

Maestría en Ingeniería Civil

**Análisis numérico de la protección de tuberías enterradas
mediante láminas de acero ante cargas sobre la superficie del
terreno.**

Carlos Arturo Gómez Jiménez

Bogotá, D.C., 25 de enero de 2024



Análisis numérico de la protección de tuberías enterradas mediante láminas de acero ante cargas sobre la superficie del terreno.

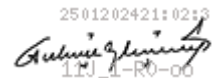


Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en geotecnia

Bogotá, D.C., 25 de enero de 2024



La tesis de maestría titulada “Análisis numérico de la protección de tuberías enterradas mediante láminas de acero ante cargas sobre la superficie del terreno”, presentada por Carlos Arturo Gómez Jiménez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

2501202421:02:3

1101-1-R0-00

Director de la tesis
FABIAN RENE ALVAREZ SIERRA

Jurado
JOSE VICENTE AMORTEGUI

Jurado
JOHAN CAMILO GARZÓN CUBIDES

Bogotá, D.C., 19 de enero del 2024

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincera gratitud a mi director, el ingeniero Fabian René Alvarez Sierra, por sus consejos y guía para la elaboración de este documento. Así mismo, a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por el acompañamiento brindado.

Así mismo quiero agradecer a mi familia, a Margie y a Yohana por tener siempre la amabilidad de darme las palabras motivadoras cuando las necesité.

También quiero expresar mi aprecio a la empresa Eco Design Services S.A.S. por brindarme el tiempo que requerí para estudiar y sacar adelante mis estudios.

Resumen

Las teorías para el análisis de tuberías enterradas se iniciaron en 1930 con Marston. Posteriormente se desarrollaron modelos para tuberías flexibles, los cuales han ido mejorando a lo largo de los años mediante ensayos experimentales, ya sea a escala real, a escala reducida o utilizando la herramienta de la centrífuga geotécnica. Con el avance de la computación, surgió una nueva rama conocida como geotecnia computacional, la cual ha permitido obtener resultados que antes solo se podían validar experimentalmente debido a la dificultad de las ecuaciones analíticas y la cantidad de variables involucradas.

Uno de los desafíos para los investigadores ha sido determinar la protección necesaria para garantizar que una tubería enterrada pueda soportar las cargas externas sin sufrir daños permanentes ni pérdida del material transportado. Para abordar este problema, se ha analizado el comportamiento de los materiales de relleno, las capas que cubren la tubería, así como la influencia de las estructuras viales, las láminas de concreto y más recientemente, el uso de geotextiles, geomallas y EPS.

El objetivo de esta investigación es analizar el uso de láminas de acero como protección para tuberías enterradas. Estas láminas se utilizan con frecuencia en trabajos temporales y en zonas remotas donde, debido a las condiciones del trabajo, es necesario transitar maquinaria sobre las tuberías enterradas a profundidades generalmente no superiores a 1.8 m.

Para llevar a cabo este análisis, se utiliza el software computacional RS3 de la familia Rocscience, el cual permite analizar modelos numéricos tridimensionales. Se plantean varios escenarios de estudio en los cuales los parámetros del suelo, el espesor de la lámina y la profundidad de la cota clave de la tubería con el fin de comprender el comportamiento de manera general.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I ANTECEDENTES, CONCEPTOS TEÓRICOS Y OBJETIVOS.....	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Antecedentes y motivación.....	16
1.3. Conceptos teóricos generales.....	18
1.3.1. Códigos y reglamentos.....	18
1.3.2. Comportamiento de tuberías.....	19
1.3.3. Algunos tipos de esfuerzos en tuberías enterradas.....	20
1.3.4. Tipos de protección de tuberías enterradas.....	22
1.4. Objetivos.....	22
1.4.1. Objetivo General.....	22
1.4.2. Objetivo específico.....	23
1.5. Alcance y limitaciones del estudio.....	23
CAPITULO II INFORMACIÓN DE REFERENCIA EXISTENTE SOBRE LA PROTECCIÓN DE TUBERÍAS ENTERRADAS.....	24
2.1. Modelos numéricos de análisis mediante elementos finitos tridimensional.....	24
2.2. Modelos físicos en centrífuga geotécnica.....	26
2.3. Análisis de protección de tuberías enterradas.....	31
2.4. Comportamiento conceptual de tuberías enterradas sin y con protección.....	33
2.5. Caso de estudio.....	36
2.6. Comentarios finales sobre los métodos de análisis de tuberías enterradas.....	37
2.7. Análisis y requerimientos de la metodología con elementos finitos.....	38
2.7.1. Efectos de borde.....	38

2.7.2.	Modelos constitutivos del suelo	39
2.7.3.	Efectos de las interfaces.....	39
2.7.4.	Von Mises stress	40
CAPITULO III METODOLOGÍA Y PARÁMETROS PARA EL DISEÑO		41
3.1.	Validación del software	41
3.2.	Modelos por desarrollar	47
3.2.1.	Modelo sin protección mecánica.....	47
3.2.2.	Modelo con protección mecánica.....	47
3.3.	Sistema de referencia	48
3.4.	Materiales	48
3.4.1.	Suelo de atraque de la tubería.....	48
3.4.2.	Lámina de acero.....	49
3.4.3.	Tubería	51
3.5.	Etapas	52
3.6.	Geometría	52
3.7.	Aplicación de cargas.....	53
3.8.	Restricciones	53
3.9.	Mallado	54
3.10.	Ficha técnica	56
CAPITULO IV ANÁLISIS NUMÉRICO DESARROLLADO.....		59
4.1.	Análisis paramétrico de tuberías enterradas sin lámina de protección.....	59
4.1.1.	Efecto de la profundidad de la tubería	59
4.1.2.	Efecto de la densificación del suelo.....	61
4.1.3.	Resumen	62

4.2.	Análisis paramétrico de tuberías enterradas con lámina de protección.....	63
4.2.1.	Efecto del ancho de la lámina.....	63
4.2.2.	Efecto del espesor de la lámina de acero	69
4.2.3.	Resumen.....	78
4.3.	Disipación de esfuerzos en profundidad	80
4.3.1.	Arena suelta	80
4.3.2.	Arena media	81
4.3.3.	Arena densa.....	82
4.3.4.	Comparativa	83
CAPITULO V RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIÓN		84
5.1.	Modelos constitutivos del suelo	84
5.2.	Uso de láminas de acero de diferentes espesores como medidas de protección	84
5.2.1.	Resultados sin lámina de protección:	84
5.2.2.	Resultados con lámina de protección:	85
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		86
6.1.	Conclusiones.....	86
6.2.	Recomendaciones para futuras investigaciones	88
REFERENCIAS.....		89
ANEXOS		93
	Fichas técnicas del modelo desarrollado.....	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Modelo típico de malla empleado para análisis tridimensional de tuberías enterradas	25
Ilustración 2. Efecto de la densidad relativa de la arena en las deformaciones de tuberías enterradas	26
Ilustración 3. Modelo Boussinesq típico empleado en centrífuga en donde se analizan cargas puntuales a una distancia del punto de interés.....	27
Ilustración 4. Sección de la tubería deformada a diferentes relaciones profundidad/diámetro y con respecto a una distancia diametral de la carga.....	29
Ilustración 5. Flexión obtenida en un modelo en centrífuga comparado con un modelo de escala real demostrando un grado alto de coincidencia.....	29
Ilustración 6. Instrumentación desarrollada por el equipo de Saboya para el estudio de tuberías enterradas en centrífuga geotecnia.....	30
Ilustración 7. Montaje en la centrífuga geotécnica para simular una carga de tránsito superficial sobre una tubería enterrada.....	30
Ilustración 8. Tubería enterrada y protección mediante EPS recomendada para el método de zanja imperfecta	31
Ilustración 9. Modelo analítico empleando geoceldas para la protección de una tubería enterrada.....	32
Ilustración 10. Fractura y esfuerzo de punzonamiento en una tubería generado por un revestimiento de concreto fracturado.....	32
Ilustración 11. Modelo de análisis numérico de una protección de tuberías enterradas constituida por agregado de llantas recicladas (TDA) y geoceldas	33
Ilustración 12. Tubería enterrada sin carga externa.....	34
Ilustración 13. Tubería enterrada con carga viva y sin protección.....	35

Ilustración 14. Cargas típicas calculadas de relleno y tráfico en una tubería flexible de diámetro exterior DN355.....	35
Ilustración 15. Tubería enterrada con carga viva y con protección mediante láminas de acero de diferentes espesores ($t_1 > t_2 > t_3$).	36
Ilustración 16. Deformación de deflexión horizontal del tubo.....	37
Ilustración 17. Centrifuga geotécnica perteneciente a la ECI	38
Ilustración 18. Comparación de la deformación vertical obtenida por el estudio de Neves con respecto a la validación realizada.	42
Ilustración 19. Ensayo y error para determinar las dimensiones óptimas para el desarrollo de la tesis	43
Ilustración 20. Típico de análisis de desplazamientos en la tubería para comprender el efecto de borde.....	43
Ilustración 21. Comparación de resultados de 4 nodos con respecto a 10 nodos	44
Ilustración 22. Una de las configuraciones usadas en el software RS3 para determinar la variación en el sistema	46
Ilustración 23. Comparación de interfases None y Material Dependent	46
Ilustración 24. Esquema del problema que se analizará mediante el programa RS3	47
Ilustración 25. Sistema de referencia usado por RS3.....	48
Ilustración 26. Desplazamiento con lámina de acero infinita dirección -Z.....	49
Ilustración 27. Desplazamiento con lámina de acero acorde a la realidad dirección +Z... ..	50
Ilustración 28. Dimensionamiento de la lámina de acero en el modelo con respecto a la aplicación de la carga en kN.	50
Ilustración 29. Relajación del módulo de elasticidad a través del tiempo para el PVC	52
Ilustración 30. Geometría para el desarrollo FEM.....	52

