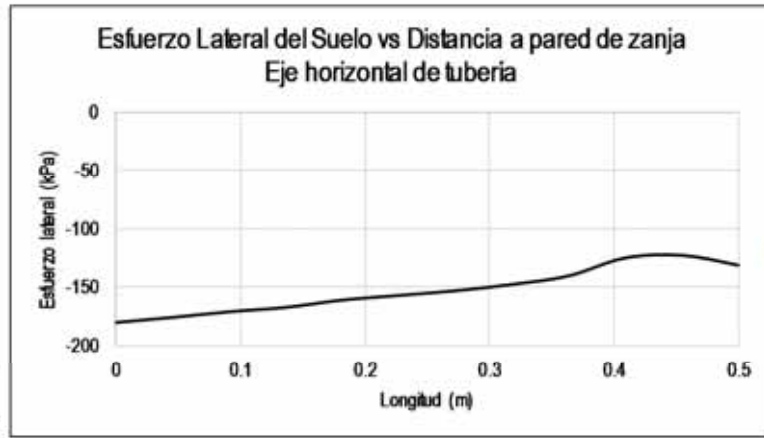
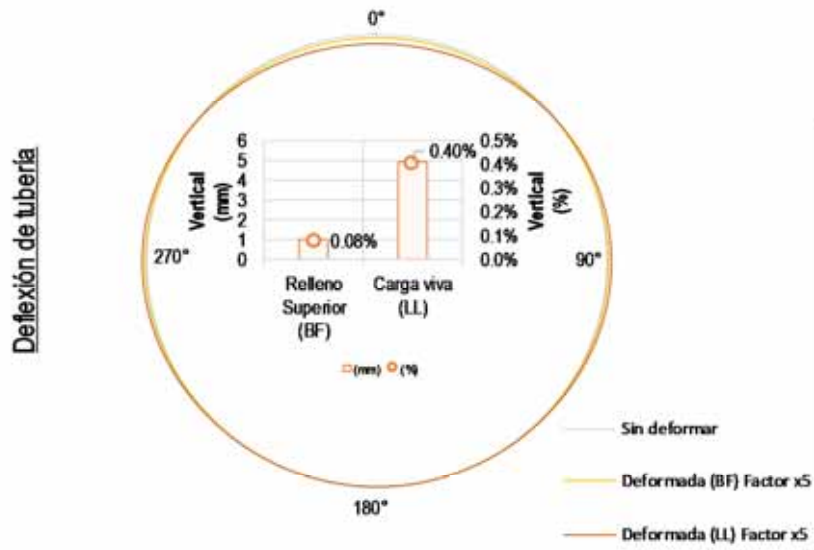
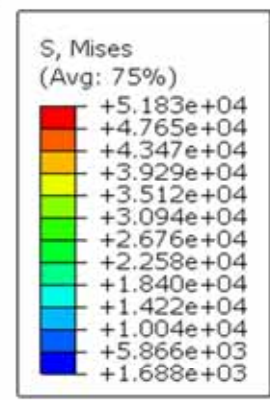
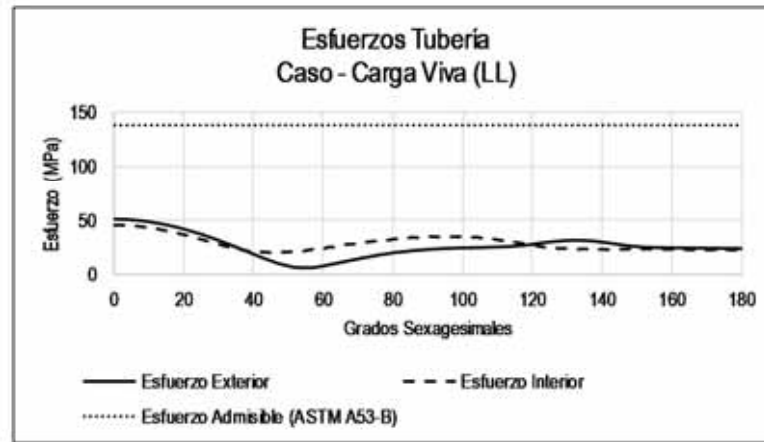


Figura A - 80: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM1-W(48"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

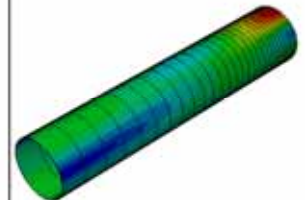
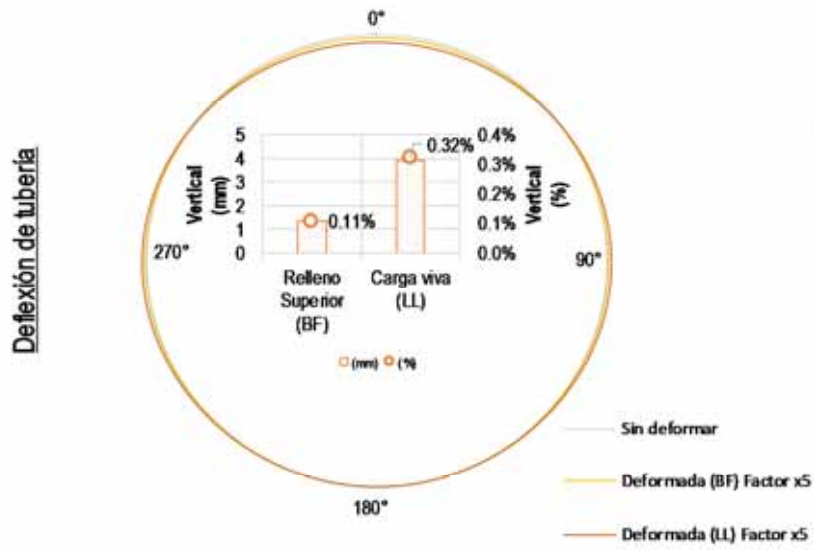
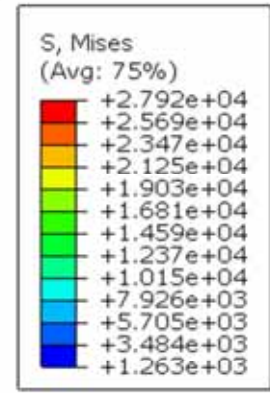
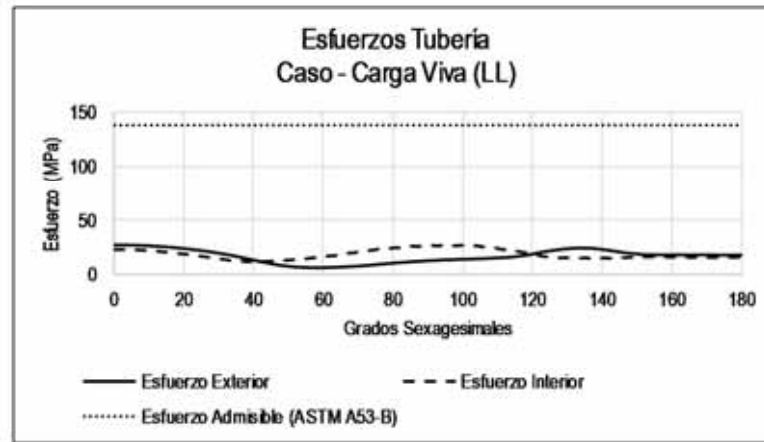


Figura A - 81: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM1-W(48"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

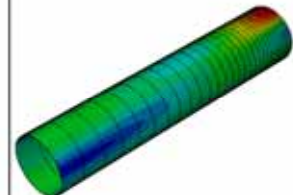
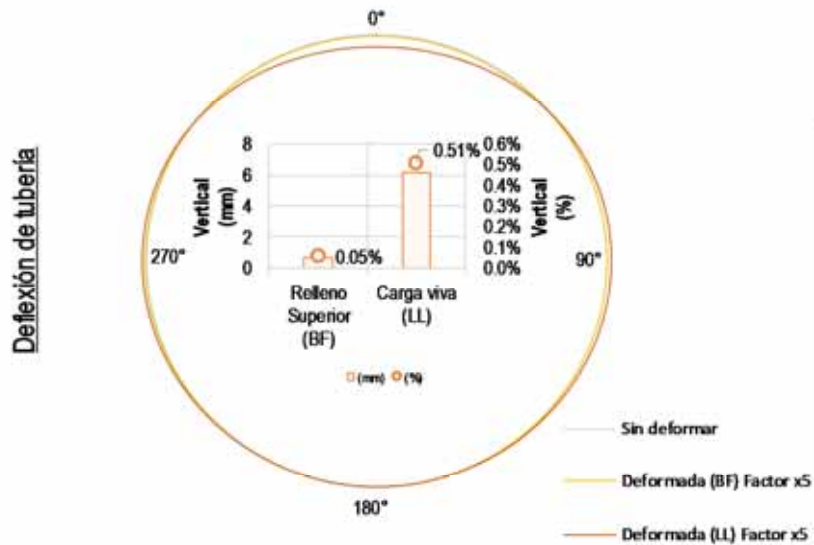
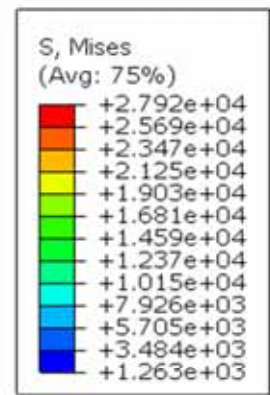
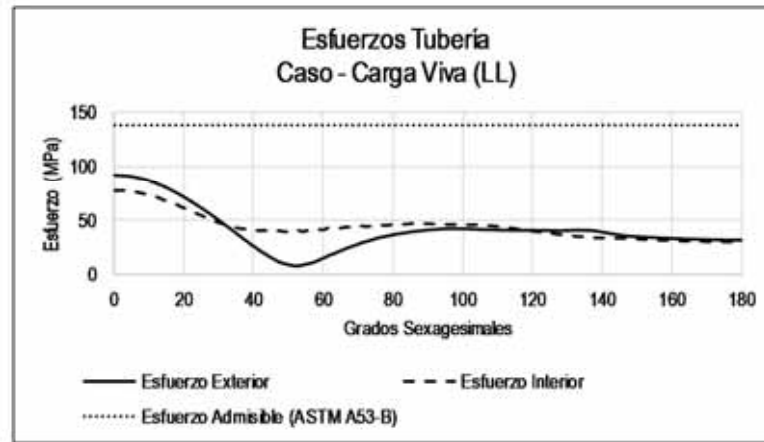
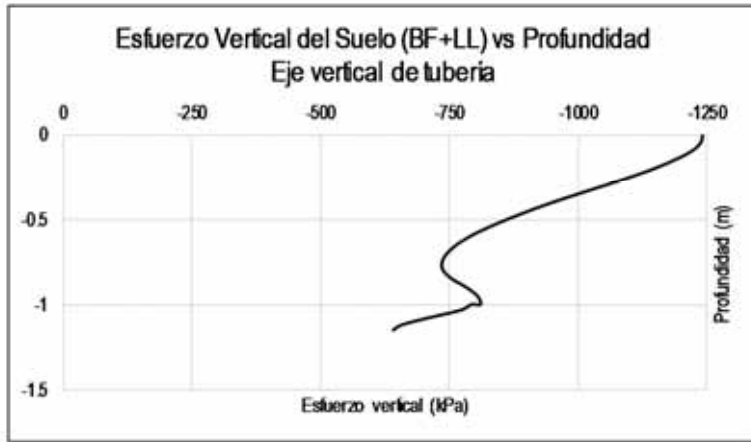
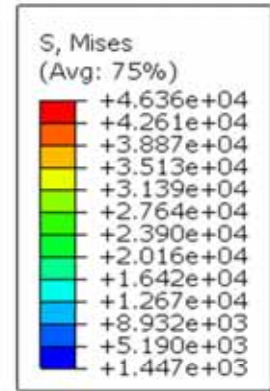
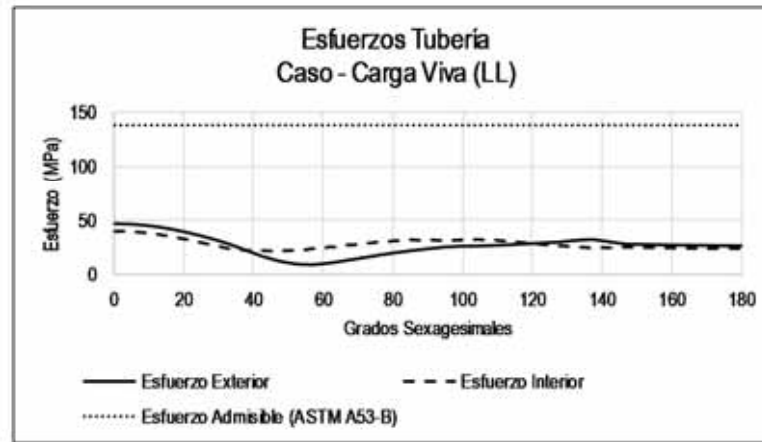


Figura A - 82: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM2-W(48"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)



Deflexión de tubería

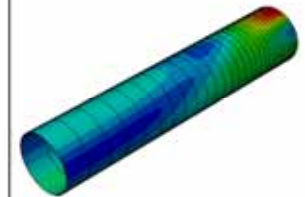
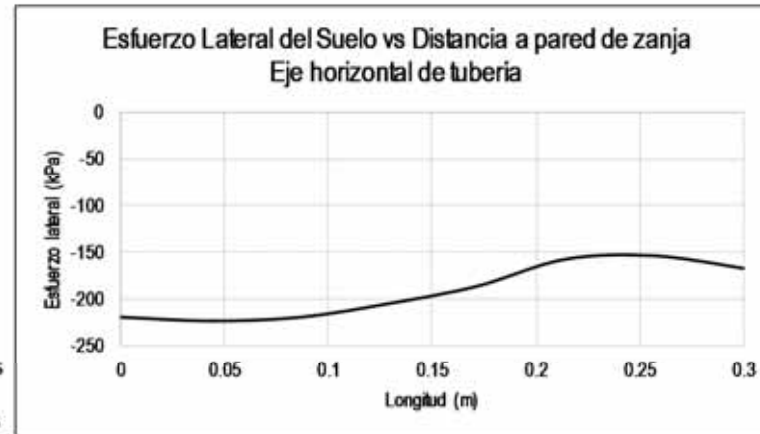
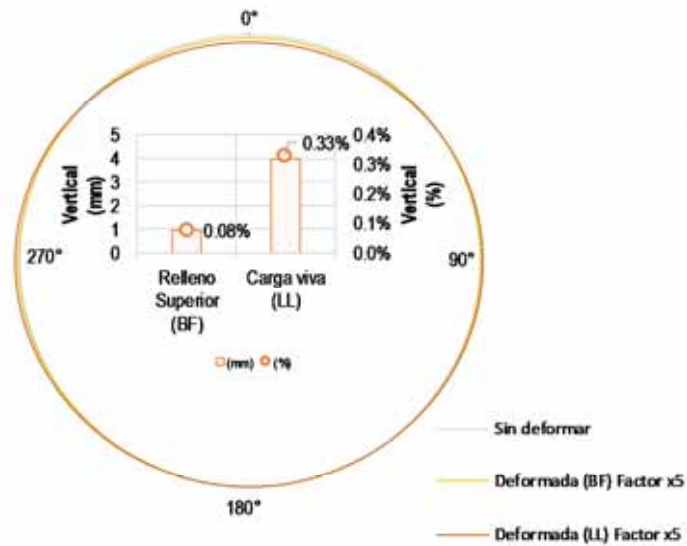