Ilustración 31. Geometría de aplicación de carga	53
Ilustración 32. Restricciones empleadas	54
Ilustración 33. Mallado del modelo corte XZ	55
Ilustración 34. Mallado del modelo corte XZ con zoom en la lámina de acero	55
Ilustración 35. Ficha técnica desarrollada.	56
Ilustración 36. Efecto de la profundidad de la tubería ovalación para arena suelta	60
Ilustración 37. Efecto de la profundidad de la tubería pandeo.....	60
Ilustración 38. Efecto de la densificación del suelo sin escala.....	61
Ilustración 39. Densificación crítica $0.5D - 28^\circ$	62
Ilustración 40. Máximo esfuerzo Von Mises con respecto a la profundidad.....	63
Ilustración 41. Variación del esfuerzo cortante a una profundidad de $0.5D$ y lámina de 3.2mm y diferentes anchos de lámina	64
Ilustración 42. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de $1D$ y lámina de 3.2mm y diferentes anchos de lámina	64
Ilustración 43. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de $1.5D$ y lámina de 3.2mm y diferentes anchos de lámina	65
Ilustración 44. Variación del esfuerzo cortante a una profundidad de $0.5D$ y lámina de 25.4mm y diferentes anchos de lámina.....	66
Ilustración 45. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de $1D$ y lámina de 25.4mm y diferentes anchos de lámina	66
Ilustración 46. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de $1.5D$ y lámina de 25.4mm y diferentes anchos de lámina	67
Ilustración 47. Variación del esfuerzo cortante a una profundidad de $0.5D$ y lámina de 76.2mm y diferentes anchos de lámina.....	68

Ilustración 48. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de 1D y lámina de 76.2mm y diferentes anchos de lámina	68
Ilustración 49. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de 1.5D y lámina de 76.2mm y diferentes anchos de lámina	69
Ilustración 50. Efecto espesor de lámina de 3.2mm para 0.5D profundidad.....	70
Ilustración 51. Efecto espesor de lámina de 3.2mm para 1D profundidad.....	71
Ilustración 52. Efecto espesor de lámina de 3.2mm para 1.5D profundidad.....	71
Ilustración 53. Efecto espesor de lámina de 25.4 mm para 0.5D profundidad.....	72
Ilustración 54. Efecto espesor de lámina de 25.4 mm para 1D profundidad.....	73
Ilustración 55. Efecto espesor de lámina de 25.4 mm para 1.5D profundidad.....	73
Ilustración 56. Efecto espesor de lámina de 76.2 mm para 0.5D profundidad.....	74
Ilustración 57. Efecto espesor de lámina de 76.2 mm para 1D profundidad.....	75
Ilustración 58. Efecto espesor de lámina de 76.2 mm para 1.5D profundidad.....	75
Ilustración 59. Esfuerzo cortante a diferentes profundidades en el ángulo 315° para una lámina de espesor de 3.2mm.....	76
Ilustración 60. Esfuerzo cortante a diferentes profundidades en el ángulo 315° para una lámina de espesor de 25.4 mm.....	77
Ilustración 61. Esfuerzo cortante a diferentes profundidades en el ángulo 315° para una lámina de espesor de 76.2 mm.....	77
Ilustración 62. Disipación de esfuerzos para arena suelta con protección y sin protección mecánica	81
Ilustración 63. Disipación de esfuerzos para arena media con protección y sin protección mecánica	82
Ilustración 64. Disipación de esfuerzos para arena densa con protección y sin protección mecánica	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disipación de carga viva de un camión (Tabla 6-3 AWWA Manual M11)	20
Tabla 2. Cargas en una tubería enterrada	21
Tabla 3. Diferentes tipos de protección mecánica.....	22
Tabla 4. Modelos constitutivos del suelo.....	39
Tabla 5. Parámetros de entrada de los modelos desarrollados sin protección	47
Tabla 6. Parámetros de entrada de los modelos desarrollados con protección.....	48
Tabla 7. Suelo de ataque en donde se expone una densificación.....	49
Tabla 8. Valores de la lámina de acero.....	49
Tabla 9. Parámetros de entrada del modelo a desarrollar.....	51
Tabla 10. Componentes de la ficha técnica	57
Tabla 11. Resumen de los efectos sin protección mecánica	62
Tabla 12. Resumen de los efectos con protección mecánica.....	78
Tabla 13. Recomendaciones futuras para investigar	88

ACRONIMOS Y NOMENCLATURAS

AWWA	<i>American Water Works Association</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
TDA	Agregados de reciclaje de llantas, por sus siglas en ingles.
FEM	Modelamiento de elementos finitos
PVC	Policloruro de vinilo
EPS	Poliestireno expandido
RS3	Software de la casa Rocscience
3D	Tres dimensiones

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	REPRESENTACIÓN
\emptyset	Ángulo de fricción del suelo	Grados	°
B	Ancho de la lámina de acero	Metros	m
D	Diámetro externo de la tubería	Pulgadas	"
t	Espesor de la lámina de acero	m	
HDPE	High Density Poly Ethylene		
E	Módulo de elasticidad	kPa	
γ	Peso unitario	$\frac{kN}{m^3}$	
H	Profundidad cota superior de la tubería	Metros	m
μ	Relación de Poisson		

PUBLICACIONES

Las siguientes publicaciones se prepararon a partir de esta tesis, durante el curso del estudio del autor.

Publicación en revista

Gómez Jiménez, C. A. (2022). Revisión Sobre el Análisis y Protección de Tuberías Enterradas Ante Cargas Sobre la Superficie del Terreno. *Revista Innovación Digital Y Desarrollo Sostenible - IDS*, 3(1), 59 - 71. <https://doi.org/10.47185/27113760.v3n1.87>

Ponencias:

Gómez Jiménez, C. A. (2022). Conceptos generales en el diseño de transporte de hidrocarburos empleando tubería como medio principal – enfoque civil. *VIII Congreso internacional de Ingeniería Civil*, “Los retos de la academia frente a las nuevas tendencias postpandemia en tecnología, innovación y sostenibilidad”, Bogotá. Colombia.

Gómez Jiménez, C. A. (2023). Análisis numérico de la protección de tuberías flexibles enterradas mediante láminas de acero ante cargas sobre la superficie del terreno. *Jornadas XX Geotécnicas de la Sociedad Colombiana de Ingenieros*, Bogotá. Colombia.

Trabajos anteriores relacionado con ductos:

Gómez Jiménez, C. A. (2023). Carga dinámica generada por el Regiotram sobre una tubería flexible para hidrocarburo - caso real. *VII Congreso internacional de Ingeniería Civil*, “Un aporte a la recuperación del país desde la academia, la investigación, la empresa y la institucionalidad”, Bogotá. Colombia.

CAPITULO I

ANTECEDENTES, CONCEPTOS TEÓRICOS Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El análisis de la protección de tuberías enterradas mediante la instalación de elementos mecánicos es un desafío geotécnico que implica la interacción entre el suelo, la tubería y la protección mecánica. Resolver este problema de manera analítica resulta complejo por la cantidad de simplificaciones y variables existentes. Sin embargo, gracias a los avances en computación y la disponibilidad de software FEM en el mercado, ha surgido una creciente tendencia en el uso de enfoques computacionales para abordar este tema.

El objetivo principal de este estudio es comprender la disipación de los esfuerzos estáticos generados por el peso de un vehículo sobre el lomo de una tubería enterrada mediante la instalación de una lámina de acero en la superficie del terreno. Para esto, se elaboraron 81 modelos para analizar el comportamiento de cada variable y evaluar su impacto en el grado de disipación.

1.2. Antecedentes y motivación

Las tuberías enterradas son una parte integral del desarrollo de una ciudad. Son fundamentales para proporcionar a la sociedad servicios como acueducto, alcantarillado, energía y sistemas de comunicación. Estas redes se diseñan con proyecciones a 50 años o 100 años, pero es imposible predecir todas las zonas por donde transitarán vehículos por encima de la tubería, lo que puede afectarla.

Los daños causados por el paso de vehículos en zonas no previstas pueden tener diversas consecuencias, que van desde aspectos económicos hasta impactos ambientales significativos. En el caso de los sistemas de acueducto, las rupturas pueden generar costos debido a reparaciones, pérdida de suministro de agua y posibles interrupciones en el servicio para la comunidad. Por otro lado, cuando se trata de oleoductos u otros tipos de tuberías utilizadas para transportar sustancias peligrosas, los daños pueden tener un impacto más grave en el medio ambiente, con derrames que afectan la calidad del suelo, el agua y la vida silvestre, además de representar un riesgo para la salud humana.

Bajo este principio, es una práctica común que durante la movilización de maquinaria, si esta cruza sobre una tubería enterrada existente en un punto no previsto, la interventoría exija la implementación de medidas de protección mecánica sobre dicha red. De esta necesidad nacen las soluciones de protección de tuberías conocidos como “típicos de protección de tuberías enterradas”, información que se ha estandarizado y usado constantemente sin conocer sobre su efectividad real para disipar las cargas.

Dentro de las soluciones de protección de tuberías enterradas usadas por el autor a nivel de proyectos reales, se tiene las láminas de acero a una profundidad de 20 cm. Al realizar una consulta en diferentes bases de datos, no encontró información para entender técnicamente como las láminas de acero disipan la presión de la carga viva de maquinaria en profundidad, a diferencia de lo que ocurre con otras formas de protección, como son geotextiles, geomallas, EPS, entre otros.

Por esta razón, esta investigación se centró en analizar y evaluar la eficacia de las láminas de acero como medida de protección para tuberías enterradas. A pesar de ser una práctica comúnmente utilizada, existe una falta de información técnica sobre la forma como las láminas de acero disipan las cargas vivas en profundidad. El estudio busca dar un primer paso en comprender las láminas de acero como medida de protección de tuberías enterradas como solución geotécnica.

1.3. Conceptos teóricos generales

1.3.1. Códigos y reglamentos

Uno de los códigos ampliamente reconocidos en la industria es el del ASME B31.8, que se enfoca en los sistemas de tuberías de transporte de gas y líquidos relacionados. Este código proporciona pautas detalladas para el diseño, la construcción, la inspección, el mantenimiento y la operación de las tuberías enterradas.

En sistemas de acueducto, se utiliza ampliamente el estándar de la AWWA. Este estándar trata la instalación de tuberías de agua potable y establece directrices para la selección de materiales, diseño estructural, instalación y protección de tuberías enterradas. También proporciona recomendaciones para prevenir fugas, monitorear y mantener adecuadamente la infraestructura de agua potable.

En la industria petrolera, la API tiene estándares relevantes para el transporte y distribución de hidrocarburos. Por ejemplo, el API 1104 establece requisitos para la soldadura de tuberías de acero en oleoductos y gasoductos, mientras que el API 570 se enfoca en la inspección, evaluación y reparación de tuberías existentes. Estos estándares incluyen disposiciones específicas para la instalación y protección de tuberías enterradas en entornos petroleros.

En Colombia, para el caso de Acueducto y Alcantarillados, se aplican normas y estándares reconocidos a nivel nacional que abordan la protección de las tuberías enterradas frente a cargas vivas y muertas. Estas normativas, establecidas por ICONTEC y el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, contemplan criterios de diseño estructural que consideran las cargas dinámicas y estáticas a las que las tuberías pueden estar expuestas en el entorno específico de los sistemas de acueducto y alcantarillado.

Las normas y estándares colombianos para proteger las tuberías enterradas en sistemas de acueducto y alcantarillado se basan en principios de ingeniería y buenas prácticas reconocidas a nivel nacional e internacional. Su objetivo es asegurar la vida útil de las tuberías, minimizar riesgos de fallas o colapsos debido a cargas excesivas y garantizar un funcionamiento seguro y eficiente de los sistemas en Colombia.

Entes reguladores:

- ANSI: American National Standards Institute.
- ASME: American Society of Mechanical Engineer.
- ASTM: American Society for Testing and Materials.
- NTC: Normas Técnicas Colombianas.
- NSR-10: Norma Sismo Resistente del 2010.
- CCP14: Norma Colombiana de Diseño de Puentes.

Normas específicas:

- EPM - Instalación en zanja de tuberías de PVC, HD, GRP, CCP y acero en redes de acueducto
- RAS 2000 - reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico
- NS-0.35 V4: Requerimientos para diseño de cimentación de tuberías en redes de acueducto y alcantarillado.

1.3.2. Comportamiento de tuberías

Al diseñar una tubería es fundamental asegurar que posea la resistencia necesaria para cumplir eficientemente su función a lo largo de su vida útil. El concepto de "rigidez" se refiere a la capacidad del material para resistir la flexión. Esta rigidez está estrechamente vinculada con dos factores fundamentales: el módulo de elasticidad del material y el segundo momento de la sección transversal de la pared del tubo, que está determinado por su espesor.

Una tubería flexible se ha definido como aquella que se deforma al menos un 2% sin daños estructurales. Un material que no permita hacer eso, se considera rígido. Para las tuberías rígidas, la resistencia para soportar los esfuerzos en la pared debido a la combinación de la presión interna y la carga externa suele ser crítica. En cambio, para las tuberías flexibles, la rigidez puede ser importante para resistir la deflexión anular y posibles pandeos.

1.3.3. Algunos tipos de esfuerzos en tuberías enterradas

1.3.3.1. Presión del suelo

La metodología desarrollada por Marston, Spangler y sus colaboradores en *Iowa State University* por un periodo de más de 50 años, ha sido aceptada para evaluar las cargas de sobrecargas. Con respecto a AWWA, en su manual de diseño de tuberías de acero se recomienda:

$$W_c = w B_c h$$

donde:

W_c = Carga sobre la tubería.

w = peso unitario del suelo en la zona superior de la tubería.

B_c = diámetro externo de la tubería

h = Profundidad desde la superficie hasta la cota clave.

1.3.3.2. Cargas dinámicas por tráfico

La principal fuente de cargas vivas de diseño en tuberías enterradas es el tráfico rodado de vehículos. La disipación de carga con respecto a la profundidad ha sido muy estudiada para el diseño de pavimentos. En la Tabla 1 se aprecia la disipación de esfuerzos de carga viva en profundidad recomendado por el manual AWWA M11.

Tabla 1. Disipación de carga viva de un camión (Tabla 6-3 AWWA Manual M11)

COBERTURA DEL SUELO (m)	CARGA VIVA (%)
0.30	100% (86.18 kPa)
0.61	44%
0.91	33%
1.22	22%
1.52	14%
1.83	11%
2.13	10%
2.44	6%
Superior a 2.44	Nulo

Fuente: (AWWA, 2011)

1.3.3.3. Otro tipo de cargas

En la Tabla 2 se expone otro tipo de cargas que se pueden generar en una tubería. Esta tabla se construye a través de la diversa literatura y fuentes leída para la construcción de esta tesis.

Tabla 2. Cargas en una tubería enterrada

TIPO DE CARGA	DESCRIPCIÓN
Excavaciones profundas	Se generan fuerzas laterales y verticales que aumentan con la profundidad y pueden ejercer presión sobre la tubería.
Terrenos blandos	Los suelos blandos o poco compactos pueden causar asentamientos diferenciales en la tubería, lo que puede provocar desplazamientos y deformaciones.
Hundimiento del terreno	Los hundimientos naturales o inducidos en el terreno pueden ejercer cargas sobre la tubería, lo que puede generar deformaciones o incluso roturas.
Colapso de vacíos en el suelo	En presencia de cavidades o huecos en el suelo, pueden producirse colapsos que generen cargas adicionales sobre la tubería.
Expansión o contracción del suelo	Los cambios volumétricos en el suelo debido a la humedad, temperatura u otros factores pueden ejercer presión sobre la tubería.
Consolidación del suelo o relleno	Durante la consolidación del suelo o el relleno circundante pueden producirse asentamientos que afecten la estabilidad de la tubería.
Impacto vibración del suelo y pilotaje	Las vibraciones generadas por maquinaria pesada o actividades de pilotaje cercanas pueden transmitirse al suelo y afectar la integridad de la tubería.
Deslizamientos de tierra y suelos inestable	En áreas propensas a deslizamientos de tierra o suelos inestables, la tubería puede estar expuesta a cargas laterales o verticales significativas.
Movimiento discontinuo del suelo	Movimientos repentinos o bruscos del suelo debido a eventos geotécnicos pueden ejercer fuerzas significativas sobre la tubería.
Sismo	Los terremotos generan movimientos sísmicos que pueden someter a la tubería a fuerzas dinámicas y deformaciones.
Efectos de fuerzas de compactación	Durante el proceso de compactación del suelo circundante pueden generarse cargas adicionales que afecten la tubería.
Efecto de material de relleno	La elección y características del material de relleno utilizado en la zanja pueden tener un impacto en la estabilidad y carga que se ejerce sobre la tubería.

1.3.4. Tipos de protección de tuberías enterradas

Existen numerosas opciones de protecciones mecánicas disponibles para aplicaciones en tuberías enterradas. En la Tabla 3 se presenta una recopilación de las protecciones mecánicas. Esta tabla se construye a través de la diversa literatura y fuentes leída para la construcción de esta tesis.

Tabla 3. Diferentes tipos de protección mecánica

PROTECCIÓN MECÁNICA	DESCRIPCIÓN
Mayor profundidad de instalación	Aumentar la profundidad de instalación de la tubería para reducir las cargas vivas dinámicas superficiales y mejorar su protección contra daños mecánicos.
Geoceldas	Se colocan alrededor de la tubería para brindar estabilidad y distribuir las cargas externas.
TDA	Material de relleno alrededor de la tubería para mejorar la protección contra impactos y vibraciones.
Láminas de concreto, HDPE o acero	Láminas de un espesor determinado con el fin de disipar las cargas.
Anillos de concreto	Anillos prefabricados de concreto que se colocan alrededor de la tubería para brindar protección adicional y mejorar su estabilidad estructural.
EPS	Uso de paneles de poliestireno expandido como material de relleno alrededor de la tubería para reducir la carga y protegerla contra asentamientos y vibraciones.
Geotextiles	Usados para envolver la tubería y proporcionar protección contra la erosión y el desplazamiento del suelo.
Sacos Suelo cemento	Sacos rellenos con una mezcla de suelo y cemento que se colocan alrededor de la tubería para brindar protección contra impactos y estabilizar la estructura del suelo.
Combinaciones de dos tipos de protección	Uso de una combinación de dos o más tipos de protección mecánica, como la instalación de geoceldas y láminas de concreto, para proporcionar una protección más completa y eficaz a la tubería.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar mediante análisis numérico los efectos de la disipación de la carga viva en profundidad ocasionada por tránsito vehicular ante a la instalación de láminas de acero de 1/8", 1", 3" de espesor como protección contra cargas superficiales.

1.4.2. Objetivo específico

- Realizar la modelación numérica de una tubería enterrada en tres dimensiones y determinar los esfuerzos inducidos en la tubería enterrada por una carga vehicular externa superficial, sin y con inclusión de láminas de acero colocadas en la superficie del terreno como protección de la tubería misma.
- Comparar los resultados de los esfuerzos y las deformaciones de la tubería obtenidos para cada espesor de lámina de protección mediante modelación numérica empleando un programa de elementos finitos tridimensional.
- Estimar el desempeño de láminas de acero como protección de tuberías enterradas bajo cargas externas superficiales.

1.5. Alcance y limitaciones del estudio

El objetivo principal de esta investigación se centra en comprender y evaluar el uso de láminas de acero como método para disipar cargas sobre una tubería enterrada cuando se permite el paso de vehículos en áreas no previstas para este propósito.

Es importante destacar que el enfoque de este estudio se centra en obtener conclusiones claras y fundamentadas sobre la eficacia y viabilidad de las láminas de acero como medida de mitigación de cargas. No se busca analizar específicamente la resistencia o deformación de la tubería ante las cargas impuestas.

Adicionalmente, en el estudio se ha considerado un suelo granular que se ha analizado para densidades sueltas a densas y una tubería de PVC en un único diámetro. Se requiere de más análisis con diferentes tipos de suelos y ensayos complementarios para extender los resultados de este estudio a otros materiales.