Figura A - 83: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM2-W(48"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

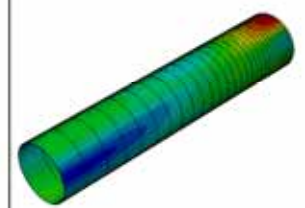
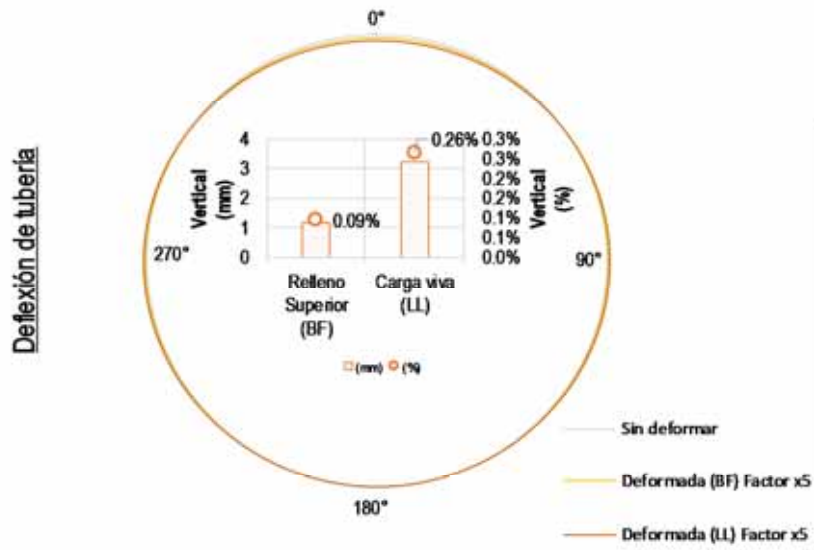
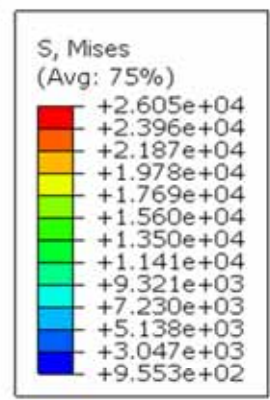
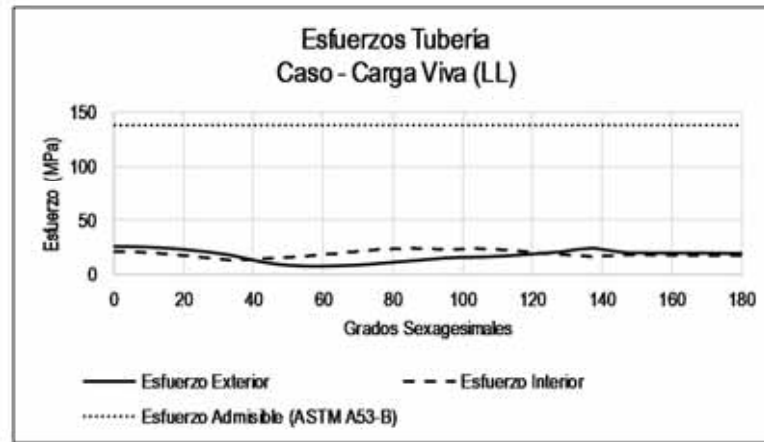


Figura A - 84: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM2-W(48"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

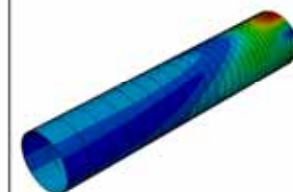
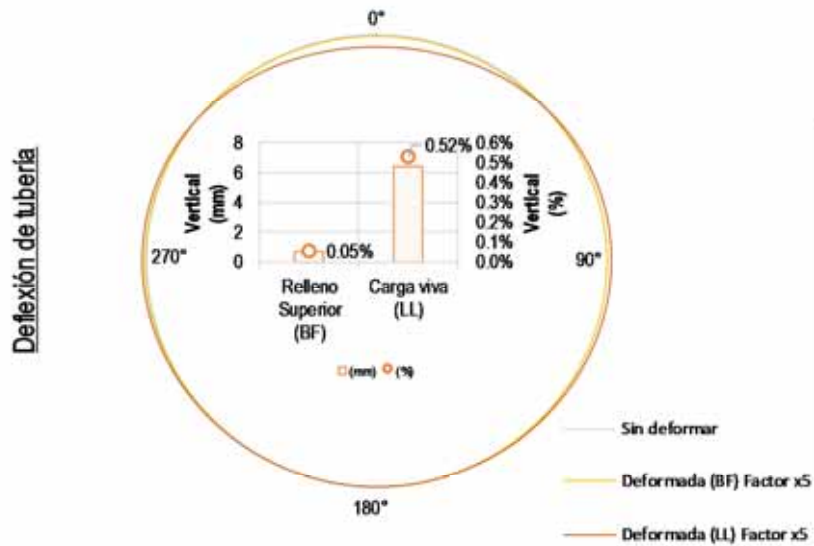
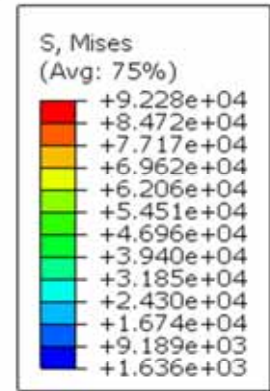
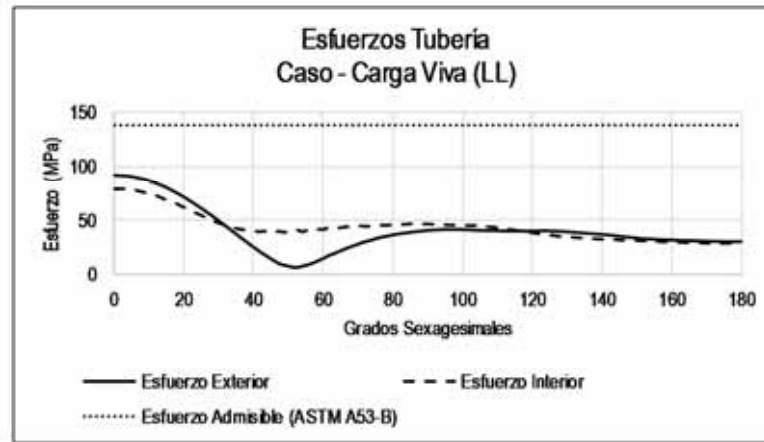
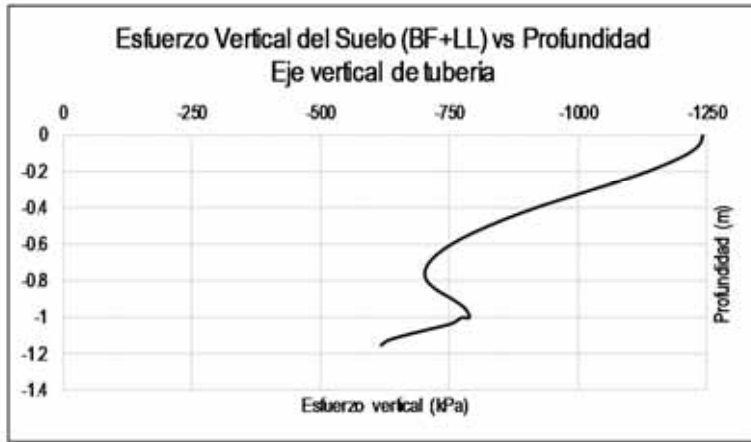


Figura A - 85: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM2-W(48"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

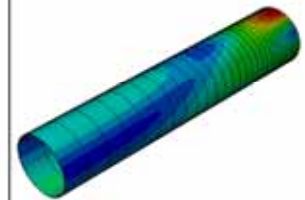
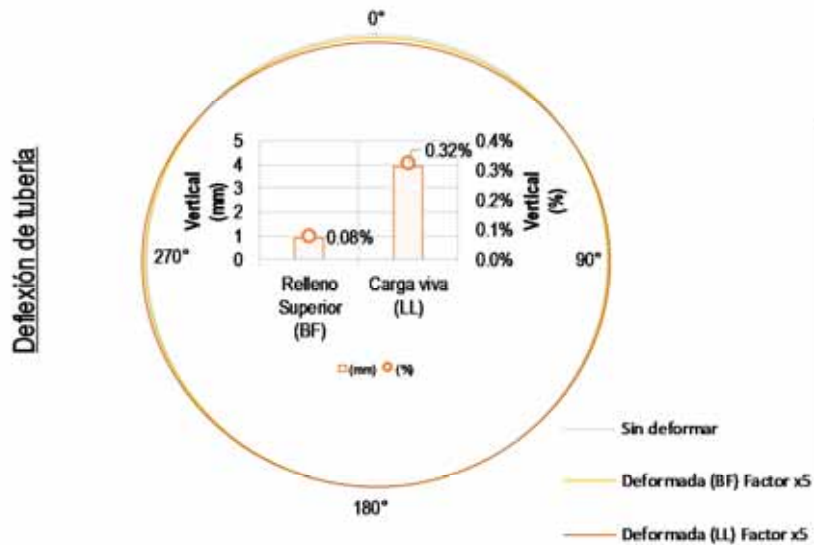
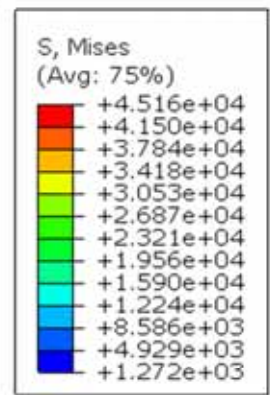
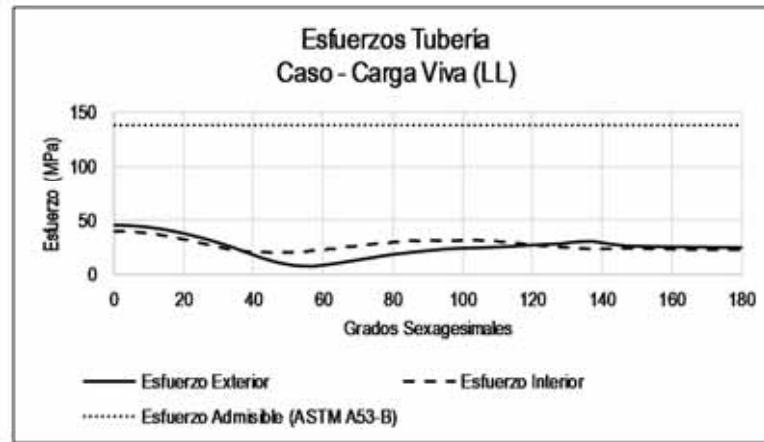


Figura A - 86: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM2-W(48"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

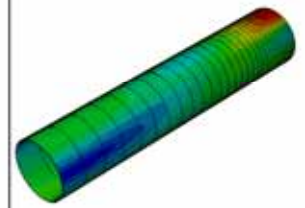
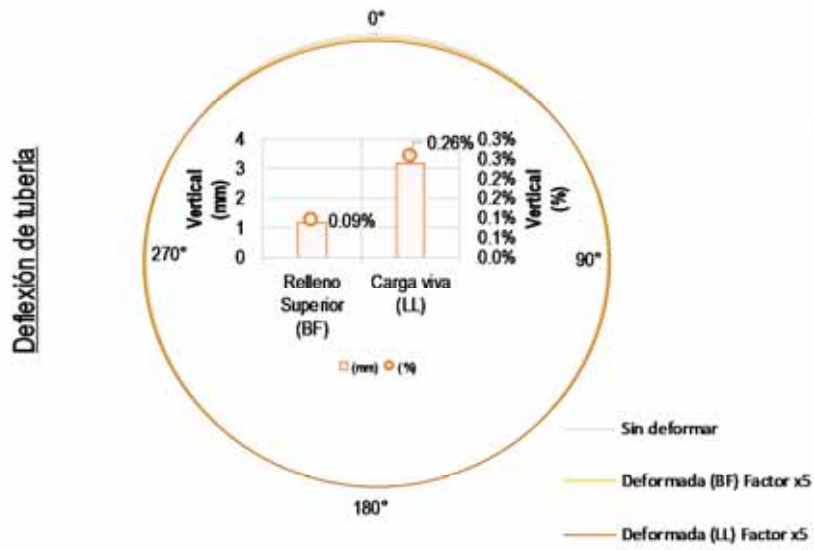
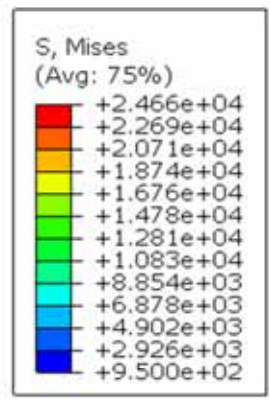
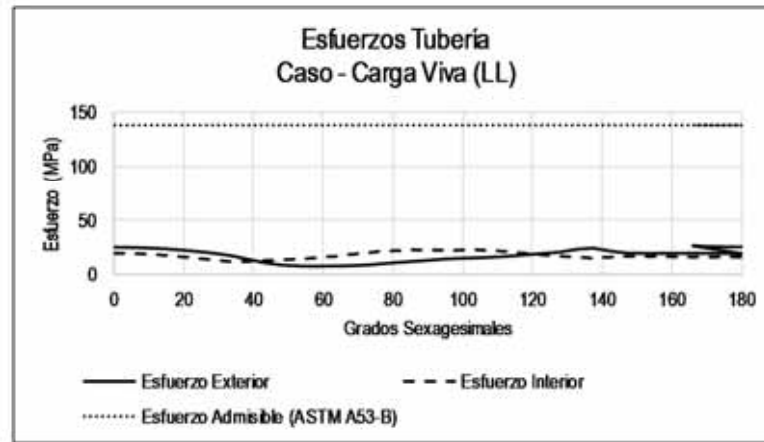


Figura A - 87: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM2-W(48"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