CAPITULO II

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

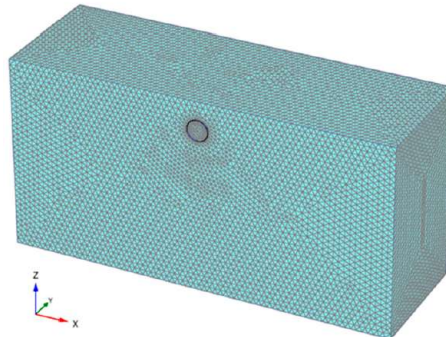
EXISTENTE SOBRE LA PROTECCIÓN DE TUBERÍAS ENTERRADAS

2.1. Modelos numéricos de análisis mediante elementos finitos tridimensional

Los primeros análisis de esfuerzos en tuberías enterradas fueron realizados por Marston a principios del siglo XX y otros investigadores continuaron este estudio en los años 1930s de acuerdo con la capacidad de la tecnología de su tiempo (Goltabar & Shekarchi, 2010). Sin embargo, este problema de interacción suelo-estructura es desafiante de analizar por medio de cálculos analíticos. En la actualidad se emplean análisis numéricos completos utilizando el método de los elementos finitos (Kluszczewicz, 2013).

En las últimas décadas se han desarrollado varios programas de computador basados en modelos constitutivos para la modelación numérica para el análisis en ingeniería como ABAQUS, ANSYS, PLAXIS, FLAC2D, FLAC3D, MIDAS, y RS2 y RS3 de ROCSCIENCE, entre otros. Los resultados más representativos mediante elementos finitos se obtienen al realizar un mallado fino alrededor de la tubería (ver Ilustración 1). Lejos de la tubería se puede incrementar el tamaño de la malla (Goltabar y Shekarchi, 2010). Con respecto a las investigaciones experimentales (modelación física a escala real) de estructuras enterradas, estas requieren una logística compleja, son costosas y en algunos casos, son poco prácticas (Khademi-Zahedi, 2019).

Ilustración 1. Modelo típico de malla empleado para análisis tridimensional de tuberías enterradas



Fuente: (Bryden et al., 2014)

Estudios realizados por Sharp et al (1985) mostraron una muy buena correlación entre los resultados obtenidos de análisis de elementos finitos y las respuestas medidas en pruebas de modelos físicos de tuberías enterradas. Esto ha proporcionado una justificación sólida para el uso del método de elementos finitos para modelar adecuadamente diversas condiciones de instalación, materiales del suelo, condiciones de carga, tamaños de tubería, etc., sin el costo adicional de realizar pruebas físicas detalladas (Sharp et al., 1985).

Por otra parte, se ha demostrado que los esfuerzos en el suelo y la tubería está fuertemente influenciados por el tipo de suelo (Karmaker, 2019). En forma adicional, la densidad del suelo y la profundidad de instalación de la tubería son factores importantes en la interacción suelo-tubería (Bildik, 2012).

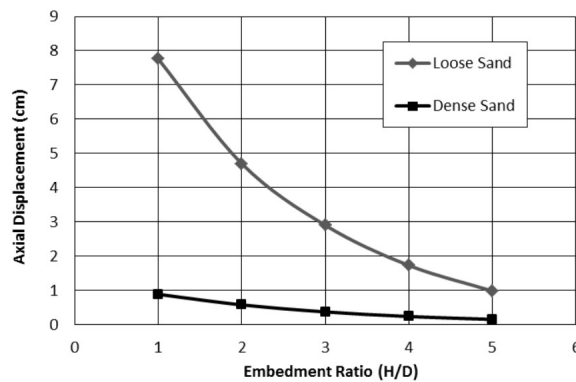
Con respecto a la carga superficial aplicada, algunos estudios indican que los esfuerzos producidos por la carga concentrada por rueda son ligeramente superiores a los esfuerzos generados por la carga distribuida por rueda, con una diferencia máxima del 5 % (Khademi-Zahedi, 2019).

En los estudios realizados por Khademi-Zahedi (2019) de tuberías enterradas mediante elementos finitos se concluyó que:

- La magnitud y distribución de la sobrecarga superficial afecta el comportamiento de la tubería.

- Los desplazamientos de la tubería disminuyen con el aumento de la relación de profundidad/diámetro de instalación de la tubería.
- El comportamiento de la tubería está fuertemente influenciado por la densidad relativa de la arena. Los desplazamientos de la tubería disminuyen con el aumento de la densidad relativa de la arena (ver Ilustración 2).

Ilustración 2. Efecto de la densidad relativa de la arena en las deformaciones de tuberías enterradas



Fuente: (Bildik, 2012)

- Los resultados muestran que los desplazamientos de la tubería disminuyen con el aumento de la rigidez de la tubería y los desplazamientos de las tuberías de hormigón son menores que los de las tuberías de polietileno (Bildik, 2012).

Investigaciones más recientes, han combinado los elementos finitos con estudios de confiabilidad, en los cuales se ha determinado que a mayor carga de vehículo, la magnitud del índice de confiabilidad es menor (Si Xi et al., 2019).

2.2. Modelos físicos en centrifuga geotécnica

El uso de la centrifuga geotécnica ha demostrado que es una herramienta importante en el comportamiento de las estructuras geotécnicas, la cual principalmente ha sido de utilidad para evaluar las siguientes cuatro aplicaciones: modelado de un prototipo, investigación de conceptos de diseño nuevos, estudios paramétricos y validación de los resultados obtenidos de métodos numéricos (Lozada et al., 2021).

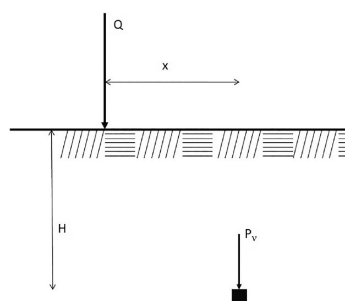
El empleo de la centrifuga geotécnica para el estudio de tuberías enterradas ha tenido una amplia atención. Sin embargo, existe relativamente poca literatura disponible con resultados experimentales, en particular con relación a la interacción tubería-suelo (Bayton et al., 2018). En especial el análisis de las tuberías flexibles tiene un grado de dificultad mayor que la evaluación de las tuberías rígidas. (Bryden et al., 2015).

En el diseño de tuberías enterradas un parámetro clave es minimizar los cambios muy grandes en la flexión en distancias cortas, así como los puntos abruptos de inflexión ya que estos tienen esfuerzos grandes de corte asociados. De acuerdo con los estudios realizados por Bayton et al (2018), una mayor profundidad de instalación incrementa la reducción en los esfuerzos de la tubería y ayuda a aumentar la vida útil de la tubería, siendo válido hasta determinada profundidad en donde se ha disipado las cargas vivas.

La clasificación de la flexibilidad de las tuberías se evalúa con base en su rigidez efectiva, definida como el factor de rigidez anular EI/R^3 , donde E es el módulo Young; I es el momento de inercia; y R es el radio promedio de la tubería (Bryden et al., 2015).

De manera general, el análisis de modelos de tuberías enterradas en centrifuga están relacionados con la teoría de Boussinesq de incrementos de esfuerzos debido a cargas externa, en donde el efecto de la carga superficial disminuye sustancialmente con la profundidad de instalación de la tubería (Bryden et al., 2015). En la Ilustración 3 se muestra un esquema de un modelo típico de Boussinesq utilizado en la modelación física en centrifuga, tal como se expone en los diversos trabajos de Fernando Saboya.

Ilustración 3. Modelo Boussinesq típico empleado en centrifuga en donde se analizan cargas puntuales a una distancia del punto de interés



Fuente: (Saboya et al., 2020)

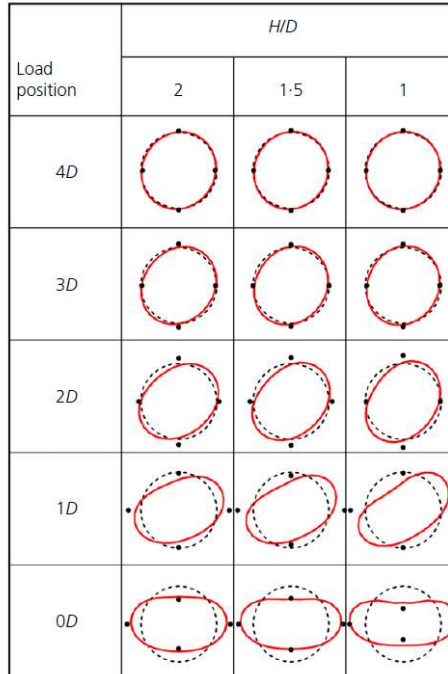
Por otro lado, Neves et al. (2021) determinaron que las cargas superficiales producen deformaciones muy pequeñas en la tubería y en consecuencia se puede asumir que el suelo se comporta en forma lineal (Neves et al., 2021).

A continuación, se plantean algunos comentarios a partir de la revisión de algunos de los artículos consultados:

- El análisis de tuberías enterradas a diferentes profundidades muestra que las tuberías menos profundas están sujetas a momentos de flexión significativamente mayores (Bayton et al., 2018).
- En general, el efecto de la carga superficial sobre el empuje desarrollado y la fuerza normal en la pared de la tubería se desvanece cuando la carga se localiza a una profundidad de aproximadamente dos diámetros (Bryden et al., 2015).
- El efecto de la carga superficial sobre las deformaciones máximas de la tubería disminuye rápidamente a medida que la carga se aleja de la tubería en la horizontal y se desvanece aproximadamente a los dos diámetros del eje vertical de la tubería (Bryden et al., 2015).
- Las deformaciones diametrales provocadas por las cargas de los vehículos no superaron el límite del 2 % sugerido por la norma *AWWA Steel Pipe – A Guide for Design and Installation* (ver también Arash Emami). La magnitud de deformación más alta medida fue de 0.2 %. En la Ilustración 4 se muestran los resultados de la investigación (Neves et al., 2021).