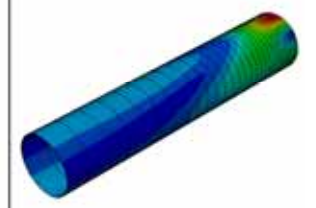
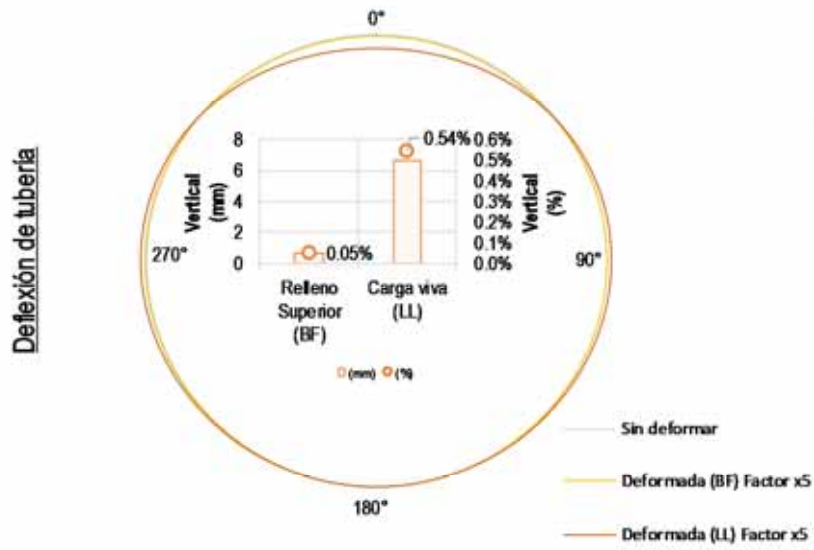
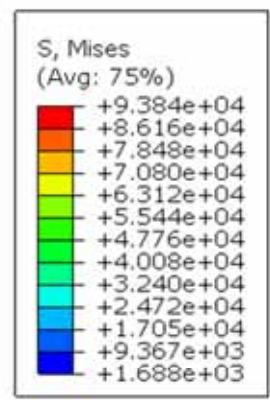
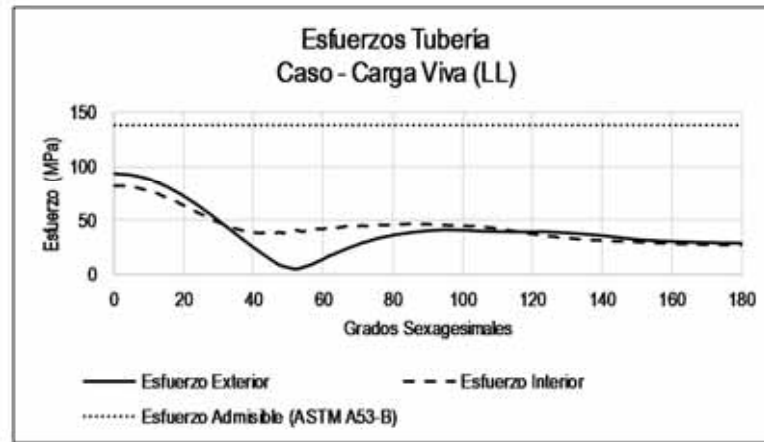
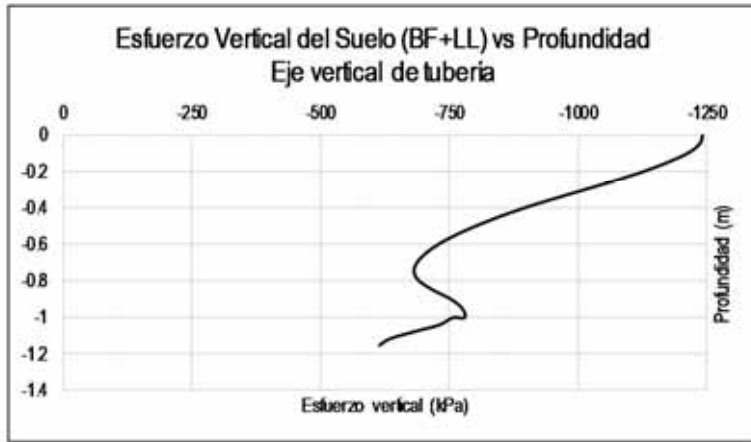


Figura A - 88: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM2-W(48"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

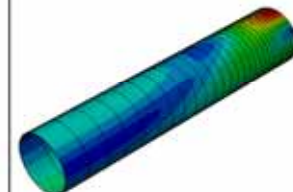
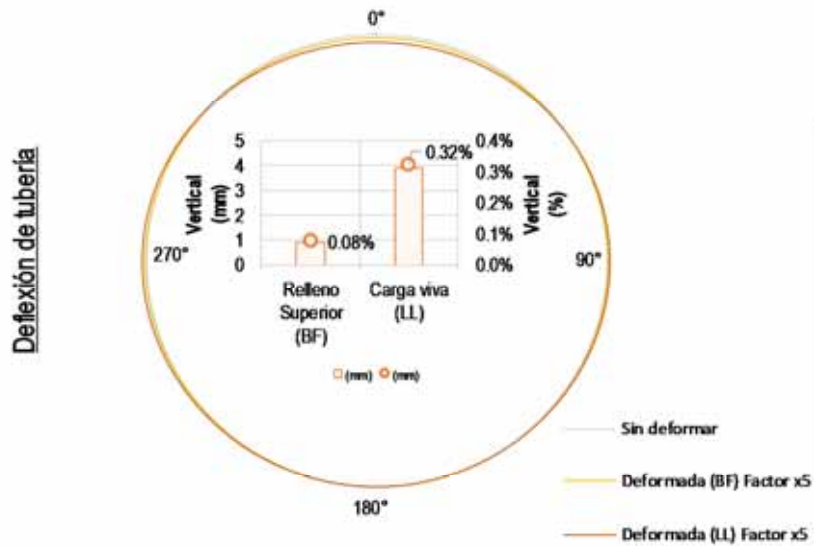
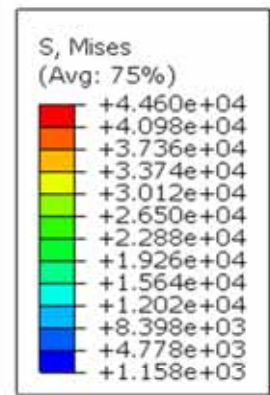
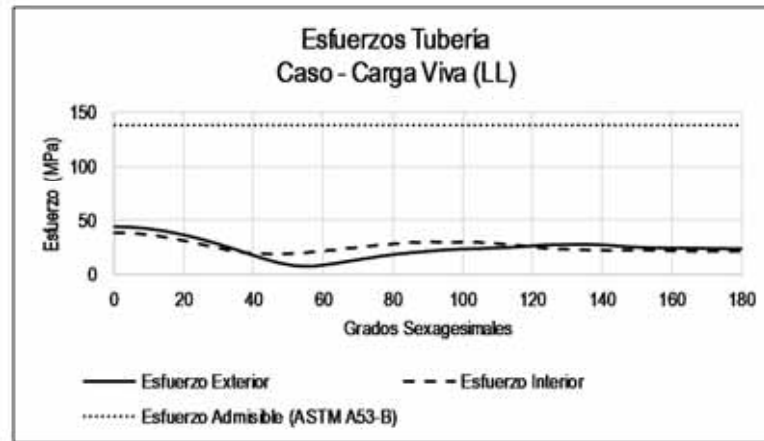


Figura A - 89: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM2-W(48"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

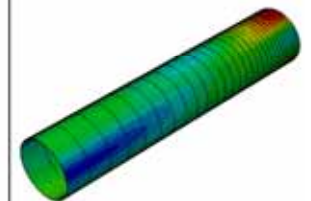
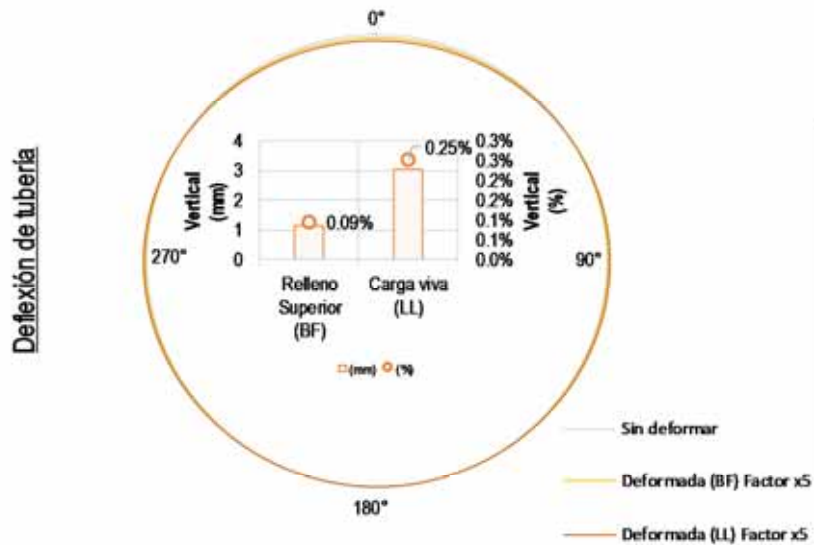
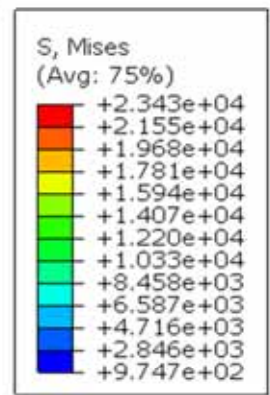
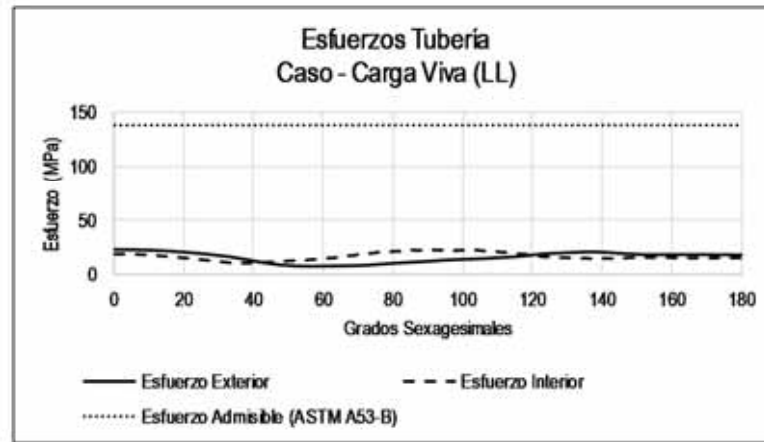
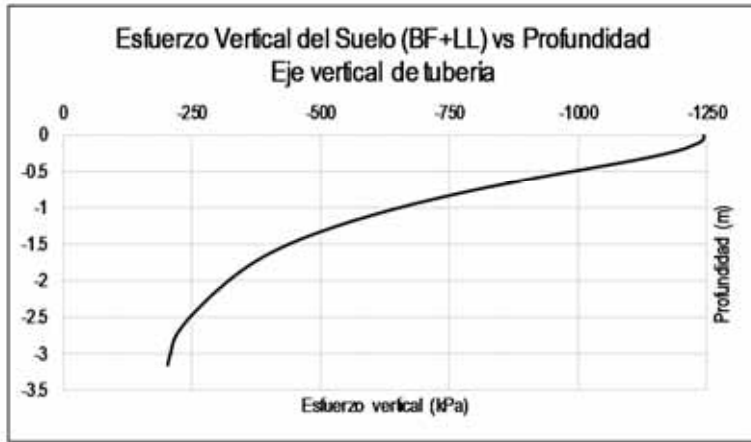


Figura A - 90: T(48"STD)-B(0.15m+1/6x48")-EM2-W(48"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

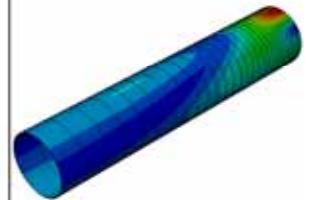
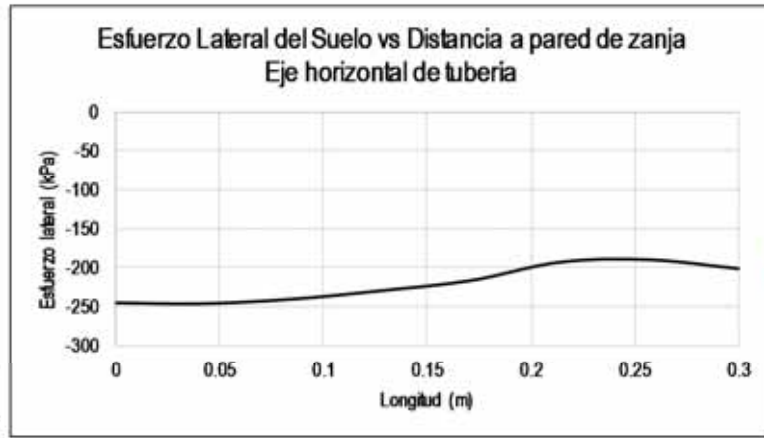
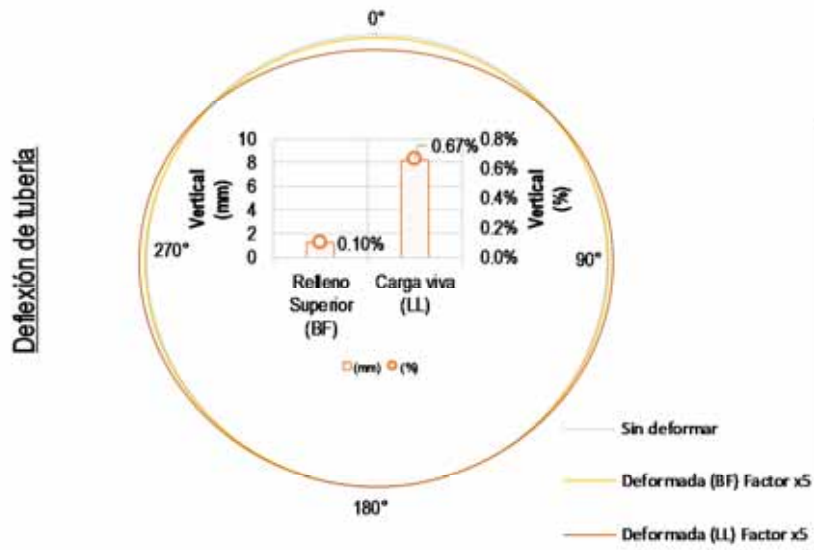
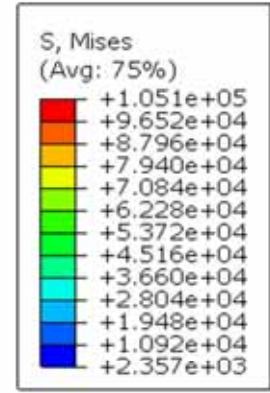
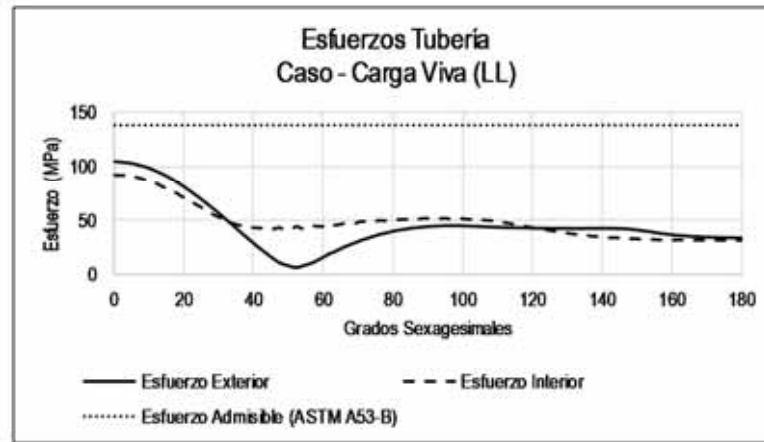
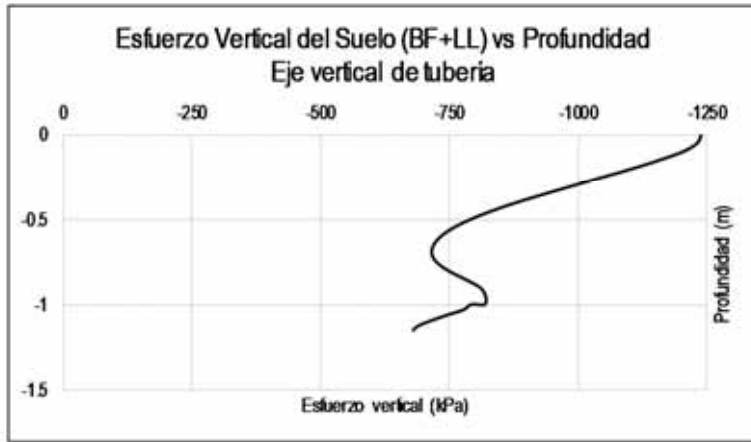


Figura A - 91: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

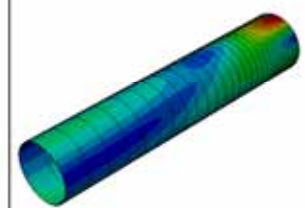
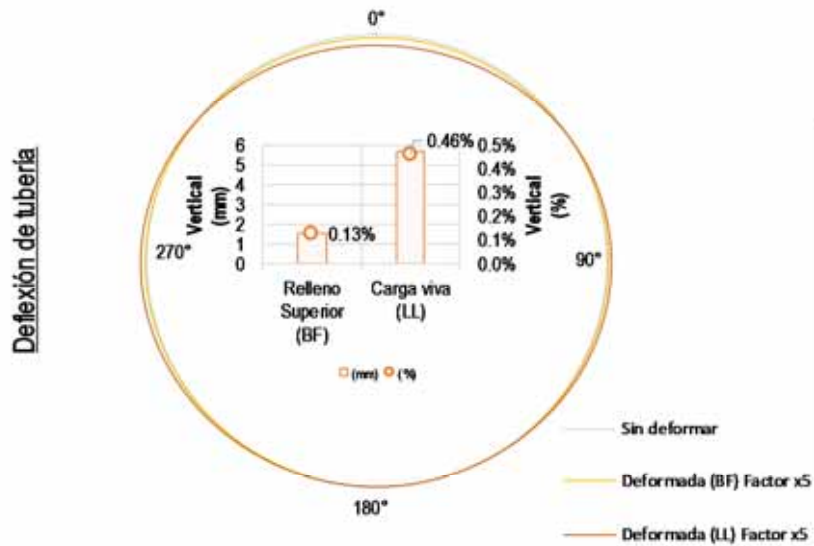
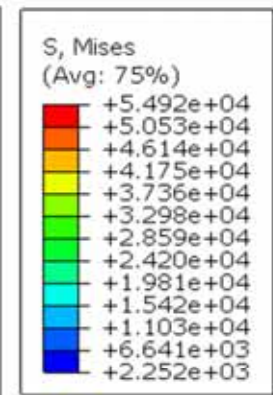
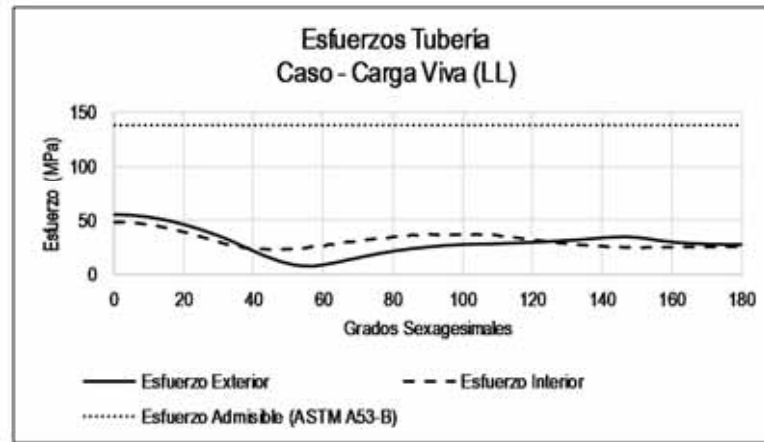


Figura A - 92: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

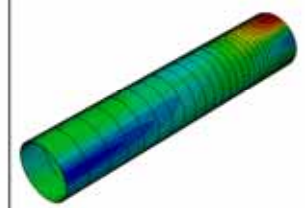
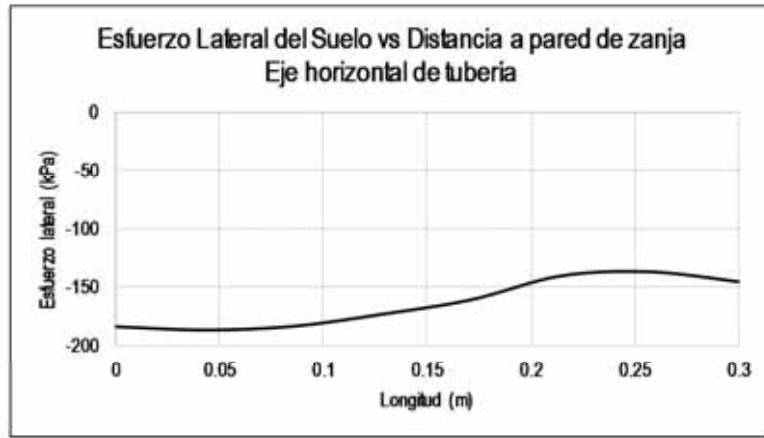
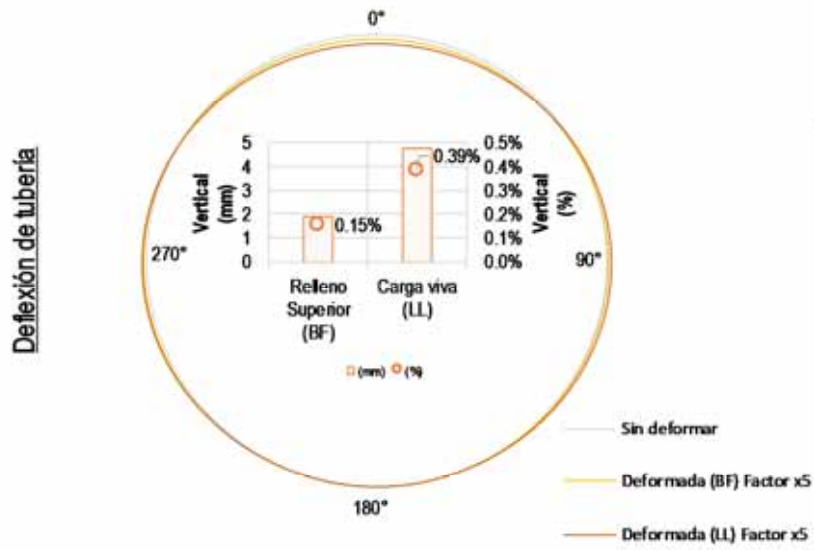
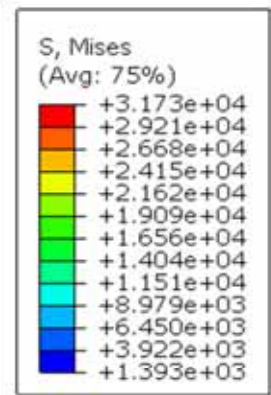
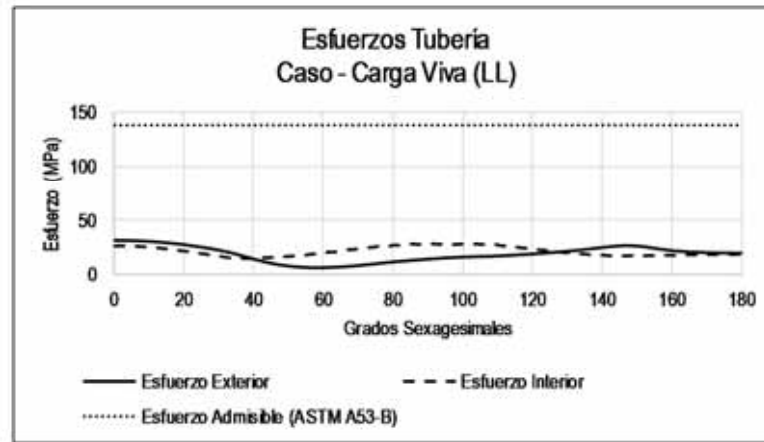


Figura A - 93: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

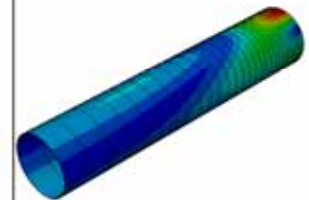
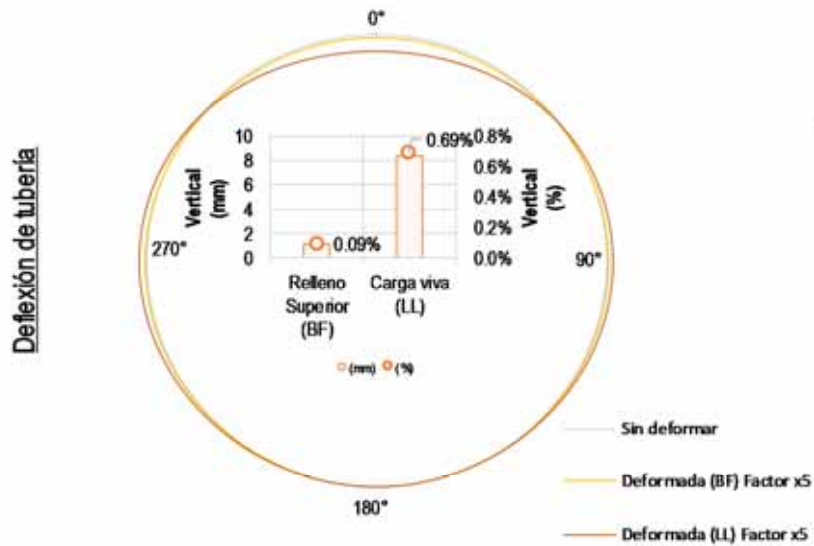
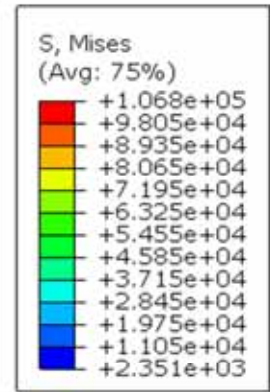
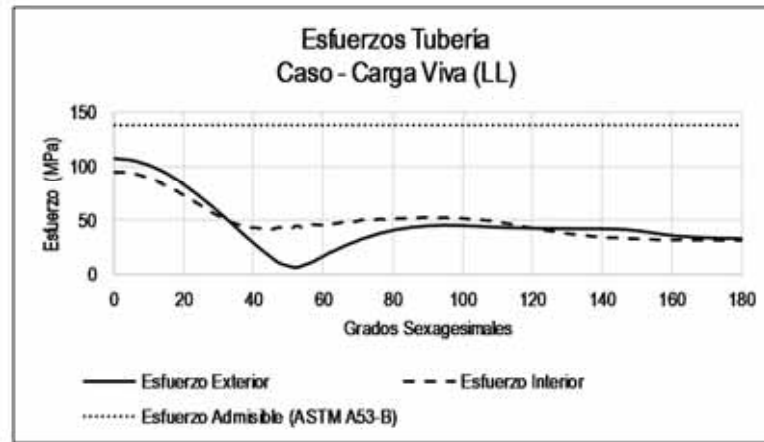
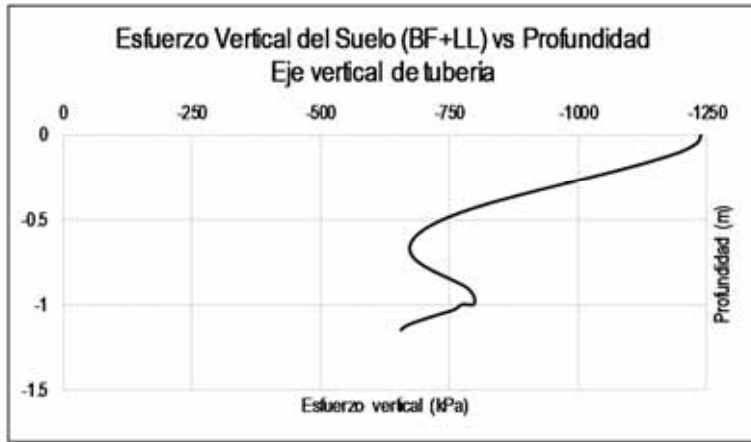


Figura A - 94: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

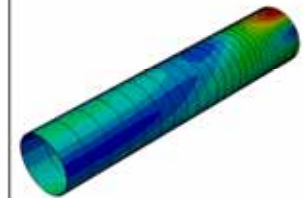
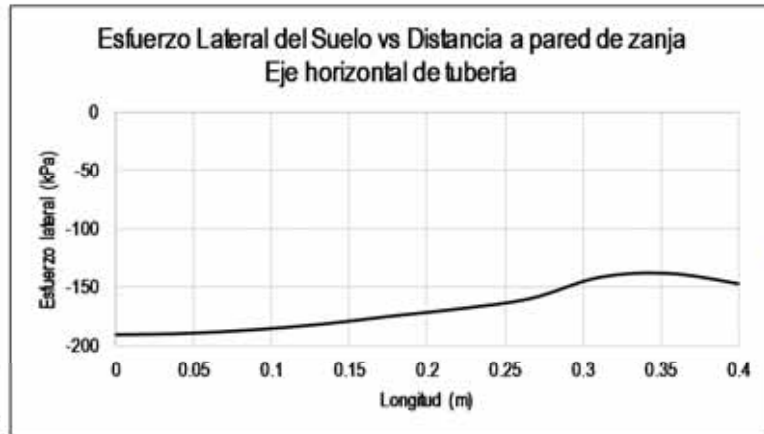
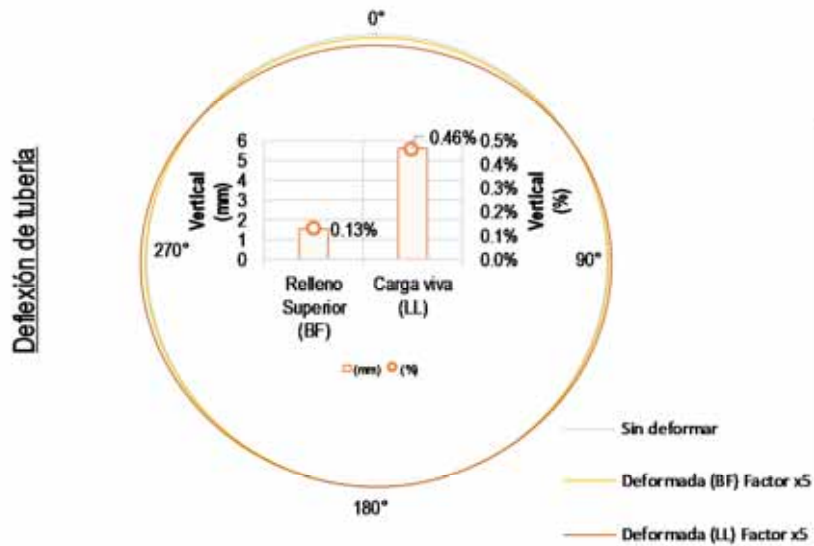
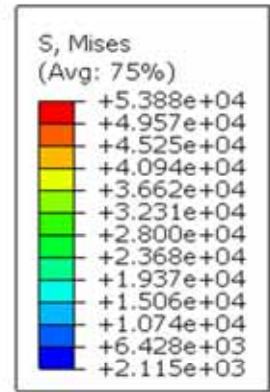
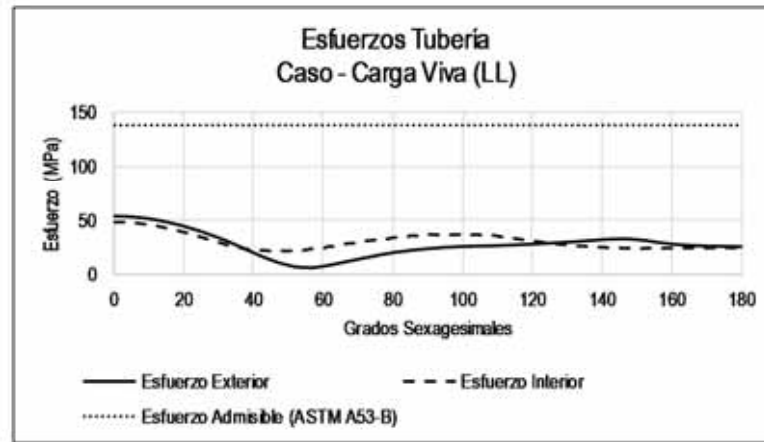