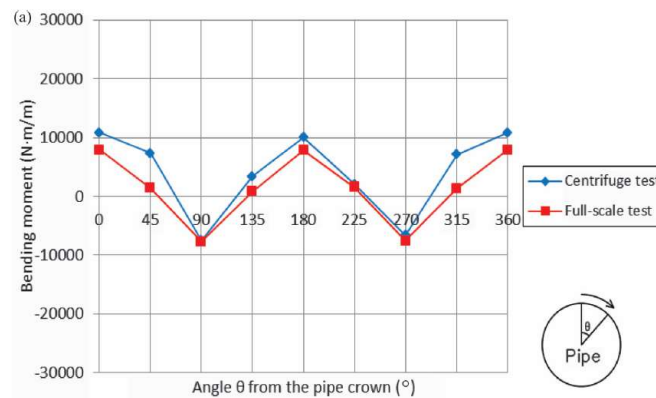
Rakitin y Ming (2016) realizaron un estudio en donde compararon los resultados de centrífuga con un modelo a escala real, y se concluyó que los resultados de la prueba de la centrífuga concordaban razonablemente con los de las pruebas a escala real (Rakitin y Ming, 2016). En la Ilustración 5 se compara el momento flector obtenido de un modelo físico en centrífuga con el obtenido en un modelo a escala real.

Ilustración 4. Sección de la tubería deformada a diferentes relaciones profundidad/diámetro y con respecto a una distancia diametral de la carga



Fuente: (Neves et al., 2021)

Ilustración 5. Flexión obtenida en un modelo en centrífuga comparado con un modelo de escala real demostrando un grado alto de coincidencia

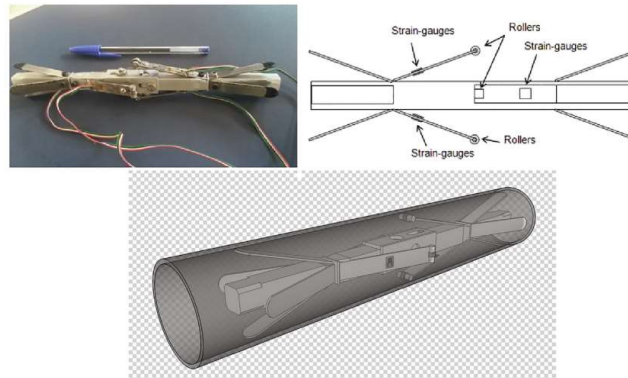


Fuente: (Rakitin & Xu, 2015).

Con respecto a la instrumentación de ensayos de tuberías enterradas, se han propuesto diversos montajes con el fin de medir deformaciones. En la Ilustración 6 se muestra la instrumentación utilizada dentro de la tubería enterrada (Saboya et al., 2020). Se instalaron

cuatro transductores para medir los cambios de diámetro en dos secciones perpendiculares entre sí.

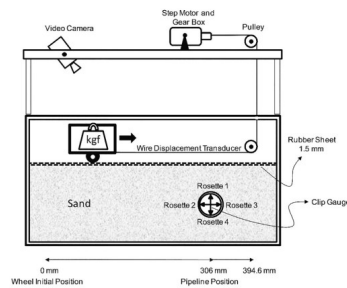
Ilustración 6. Instrumentación desarrollada por el equipo de Saboya para el estudio de tuberías enterradas en centrifuga geotécnica.



Fuente: (Saboya et al., 2020)

Con respecto a las cargas dinámicas, se han elaborado montajes complejos en la centrifuga geotécnica como los realizados por Saboya et al. (2020) en donde un motor moviliza una carga simulada de tránsito sobre una tubería. Así mismo, Saboya et al. (2020) ataron a la tubería una geomalla y concluyeron que como sistema de anclaje es prometedor y proporciona un método simple, económico y directo para mejorar la resistencia al levantamiento de tuberías enterradas (Saboya et al., 2012). En la Ilustración 7 se muestra el montaje realizado por Saboya et al. (2020).

Ilustración 7. Montaje en la centrifuga geotécnica para simular una carga de tránsito superficial sobre una tubería enterrada



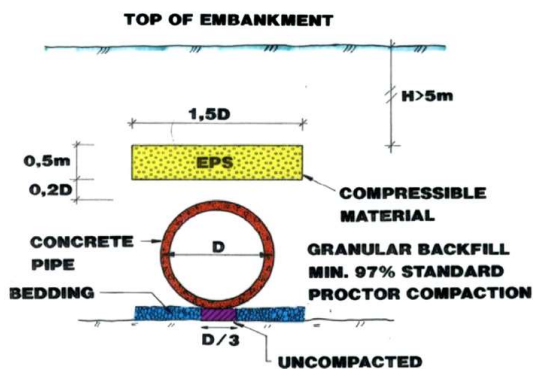
Fuente: (Saboya et al., 2020)

2.3. Análisis de protección de tuberías enterradas

Con el fin de proteger las tuberías enterradas ante cargas aplicadas sobre la superficie del terreno, se han realizado investigaciones con diferentes materiales de protección para determinar los efectos de la protección sobre las deformaciones de las tuberías. Se han empleado bloques de poliestireno expandido, geoceldas, geomallas, agregados de reciclaje de llantas (TDA), anillos de concreto o combinaciones de estos.

En general, los resultados muestran que el refuerzo mediante geoceldas produce una reducción significativa y positiva en el asentamiento de la superficie y el esfuerzo vertical en la corona de la tubería, con el consecuente aumento de la seguridad de la tubería (Almohammed et al., 2018). Por otra parte, los bloques de poliestireno expandido se pueden emplear como un sistema ligero de cubierta para proteger tuberías enterradas amenazadas por una posible ruptura como resultado de fallas del suelo (Bartlett et al., 2015). En la Ilustración 8, se muestra un esquema de protección de tuberías enterradas empleando bloques de poliestireno expandido (Bartlett et al., 2015).

Ilustración 8. Tubería enterrada y protección mediante EPS recomendada para el método de zanja imperfecta

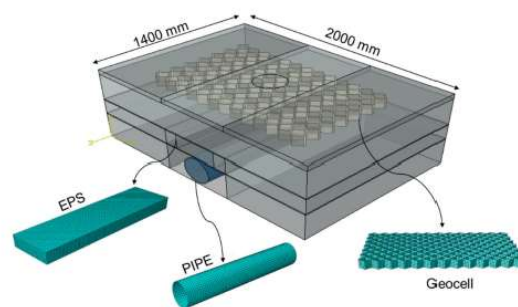


Fuente: (Bartlett et al., 2015)

Diversas investigaciones han concluido que el beneficio de utilizar refuerzo de geomalla por encima de la tubería enterrada es aumentar la capacidad de carga del suelo y disminuir la transferencia de carga a las estructuras subterráneas (Fattah et al., 2016). El uso de geoceldas con geomalla reduce significativamente la deformación de la tubería

(Kadbinakatti Sharan et al., 2014). En general, de acuerdo con mediciones se han observado reducciones de más del 50% en el esfuerzo y una reducción de más del 40% en la deformación de la tubería (Hegde & Sitharam, 2015). Por otra parte, se han obtenido conclusiones similares en la investigación de Khalaj et al. (2017; 2020) utilizando geoceldas (ver la Ilustración 9) y por otros investigadores (Mehrjardi et al., 2015; Pires & Palmeira, 2021)

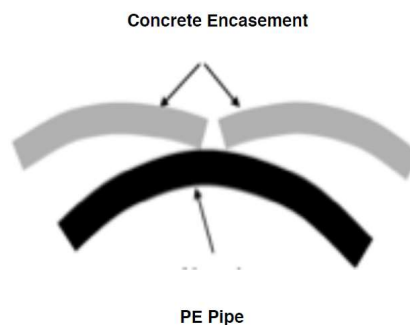
Ilustración 9. Modelo analítico empleando geoceldas para la protección de una tubería enterrada.



Fuente: (Khalaj et al., 2020)

Con respecto al revestimiento de anillos de hormigón no reforzado, se ha concluido que su comportamiento mecánico no es óptimo, dado que el hormigón no es un material estructuralmente lo suficientemente resistente para soportar las cargas estáticas y dinámicas, y produce cargas punzonantes sobre las tuberías cuando el revestimiento de hormigón se fractura como se expone en la Ilustración 10 (Mill-Pro HK, 2019).

Ilustración 10. Fractura y esfuerzo de punzonamiento en una tubería generado por un revestimiento de concreto fracturado.

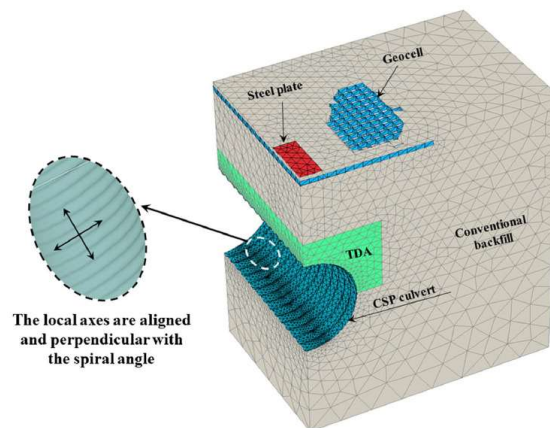


Fuente: (Mill-Pro HK, 2019)

Se han investigado protecciones mediante rellenos constituidos por agregados de reciclaje de llantas (Tire-derived aggregate: TDA) y los resultados de campo muestran que el uso de una capa de TDA sobre la tubería es significativamente efectivo para reducir los esfuerzos sobre la tubería y la magnitud de las presiones transferidas en comparación con el uso de rellenos convencionales. El TDA actúa como un colchón de esfuerzos, el cual absorbe los esfuerzos impuestos en un rango entre 20 % y 50 % y minimiza el área expuesta de la tubería a los esfuerzos producidos por las cargas externas (Mahgoub & El Naggar, 2019).

Mahboub y Naggar (2020), combinaron el empleo de geoceldas con TDA y concluyeron que el uso de una capa de TDA sobre las alcantarillas enterradas reduce los esfuerzos de la tubería antes de que ocurra la falla por punzonamiento. En la Ilustración 11 se muestra el modelo de análisis empleado por Mahgoub y Naggar.