Figura A - 95: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

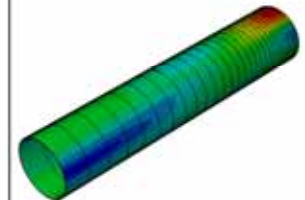
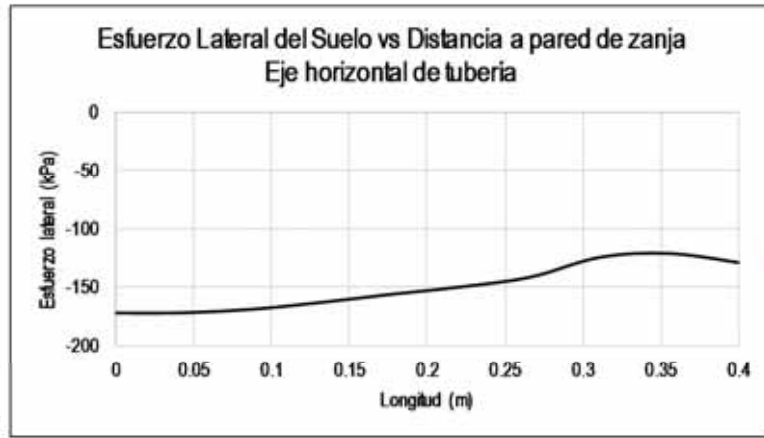
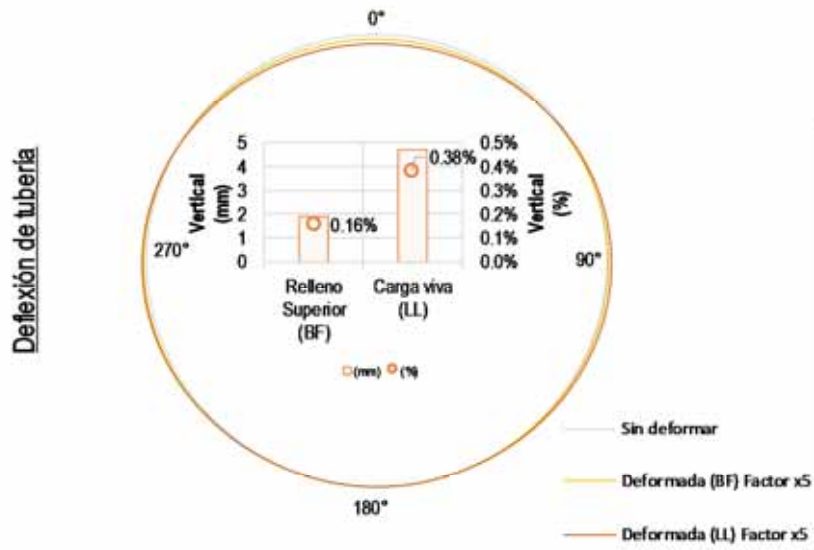
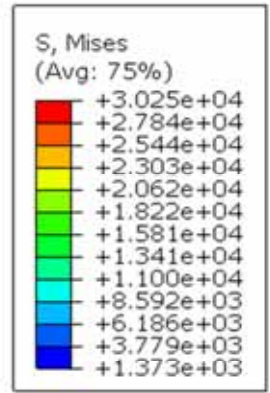
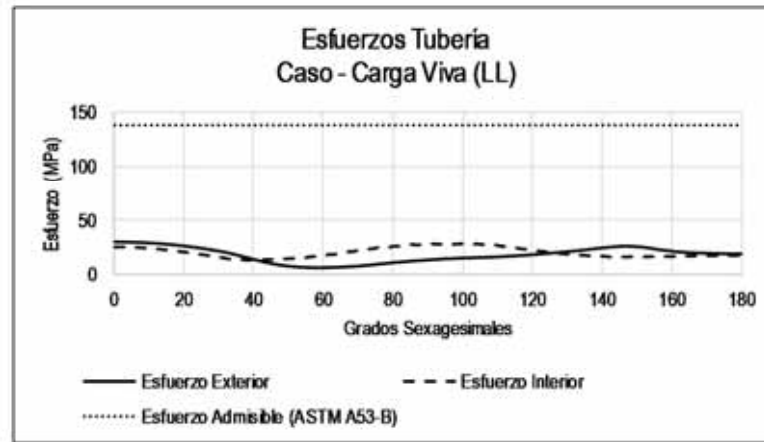


Figura A - 96: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

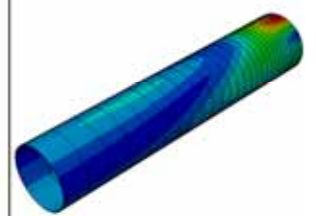
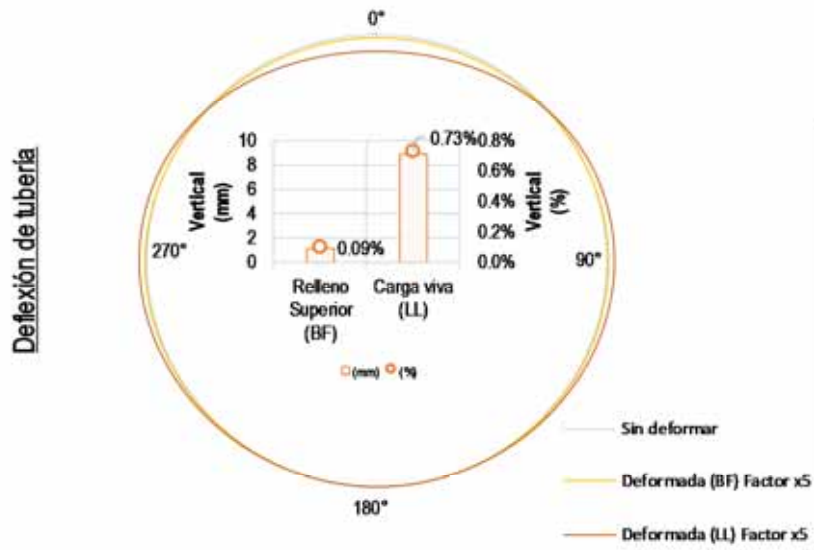
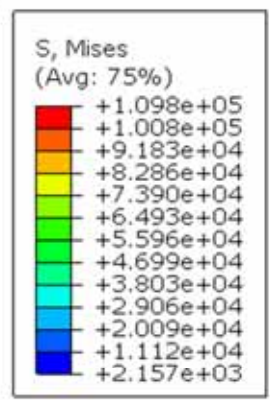
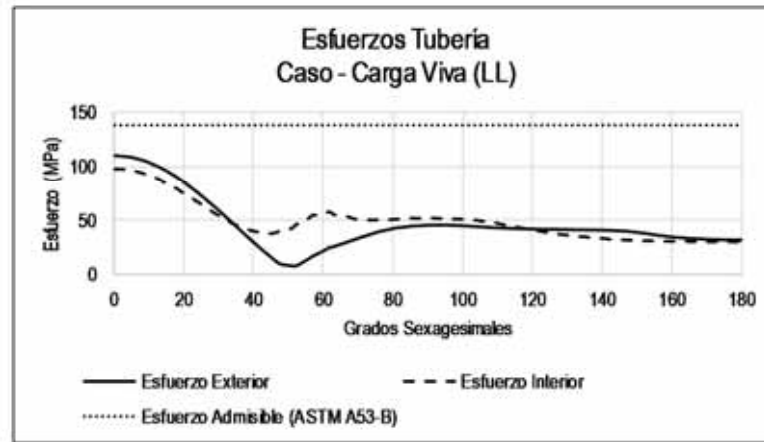
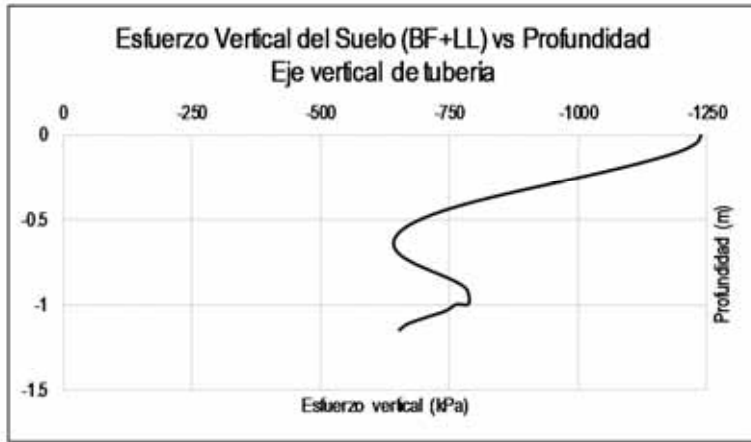


Figura A - 97: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

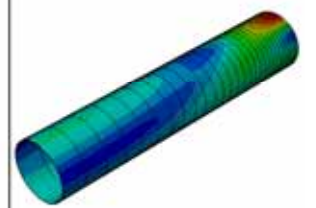
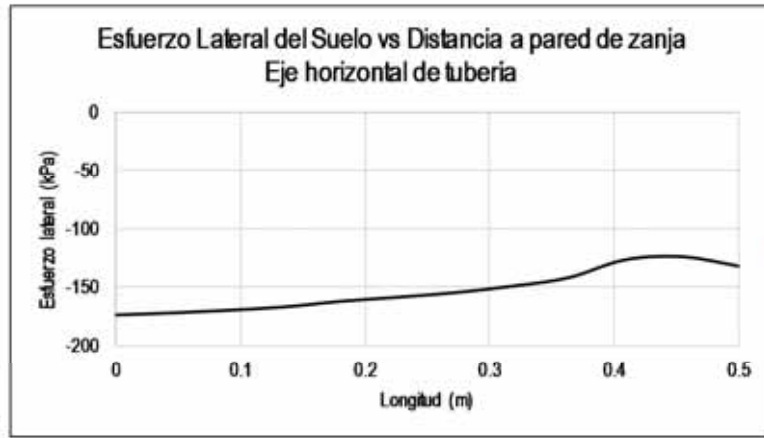
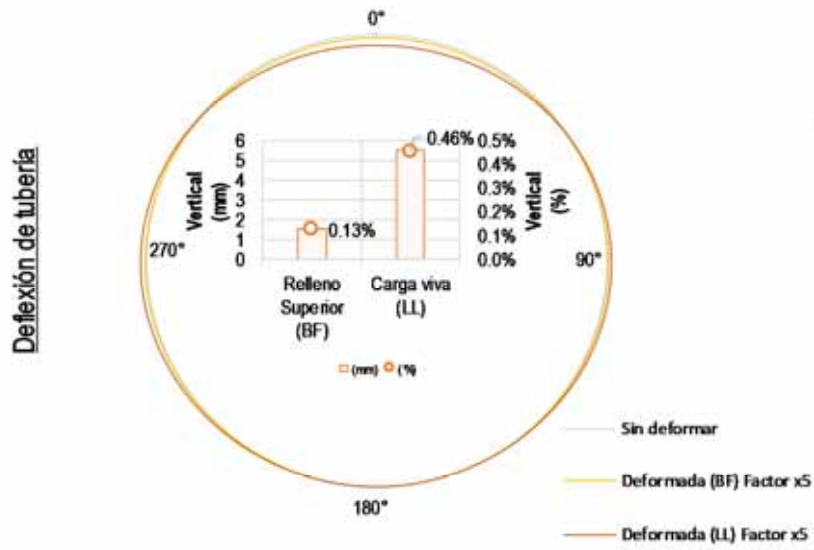
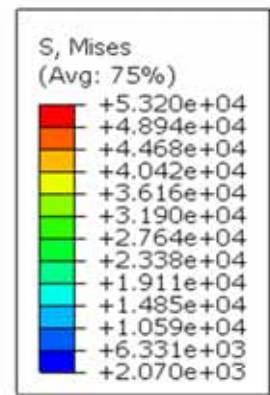
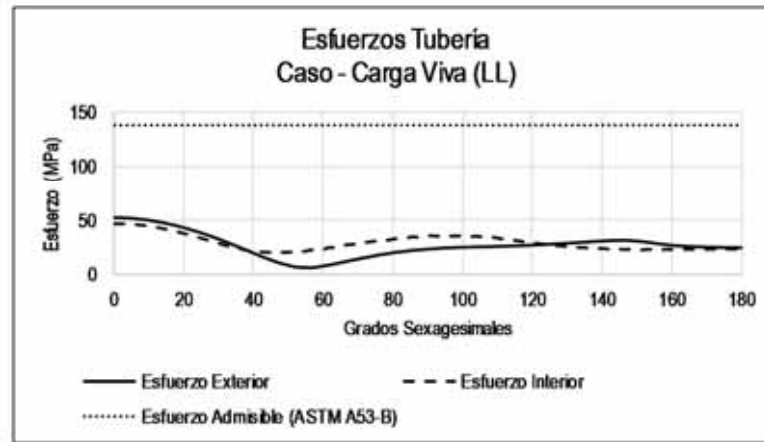