Ilustración 11. Modelo de análisis numérico de una protección de tuberías enterradas constituida por agregado de llantas recicladas (TDA) y geoceldas



Fuente: (Mahgoub & El Naggar, 2020)

2.4. Comportamiento conceptual de tuberías enterradas sin y con protección

A continuación, en forma esquemática se incluyen figuras de esfuerzos versus profundidad, elaborados por el autor de la presente propuesta, las cuales muestran el comportamiento esperado para tres diferentes casos de tuberías enterradas sin y con protección constituida por láminas de acero.

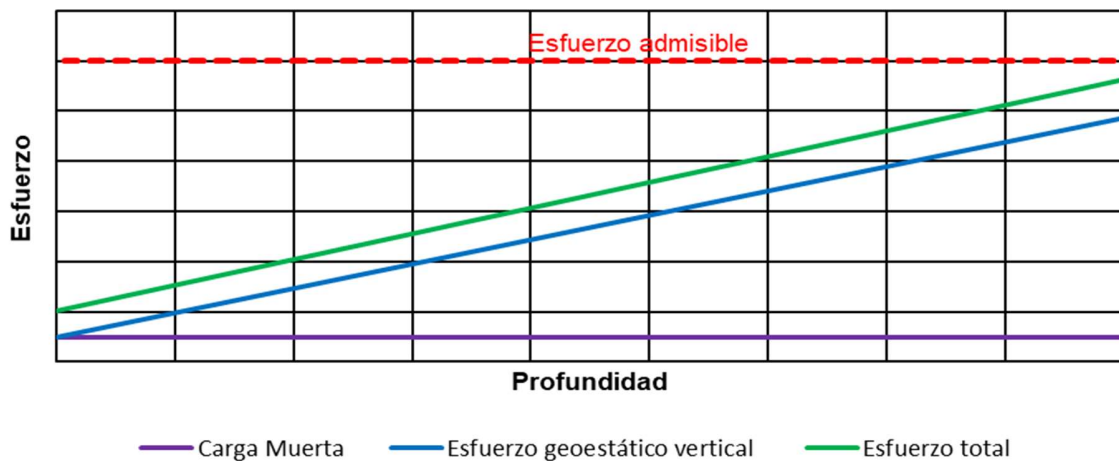
En las figuras se emplean los siguientes tipos de cargas y esfuerzos:

- Carga muerta (Cm): carga muerta permanente en el terreno.
- Carga viva (Cv): carga producto del paso de un vehículo.
- Esfuerzo geostático vertical (σ_v): producto del peso propio del suelo.
- Esfuerzo total: sumatoria de los esfuerzos por la carga muerta y la carga viva y por los esfuerzos geostáticos.
- Esfuerzo admisible: esfuerzo máximo que puede soportar una tubería.

CASO 1: TUBERÍA ENTERRADA SIN CARGA EXTERNA

La ilustración 12 se expone esquemáticamente el resultado esperado de esfuerzos versus profundidad para una tubería enterrada sin la presencia de carga viva vehicular en la superficie del terreno. Se aprecia que a medida que aumenta la profundidad, la tubería se acerca al esfuerzo máximo admisible, existe una profundidad en la cual la tubería será incapaz de soportar las cargas muertas.

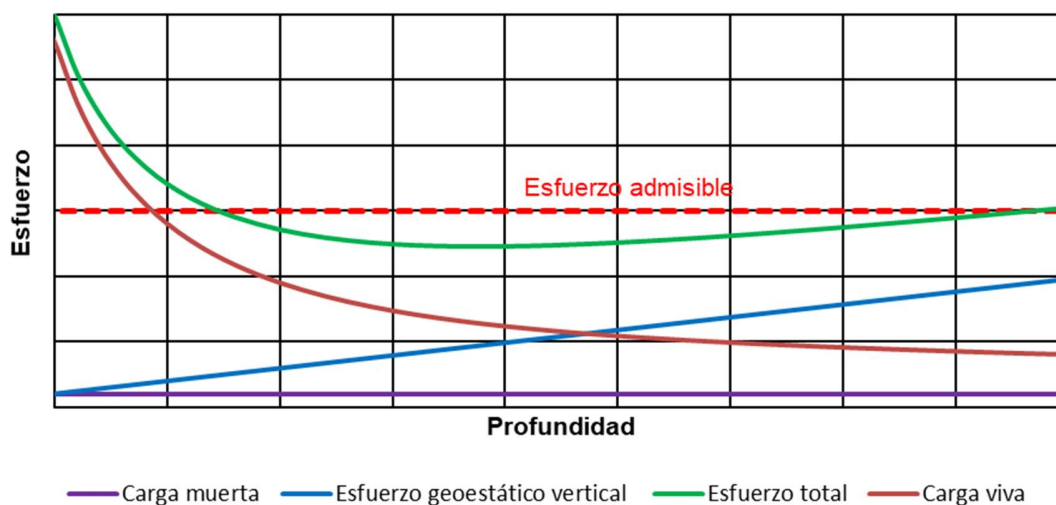
Ilustración 12. Tubería enterrada sin carga externa.



CASO 2: TUBERÍA ENTERRADA CON CARGA VIVA Y SIN PROTECCIÓN

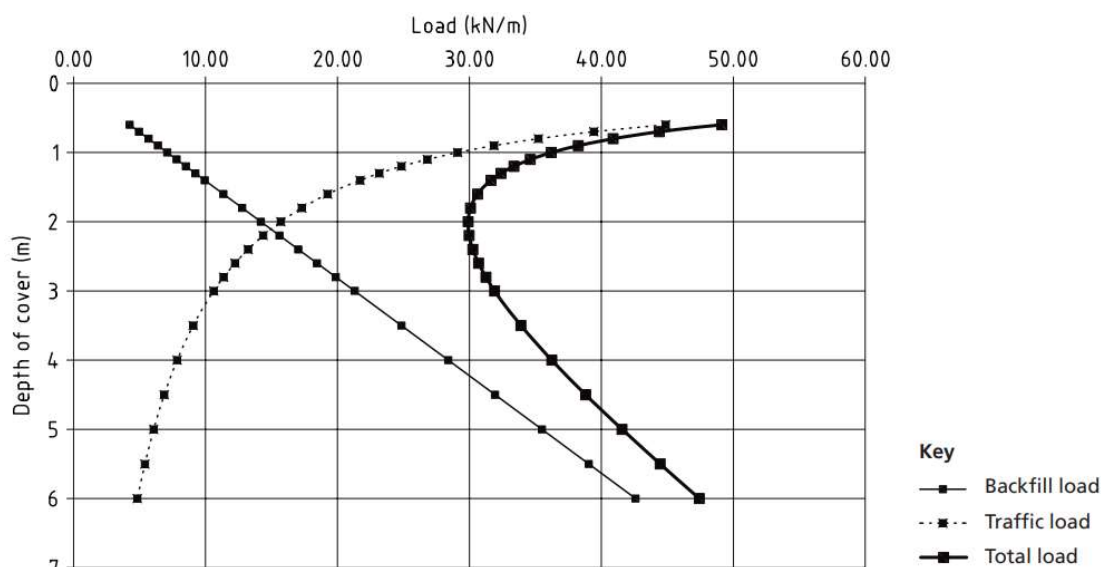
En la Ilustración 13 se expone esquemáticamente la aplicación de la carga viva por el tránsito de un vehículo. Al aplicarse la carga viva, los esfuerzos totales pueden ser superiores al esfuerzo admisible de la tubería, lo que desencadena en una afectación de esta. Se aprecia que para profundidades pequeñas los esfuerzos son muy altos.

Ilustración 13. Tubería enterrada con carga viva y sin protección.



En la Ilustración 14 se exponen los cálculos de carga típica en tuberías flexibles desarrollados en la guía para el diseño estructural de tuberías enterradas (British Standard, 2010). Se aprecia que a una profundidad aproximada de dos metros, los esfuerzos por carga muerta son superiores a la carga viva producto del tráfico.

Ilustración 14. Cargas típicas calculadas de relleno y tráfico en una tubería flexible de diámetro exterior DN355

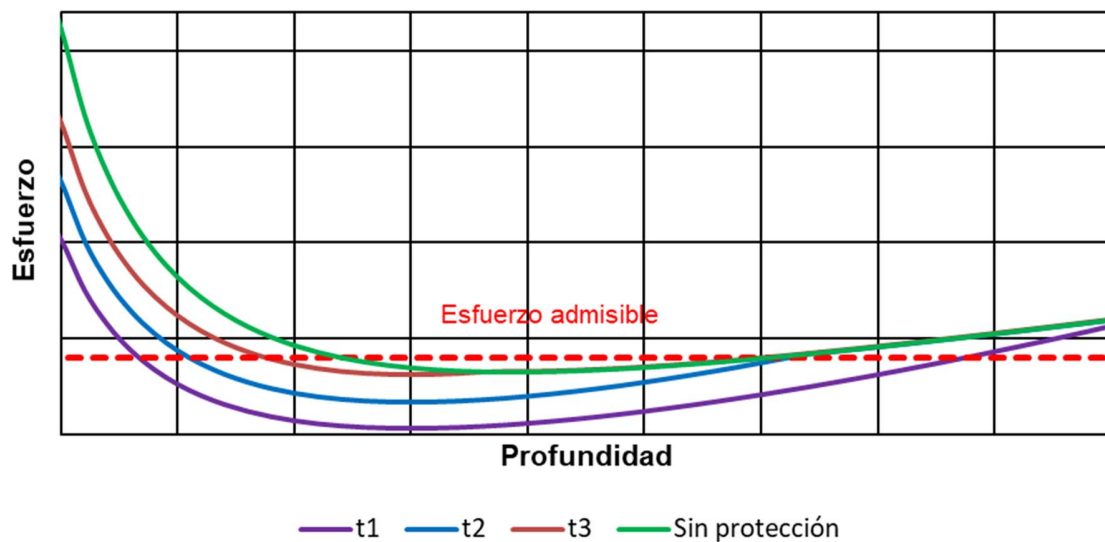


Fuente: (British Standard, 2010)

CASO 3: TUBERÍA ENTERRADA CON CARGA VIVA Y CON PROTECCIÓN

En la Ilustración 15 se expone esquemáticamente el caso de utilizar una lámina de acero, en donde a mayor espesor de esta se logra un mayor grado de protección de la tubería. Se aprecia que a mayor espesor (t_1), se obtendrá una reducción del esfuerzo sobre la tubería, alejándonos del rango admisible máximo comparación de un espesor t_3 .

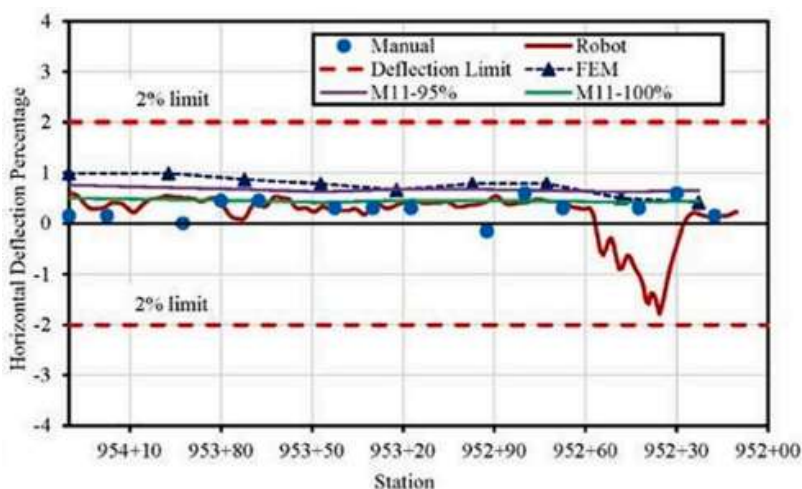
Ilustración 15. Tubería enterrada con carga viva y con protección mediante láminas de acero de diferentes espesores ($t_1 > t_2 > t_3$).



2.5. Caso de estudio

Tomando en consideración la restricción en deformación establecida por AWWA M11 de un 2% para tuberías flexibles, los investigadores Arash Emami, Himan Hojat, Amit Pokharel y Ali Abolmaali se dedicaron a examinar la presión horizontal generada por la compactación del suelo durante la instalación de una tubería flexible de gran diámetro (\varnothing 2.1 m), con un espesor de 9.5 mm y una longitud de 120 m. Esta tubería hace parte de la red *Integrated Pipeline* (IPL) construida por Tarrant Regional Water District (TRWD) en Texas. Para ello, desarrollaron un perfil que compara las deformaciones obtenidas con la deformación máxima permitida, tal como se muestra en la Ilustración 16.

Ilustración 16. Deformación de deflexión horizontal del tubo



Fuente: (Emami Saleh et al., 2021)

2.6. Comentarios finales sobre los métodos de análisis de tuberías enterradas

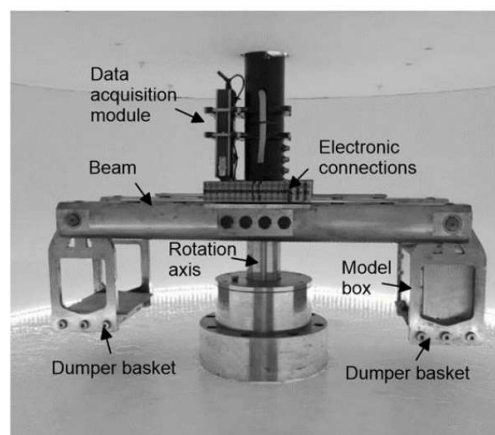
La interacción suelo-tubería enterrada es un problema muy complejo en geotecnia para el cual se requiere investigar aspectos particulares, como la protección de tuberías enterradas ante cargas superficiales. Existen muchas condiciones que controlan el comportamiento mecánico del sistema suelo-tubería enterrada, entre ellas el suelo natural, el material de relleno, las cargas y el mismo material de la tubería.

Una primera herramienta de análisis empleado en el estudio de la interacción suelo-tubería enterrada es el método de los elementos finitos. A partir de análisis numéricos se ha determinado que las predicciones bidimensionales del comportamiento del sistema suelo-tubería indican una relación casi lineal entre la deflexión de la tubería y la presión aplicada, mientras que el análisis tridimensional muestra un comportamiento no lineal, especialmente para las cargas más altas. Sin embargo, a nivel general, se ha observado que la respuesta (deformación) de la tubería al esfuerzo aplicado produce una forma elíptica deformada de la tubería (Fattah et al., 2016).

La Escuela Colombiana de Ingeniería tiene la licencia del programa RS3 de Rocscience, el cual es un programa tridimensional de elementos finitos que fue empleado en los análisis realizados en este trabajo de tesis.

Una segunda herramienta es la construcción de modelos físicos, los cuales pueden ser a escala real, lo cual involucra la construcción y el paso de vehículos, o una modelación física a escala en la centrífuga geotécnica, lo cual no es usual. En la Ilustración 17 se muestra la centrífuga perteneciente a la Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI). Esta herramienta no pudo emplearse en el desarrollo de esta investigación debido a que no se contaba con la instrumentación geotécnica que permitiera medir los datos de ensayo.

Ilustración 17. Centrífuga geotécnica perteneciente a la ECI



Fuente: (Lozada et al., 2015)

2.7. Análisis y requerimientos de la metodología con elementos finitos

2.7.1. Efectos de borde

Los efectos de borde pueden influir en las soluciones del análisis de elementos finitos de varias maneras. En primer lugar, las condiciones de borde pueden introducir restricciones que limitan la deformación o el movimiento de los elementos en los límites de la estructura. Estas restricciones pueden generar concentración de tensiones en las cercanías de los bordes, lo que lleva a respuestas locales más altas en comparación con las zonas interiores

de la estructura. Es importante considerar estos efectos para evaluar correctamente el rendimiento y la resistencia de la estructura en condiciones reales.

Además, los efectos de borde pueden tener un impacto significativo en el comportamiento global de la estructura. Las deformaciones y tensiones generadas en los bordes pueden propagarse a través de la estructura, afectando a otros elementos y modificando la distribución de las tensiones en general.

2.7.2. Modelos constitutivos del suelo

En los trabajos consultados se encontraron dos modelos constitutivos de suelo que fueron empleados en la modelación con elementos finitos: Hardening Soil y Mohr Coulomb. En la Tabla 4 se hace mención a los artículos que usaron estos modelos.

Tabla 4. Modelos constitutivos del suelo

MODELO EMPLEADO	AUTOR
Hardening Soil	(Bryden et al., 2014) ; (Zhang et al., 2002) ; (Khalaj et al., 2020) ; (Kliszczewicz, 2013) ; (Mahgoub & El Naggar, 2020) ; (Jorge Rodríguez Ordóñez et al., 2007) ; (Si Xi et al., 2019) ; (Al-Naddaf et al., 2021)
Mohr Coulomb	(Hegde & Sitharam, 2015) ; (Hodjat Shiri, 2017) ; (Mahgoub & El Naggar, 2019) ; (Mehrdadi et al., 2015) ; (Neves et al., 2021) ; (Park et al., 2020) ; (Qin et al., 2019) ; (Elshesheny et al., 2020) ; (Goltabar & Shekarchi, 2010) ; (Waqed Almohammed et al., 2018) ; (Emami Saleh et al., 2021)

2.7.3. Efectos de las interfaces

En los softwares de elementos finitos es fundamental comprender la interacción entre el suelo y la tubería. Para lograr una representación precisa, se requiere emplear una interfaz adecuada que considere las condiciones de contacto y los desplazamientos relativos entre ambos elementos. Sin esta interfaz, la tubería y el suelo se comportarían como una entidad rígida, sin la capacidad de experimentar desplazamientos relativos realistas. Esto distorsionaría los resultados y afectaría la precisión de las simulaciones.

Es importante mencionar que el software utilizado en esta investigación ofrece diversas opciones para asignar la interfaz, permitiendo adaptarla a las características específicas de cada problema. Durante la revisión de la literatura científica, se encontró que los valores empleados para la asignación de la interfaz fueron consistentes y ampliamente aceptados.

2.7.4. Von Mises stress

El esfuerzo de Von Mises es un indicador que se utiliza ampliamente para representar y analizar los esfuerzos resultantes de una carga viva aplicada sobre el suelo. Indica una medida de la combinación de los esfuerzos principales en un punto dado. A diferencia de los esfuerzos principales individuales, que pueden ser positivos o negativos, el esfuerzo de Von Mises proporciona una representación única y no direccional de los esfuerzos. Esta característica lo hace especialmente útil para evaluar la resistencia y la capacidad de deformación del suelo frente a una carga viva.

Al interpretar los resultados del esfuerzo de Von Mises, se debe tener en cuenta que valores altos indican una alta concentración de esfuerzo y, por lo tanto, un mayor riesgo de deformación o falla. Por otro lado, valores bajos indican una distribución más uniforme de los esfuerzos y una mayor estabilidad.

La fórmula completa del esfuerzo de Von Mises, teniendo en cuenta tanto los esfuerzos principales como los esfuerzos cortantes, es la siguiente:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 * \sigma_2 + 3 * \tau_{12}^2}$$

donde:

σ_1, σ_2 son los esfuerzos principales

τ_{12} es el esfuerzo cortante en la dirección 1-2

Esta ecuación incorpora tanto los esfuerzos normales (principales) como los esfuerzos cortantes en su cálculo, proporcionando una medida compuesta de los esfuerzos en diferentes direcciones.

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y PARÁMETROS PARA

EL DISEÑO

3.1. Validación del software

A continuación, se hace una descripción de las actividades realizadas en la etapa de validación de software.