Figura A - 98: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

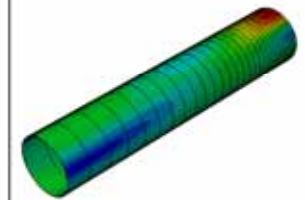
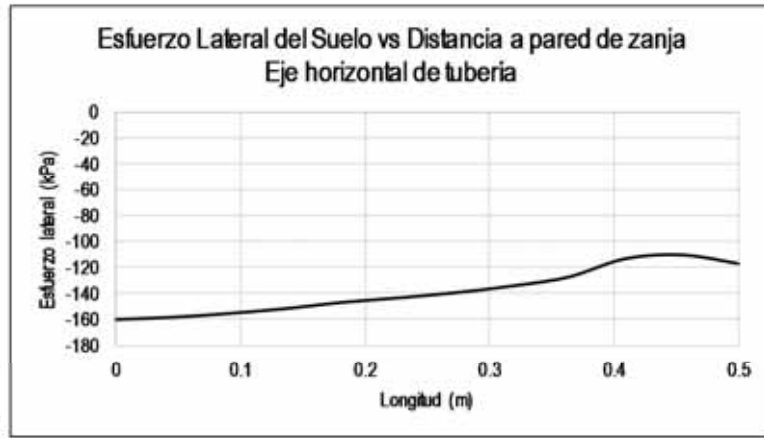
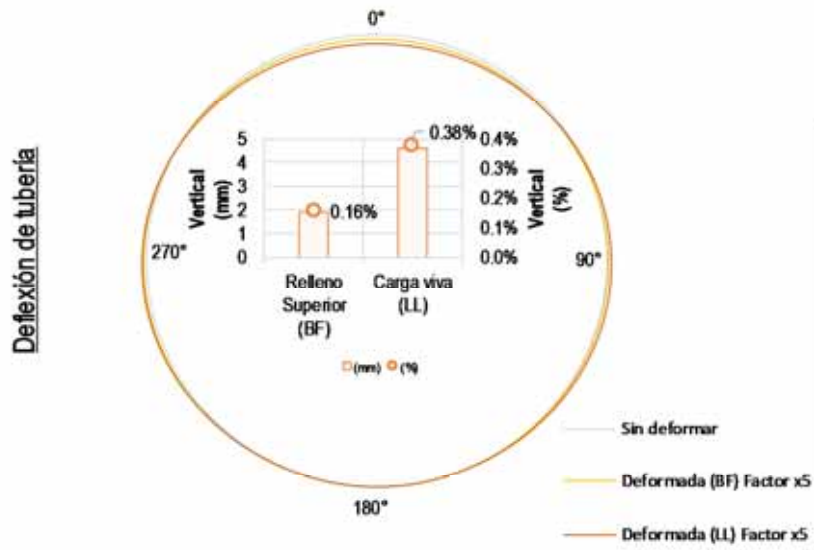
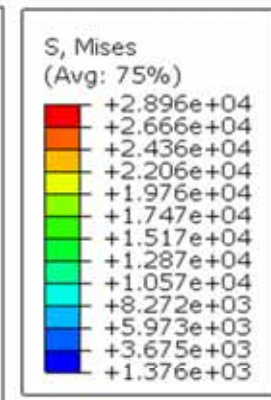
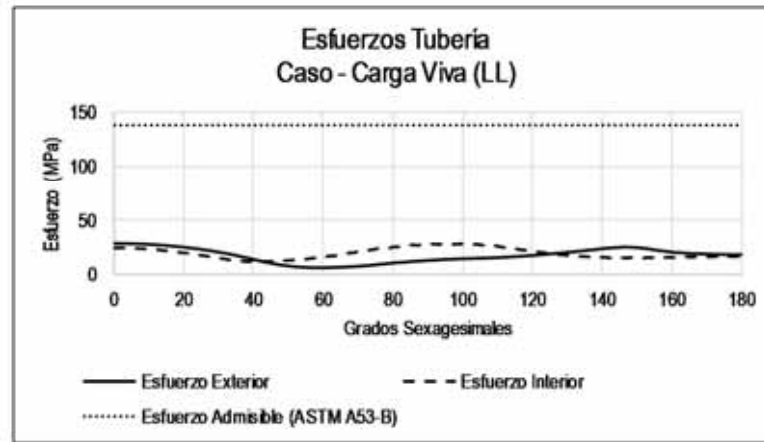
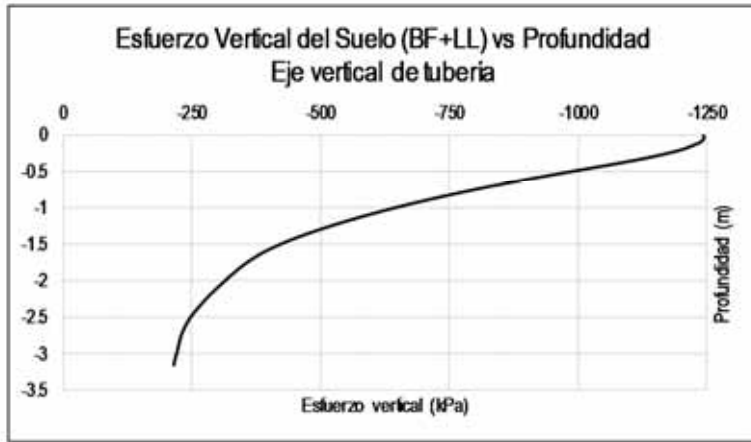


Figura A - 99: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM1-W(48"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

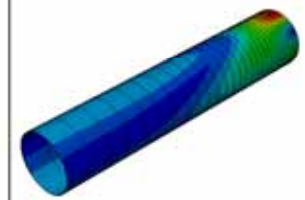
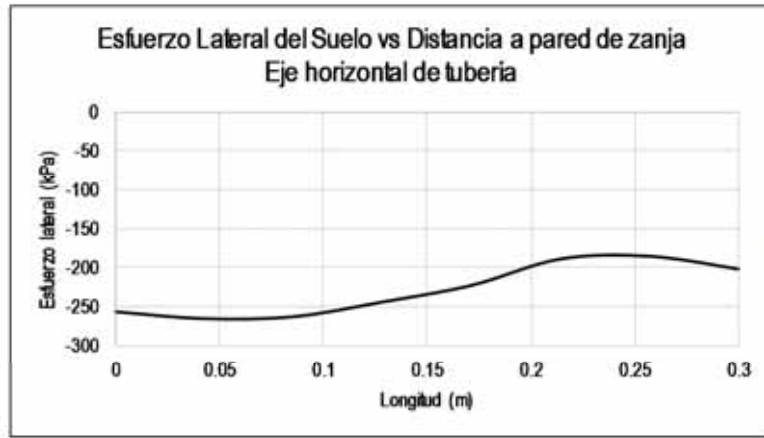
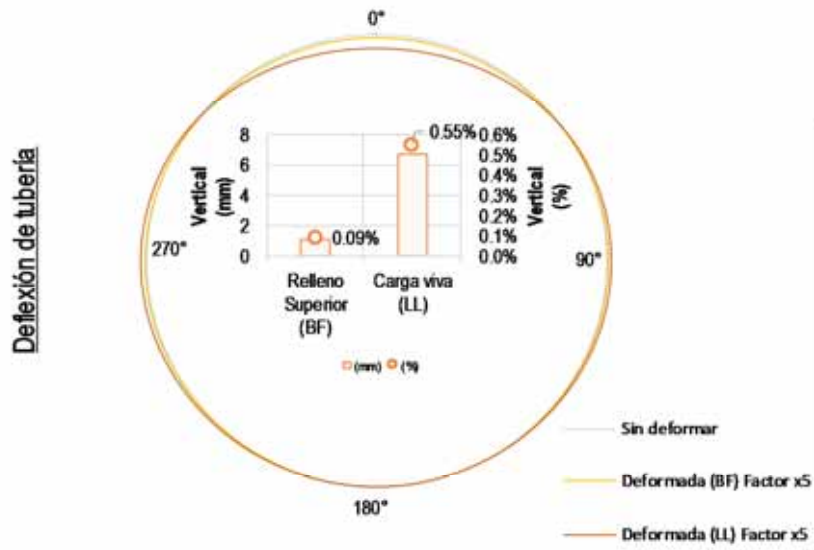
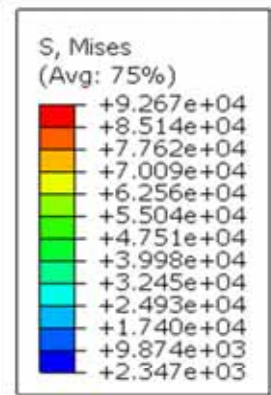
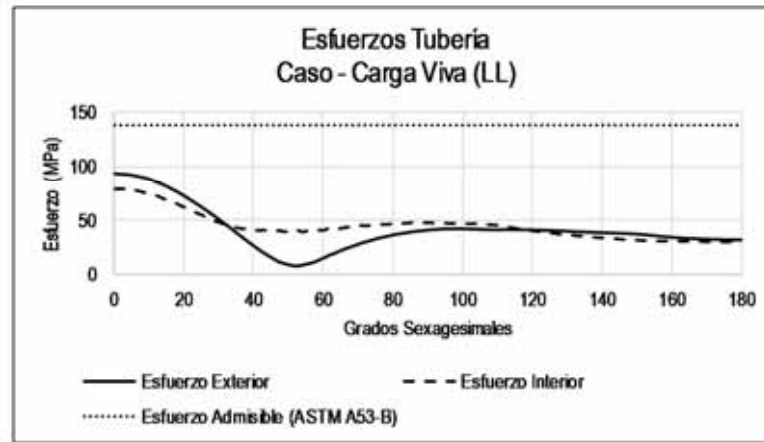
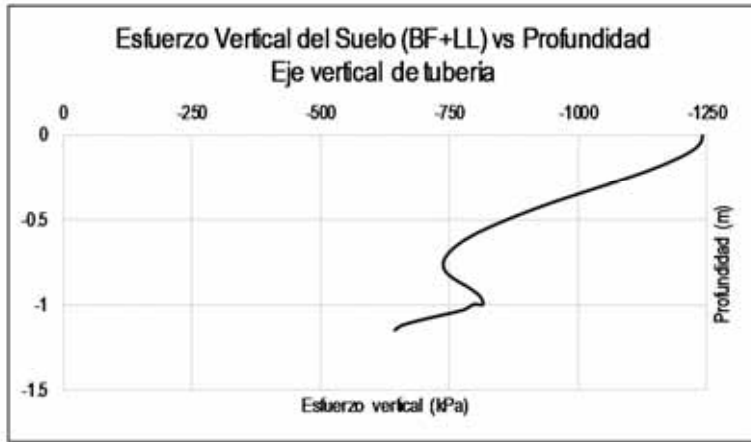


Figura A - 100: T(48°STD)-B(0.15m+1/12x48°)-EM2-W(48°+2x0.3m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

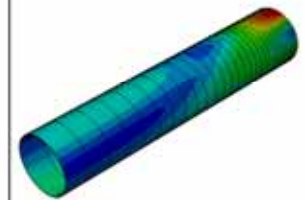
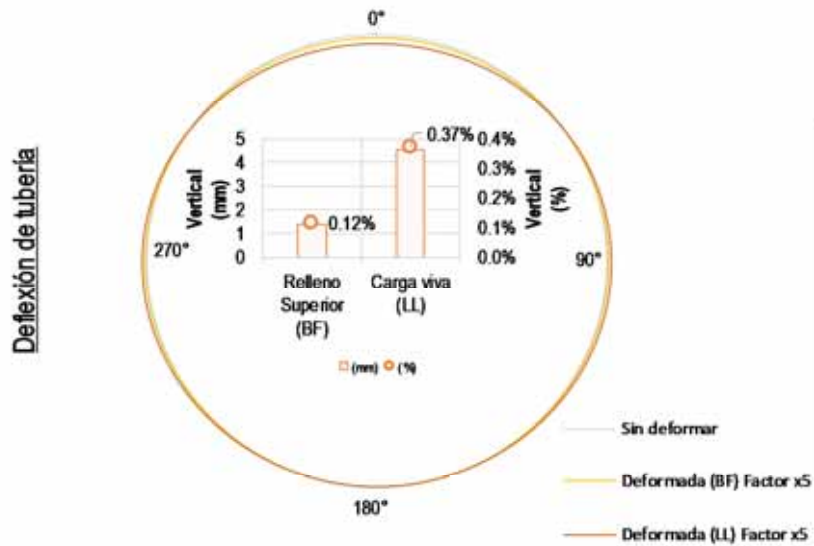
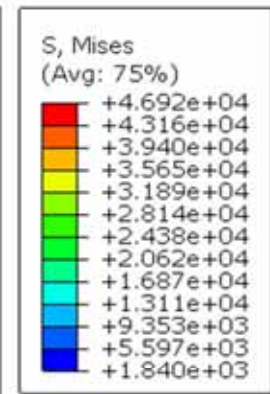
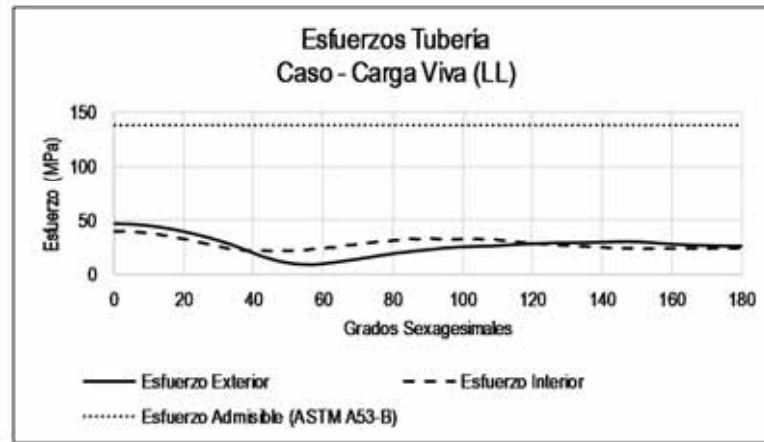


Figura A - 101: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.3m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