Caso de estudio

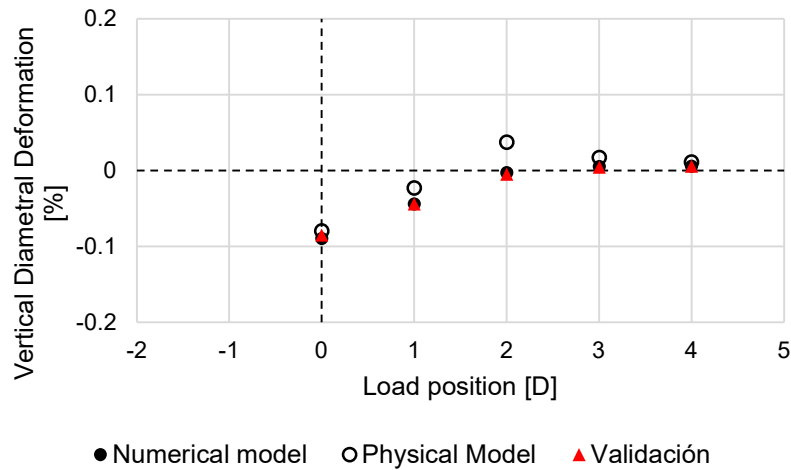
Se ha tomado como principal referencia el trabajo desarrollado por Neves et al. (2021), en el cual el Dr. Fernando Soboya, reconocido autor de diversos estudios sobre protección de tuberías enterradas ha explorado la vinculación entre la centrífuga geotécnica y el uso de software de análisis finitos.

En este estudio, el Dr. Soboya empleó el software RS3 y proporcionó pautas sobre cómo desarrollar un modelo numérico utilizando esta herramienta. Con el objetivo de lograr un aprendizaje, se ha replicó su trabajo. Entre las conclusiones obtenidas, se destaca lo siguiente:

"Los modelos físicos y numéricos son complementarios. Los modelos de centrífuga desempeñan un papel fundamental en la calibración de los modelos numéricos."

En la ilustración 18 se exponen los resultados obtenidos en el estudio de Neves et al. (2021), comparado con los resultados logrados en la etapa de validación del software. Esta gráfica se extrae del artículo "centrífuga geotécnica y modelamiento numérico de tuberías enterradas", gráfica 7, que compara la deformación vertical obtenida con respecto a la posición de la carga.

Ilustración 18. Comparación de la deformación vertical obtenida por el estudio de Neves con respecto a la validación realizada.



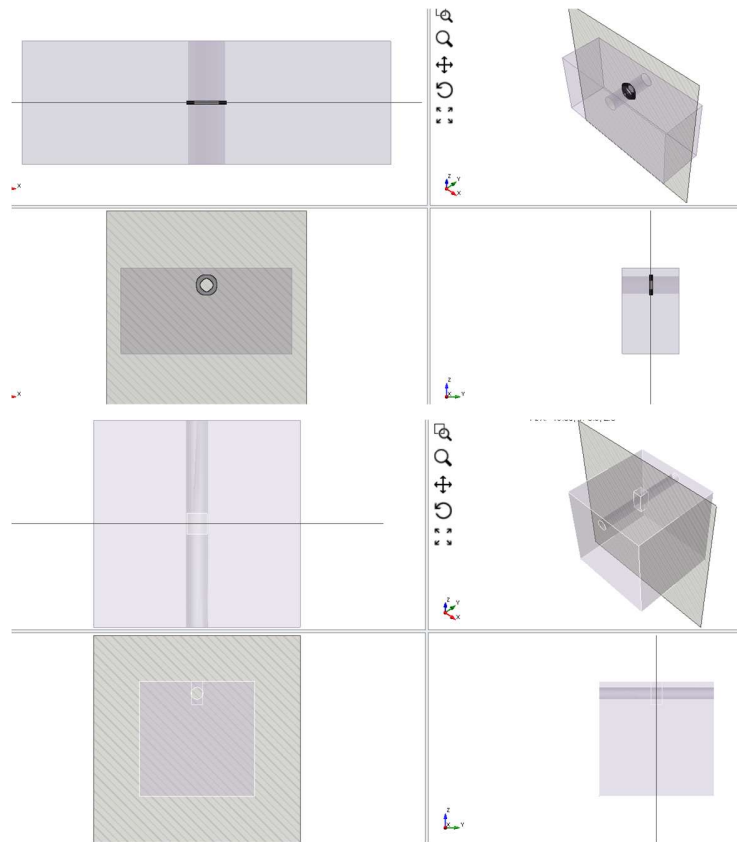
Fuente: Neves et al. (2021)

Análisis de sensibilidad geometría mínima

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad con el propósito de determinar la distancia mínima requerida entre las paredes laterales de la geometría del modelo sin que esta afectara los esfuerzos en el entorno del suelo. Se realizaron múltiples ejercicios, y siempre se buscó que la distancia no fuera menor a ocho veces el diámetro.

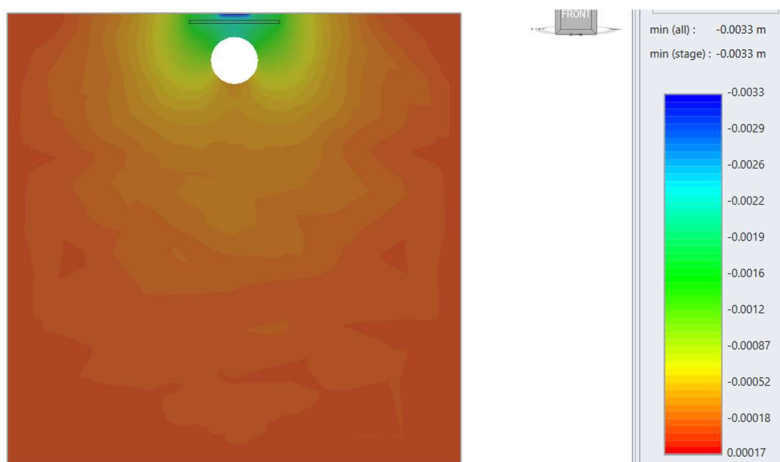
En la ilustración 19 se exponen dos ejemplos de los múltiples ejercicios que se hicieron para determinar cuál debía de ser las dimensiones mínimas para evitar problemas de borde. De manera inicial, se contempló la posibilidad de usar una geometría en forma de cuadrado, pero los recursos computacionales no se optimizaban correctamente. Identificado esto, se procedió a usar las distancias en función del diámetro, realizando modelos aumentando las dimensiones de largo, ancho y profundo desde los 4D hasta que tras una serie de procesos de ensayo y error, se determinó que las dimensiones finales debían de ser 30 m largo, 20 ancho y 10 metros de profundidad.

Ilustración 19. Ensayo y error para determinar las dimensiones óptimas para el desarrollo de la tesis



En la ilustración 20 se presenta el modelo empleado en los análisis con el cual se evitaron efectos de borde que pudieran sesgar los resultados.

Ilustración 20. Típico de análisis de desplazamientos en la tubería para comprender el efecto de borde

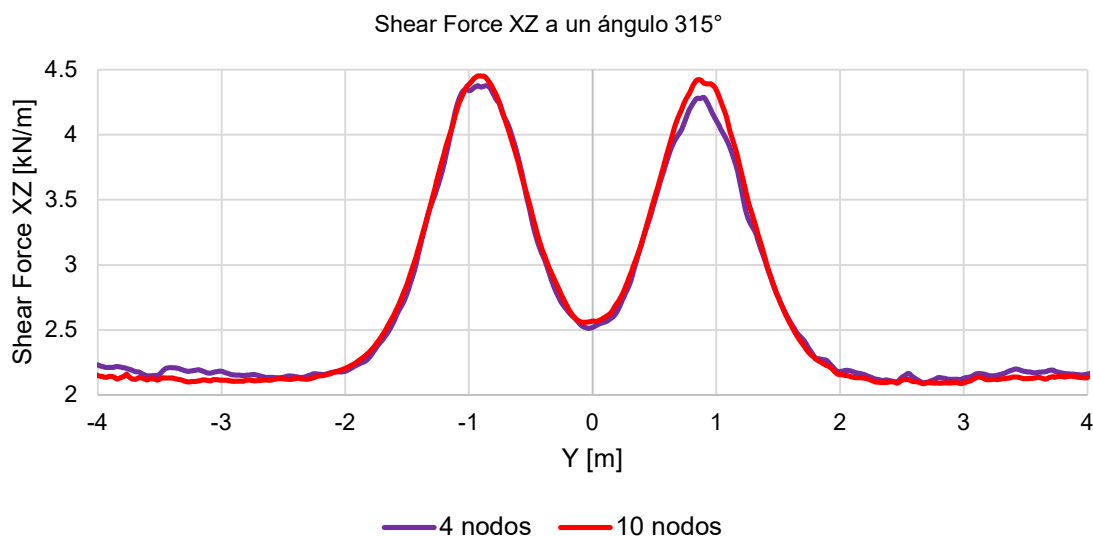


Nodos y mallado

El software ofrece dos opciones de configuración de nodos, con 4 o 10 nodos. En la última opción se requiere un mayor requerimiento computacional a nivel del tiempo requerido en el análisis. Se realizaron diversas configuraciones y se validaron directamente con un asesor de RS3. Como resultado, se determinó que el tiempo de ejecución con la configuración de 10 nodos en la computadora empleada en el trabajo es de 18 horas para cada análisis. Por la gran cantidad de modelos a desarrollar, resultó inviable esta configuración y se optó por una configuración de 4 nodos.

En la ilustración 21 se expone un resultado obtenido con 4 nodos, con respecto al resultado obtenido con 10 nodos para la fuerza cortante en el sentido XZ en un ángulo a 315° para un modelo a 0.5D de profundidad, sin lámina de protección.

Ilustración 21. Comparación de resultados de 4 nodos con respecto a 10 nodos



De este análisis presentado y de los múltiples realizados en esta etapa, se concluye que en la zona de aplicación de la carga, en donde se generan los picos de esfuerzo cortante, los modelos con 10 nodos generan una mayor suavidad en la curva con respecto al modelo de 4 nodos. Sin embargo, los valores obtenidos son idóneos para un análisis de los noventa modelos a desarrollar. Por lo anterior se estableció para el desarrollo de los casos de análisis emplear