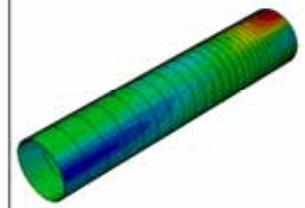
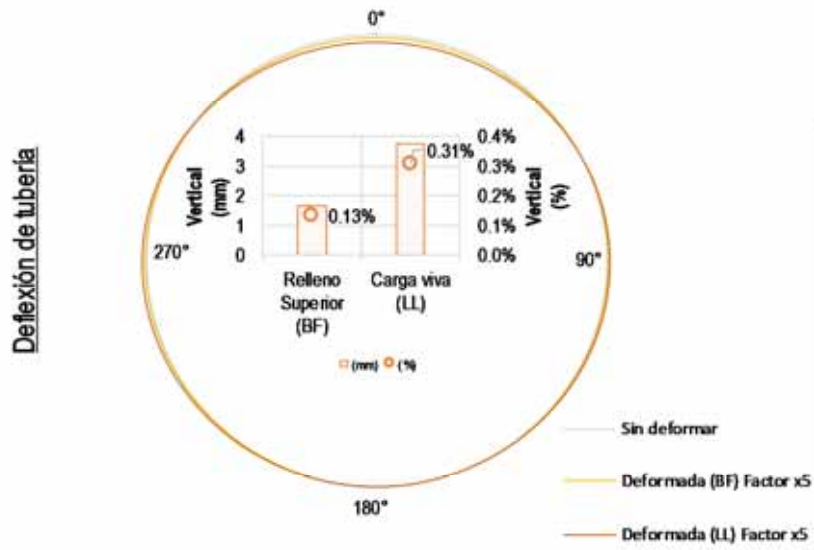
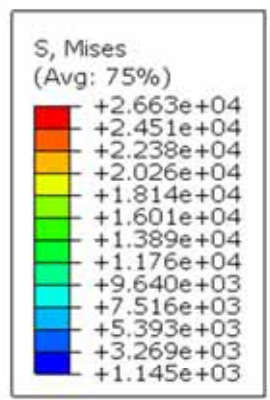
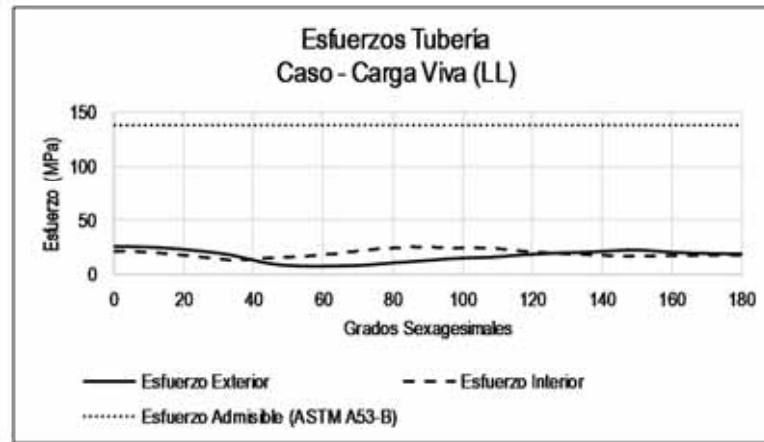
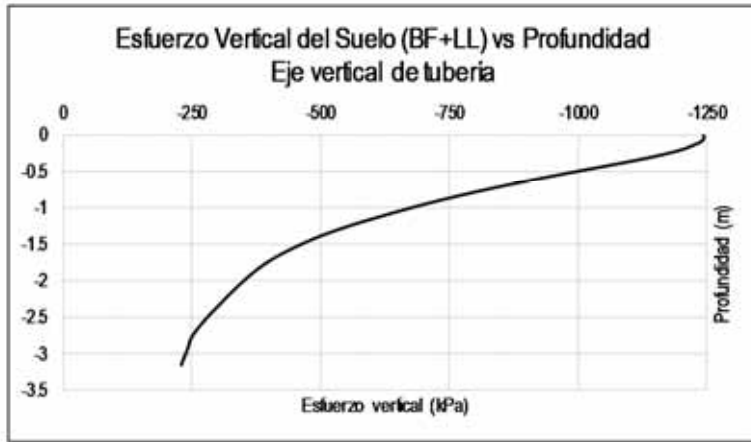
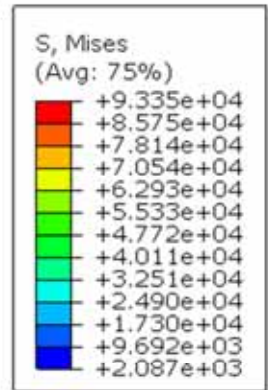
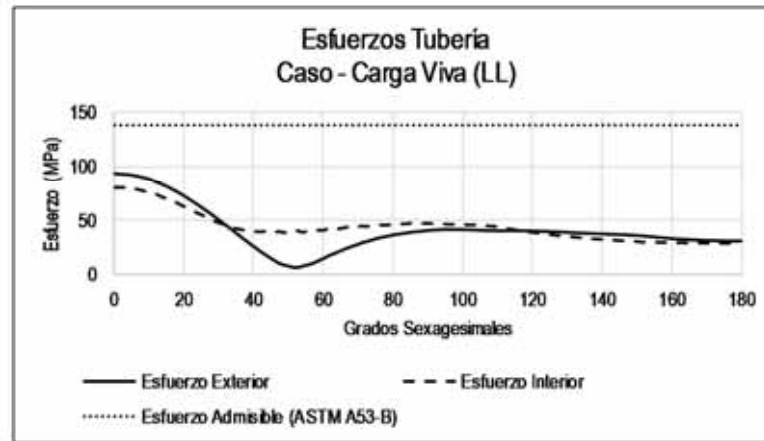
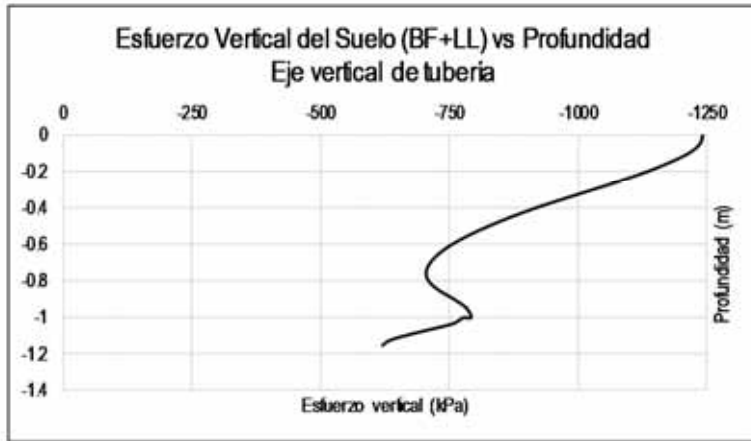


Figura A - 102: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.3m)-H(3m)-LL(CAT-797F)



Deflexión de tubería

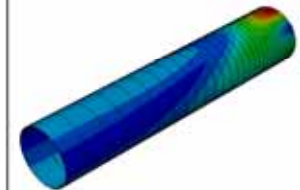
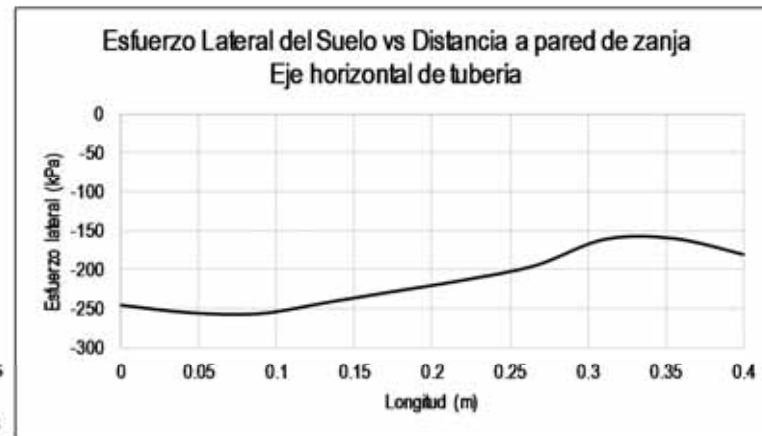
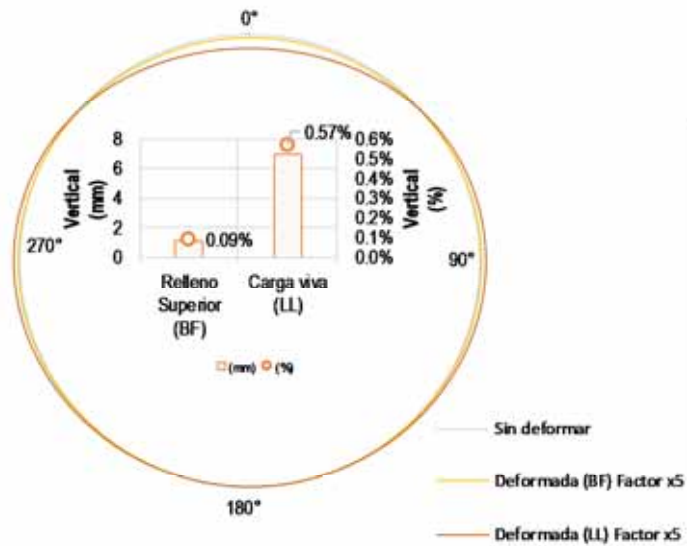


Figura A - 103: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.4m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

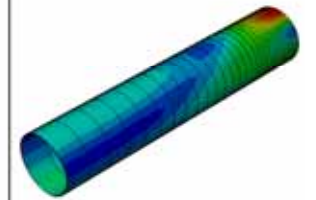
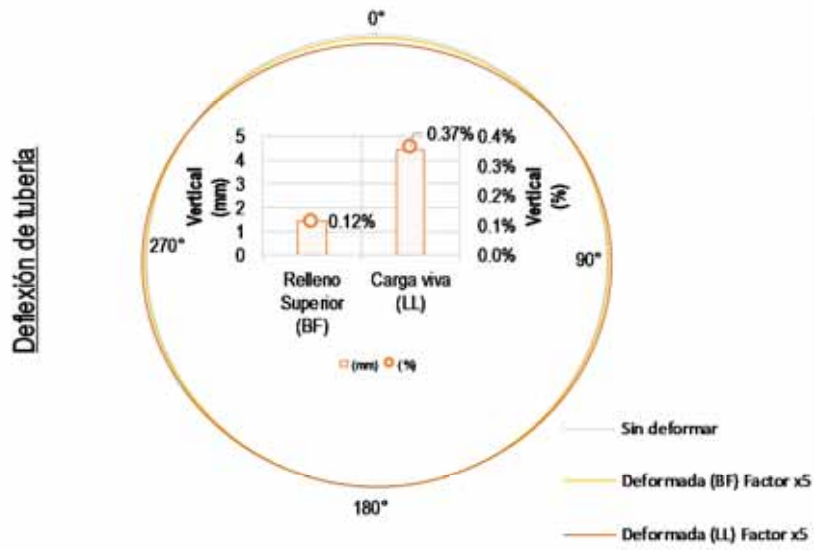
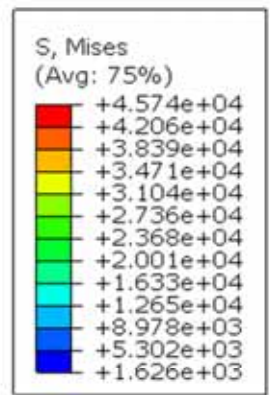
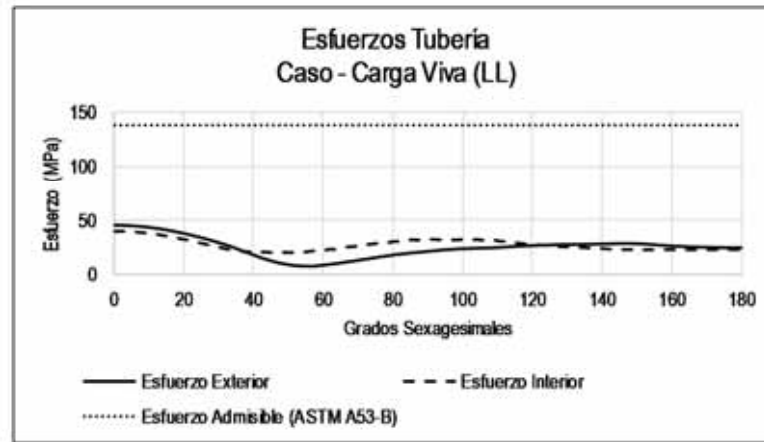


Figura A - 104: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.4m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

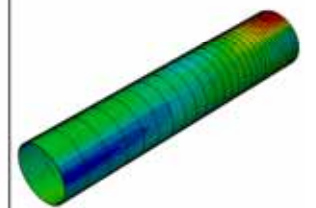
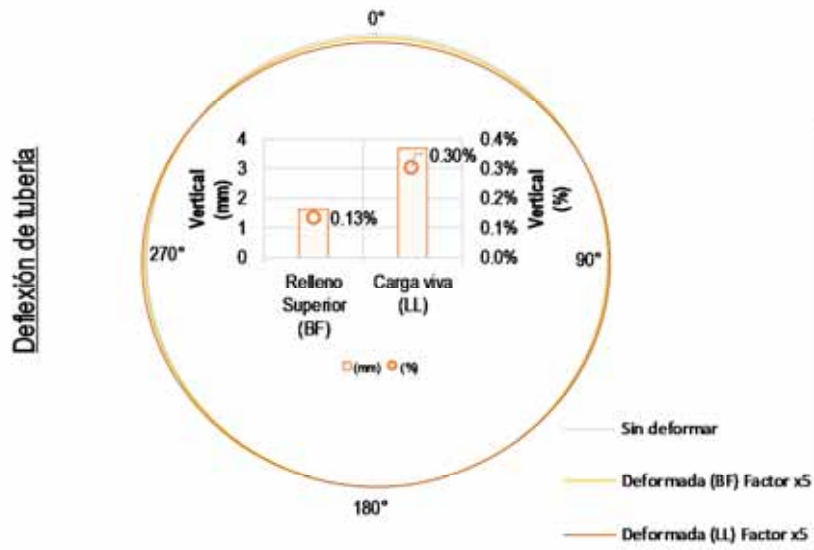
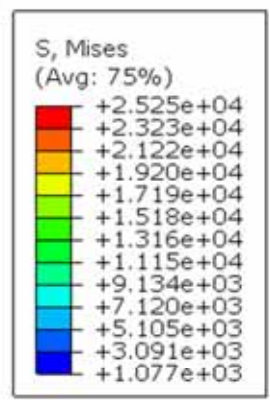
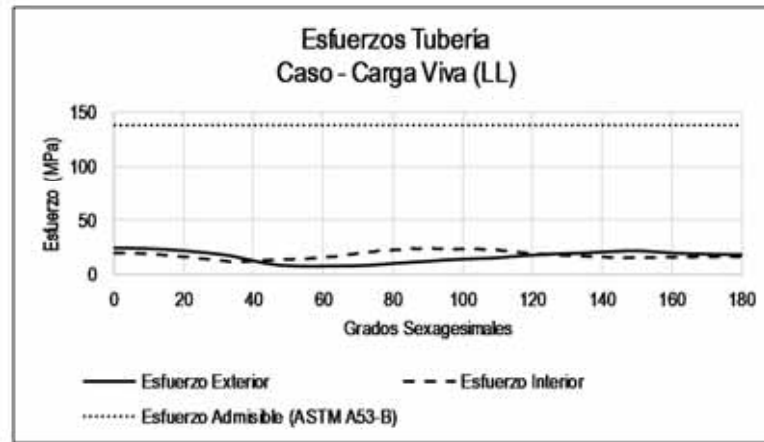


Figura A - 105: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.4m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

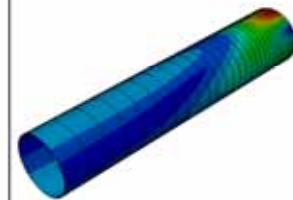
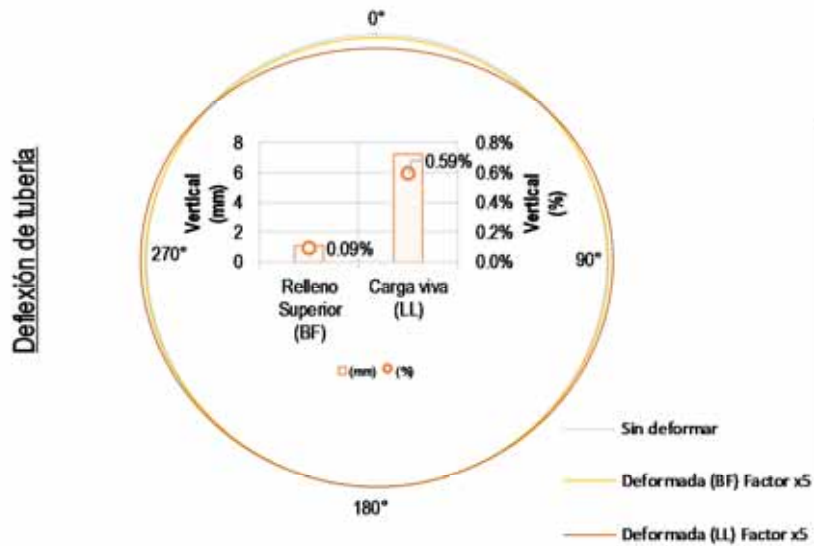
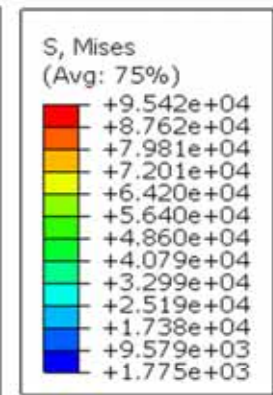
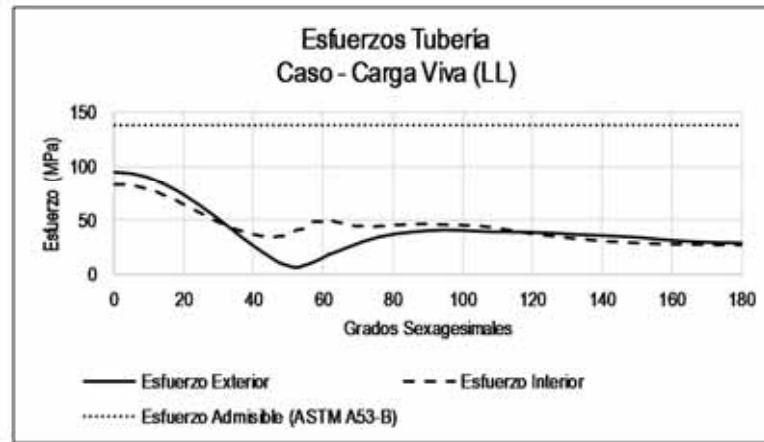
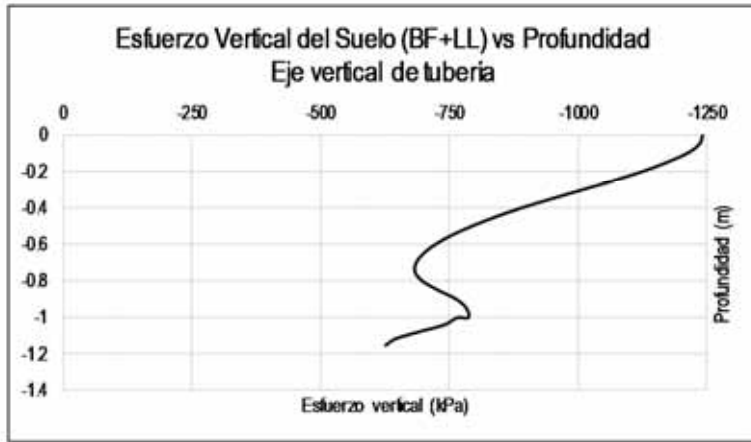


Figura A - 106: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.5m)-H(1m)-LL(CAT-797F)

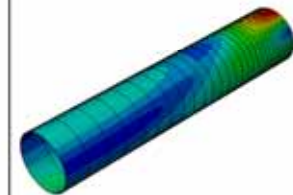
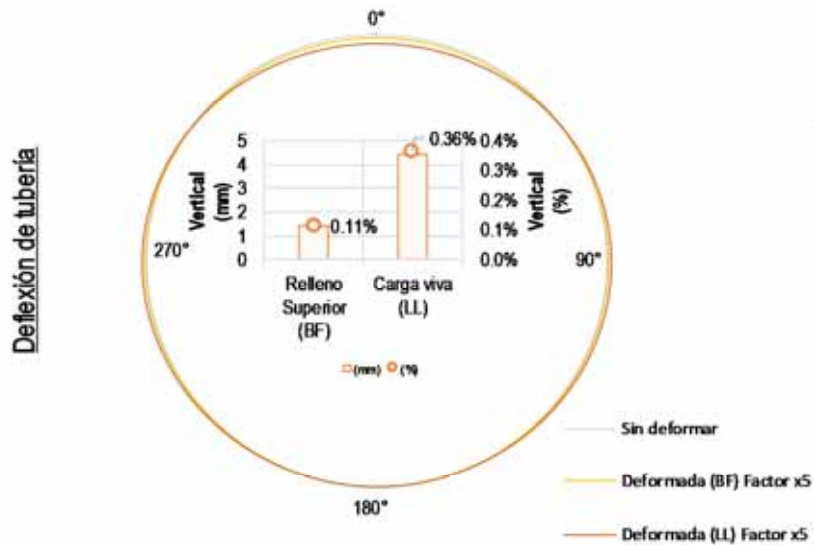
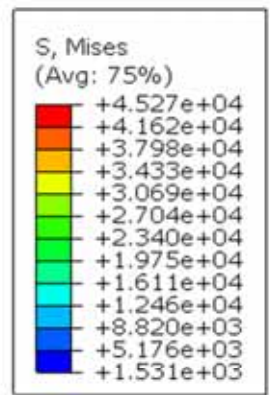
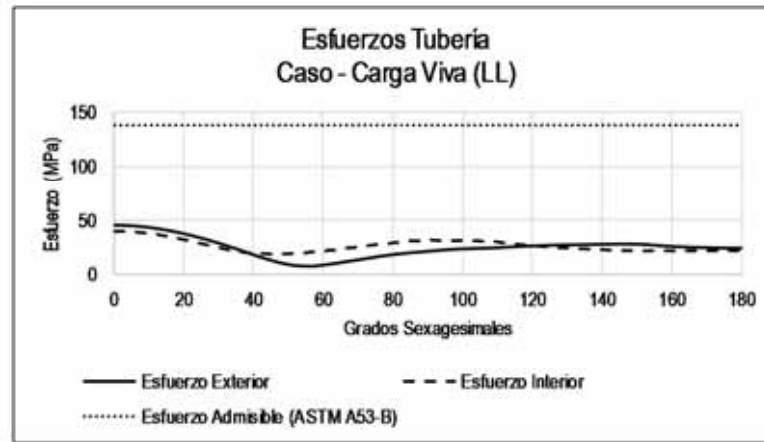


Figura A - 107: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.5m)-H(2m)-LL(CAT-797F)

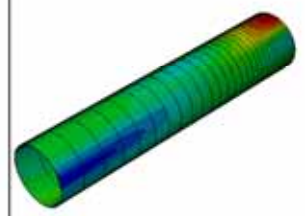
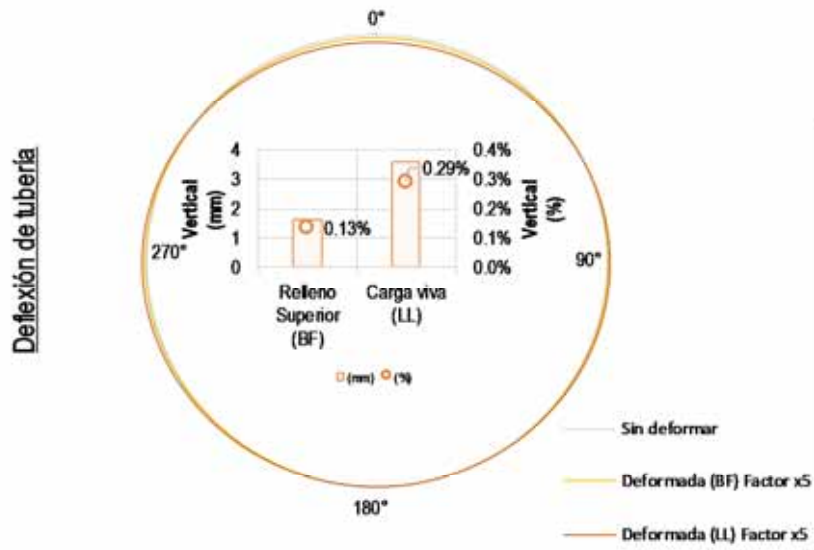
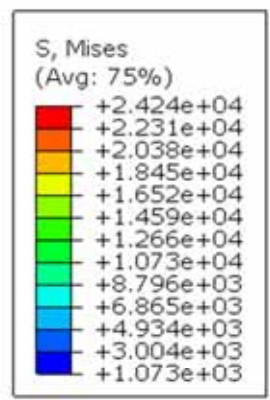
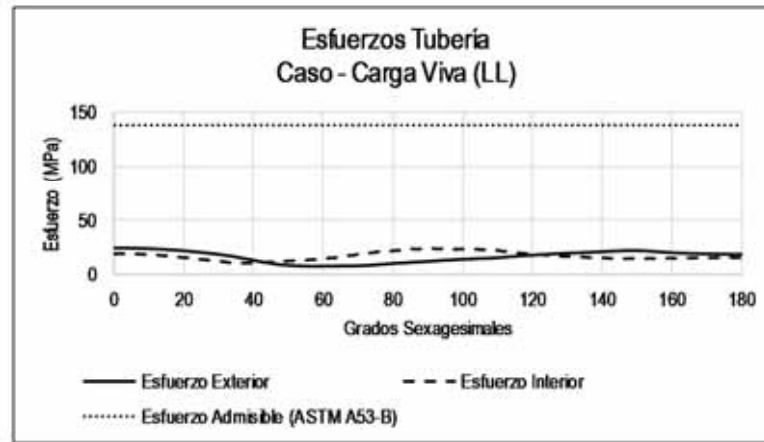


Figura A - 108: T(48"STD)-B(0.15m+1/12x48")-EM2-W(48"+2x0.5m)-H(3m)-LL(CAT-797F)

APÉNDICE B

Resumen de deformaciones y esfuerzos en el tope de las tuberías de 36", 42" y 48"

Deformaciones y esfuerzos sobre tubería de 36" STD ASTM A53-B

Altura de cama "c" de 1/6 de 36"				
		Ancho (metros)		
		Deformaciones a 0° (% $\Delta y/OD$)		
		0.3m	0.4m	0.5m
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	0.68%	0.69%	0.71%
	2m/EM1	0.49%	0.47%	0.45%
	3m/EM1	0.38%	0.37%	0.36%
	1m/EM2	0.55%	0.55%	0.57%
	2m/EM2	0.37%	0.35%	0.34%
	3m/EM2	0.29%	0.27%	0.26%
Esfuerzos a 0° (MPa)				
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	105.67	103.99	104.15
	2m/EM1	58.12	54.99	52.54
	3m/EM1	34.25	31.82	29.80
	1m/EM2	92.00	90.20	90.27
	2m/EM2	48.98	45.98	43.90
	3m/EM2	27.58	25.60	23.80

Altura de cama "c" de 1/12 de 36"				
		Ancho (metros)		
		Deformaciones a 0° (% $\Delta y/OD$)		
		0.3m	0.4m	0.5m
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	0.73%	0.74%	0.76%
	2m/EM1	0.53%	0.51%	0.50%
	3m/EM1	0.53%	0.41%	0.40%
	1m/EM2	0.57%	0.58%	0.59%
	2m/EM2	0.40%	0.38%	0.37%
	3m/EM2	0.31%	0.30%	0.29%
Esfuerzos a 0° (MPa)				
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	107.58	106.08	106.10
	2m/EM1	59.53	56.39	54.02
	3m/EM1	27.85	32.65	30.81
	1m/EM2	92.55	91.04	91.05
	2m/EM2	49.50	46.50	44.43
	3m/EM2	28.07	25.98	24.23

 Ruta de tendencias de esfuerzos (Se lee de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha)

Deformaciones y esfuerzos sobre tubería de 42" STD ASTM A53-B

Altura de cama "c" de 1/6 de 42"				
		Ancho (metros)		
		Deformaciones a 0° (% $\Delta y/OD$)		
		0.3m	0.4m	0.5m
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	0.64%	0.65%	0.69%
	2m/EM1	0.44%	0.43%	0.43%
	3m/EM1	0.35%	0.34%	0.34%
	1m/EM2	0.52%	0.53%	0.56%
	2m/EM2	0.34%	0.33%	0.33%
	3m/EM2	0.27%	0.26%	0.25%
		Esfuerzos a 0° (MPa)		
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	103.95	104.37	106.70
	2m/EM1	55.58	53.50	52.61
	3m/EM1	32.16	30.32	29.10
	1m/EM2	91.51	91.55	93.18
	2m/EM2	47.49	45.43	44.54
	3m/EM2	26.69	24.92	23.81

Altura de cama "c" de 1/12 de 42"				
		Ancho (metros)		
		Deformaciones a 0° (% $\Delta y/OD$)		
		0.3m	0.4m	0.5m
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	0.67%	0.71%	0.74%
	2m/EM1	0.47%	0.46%	0.47%
	3m/EM1	0.39%	0.38%	0.38%
	1m/EM2	0.54%	0.56%	0.58%
	2m/EM2	0.37%	0.36%	0.36%
	3m/EM2	0.30%	0.28%	0.28%
		Esfuerzos a (0°)		
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	105.61	107.83	108.39
	2m/EM1	56.97	54.86	53.89
	3m/EM1	33.05	31.19	30.03
	1m/EM2	92.27	92.35	93.85
	2m/EM2	48.08	45.96	45.11
	3m/EM2	27.20	25.48	24.22

 Ruta de tendencias de esfuerzos (Se lee de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha)

Deformaciones y esfuerzos sobre tubería de 48" STD ASTM A53-B

Altura de cama "c" de 1/6 de 48"				
		Ancho (metros)		
		Deformaciones a 0° (% $\Delta y/OD$)		
		0.3m	0.4m	0.5m
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	0.61%	0.64%	0.66%
	2m/EM1	0.41%	0.41%	0.40%
	3m/EM1	0.34%	0.33%	0.32%
	1m/EM2	0.51%	0.52%	0.54%
	2m/EM2	0.33%	0.32%	0.32%
	3m/EM2	0.26%	0.26%	0.25%
		Esfuerzos a 0° (MPa)		
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	103.50	105.02	107.26
	2m/EM1	53.74	52.61	51.83
	3m/EM1	30.83	29.35	27.92
	1m/EM2	91.63	92.28	93.84
	2m/EM2	46.36	45.16	44.60
	3m/EM2	26.05	24.66	23.43

Altura de cama "c" de 1/12 de 48"				
		Ancho (metros)		
		Deformaciones a 0° (% $\Delta y/OD$)		
		0.3m	0.4m	0.5m
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	0.67%	0.69%	0.73%
	2m/EM1	0.46%	0.46%	0.46%
	3m/EM1	0.39%	0.38%	0.38%
	1m/EM2	0.55%	0.57%	0.59%
	2m/EM2	0.37%	0.37%	0.36%
	3m/EM2	0.31%	0.30%	0.29%
		Esfuerzos a (0°)		
Profundidad (m) / Módulo de elasticidad (E1 o E2)	1m/EM1	105.08	106.75	109.77
	2m/EM1	54.92	53.88	53.20
	3m/EM1	31.73	30.25	28.96
	1m/EM2	92.67	93.35	95.42
	2m/EM2	46.92	45.74	45.27
	3m/EM2	26.63	25.25	24.05

 Ruta de tendencias de esfuerzos (Se lee de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha)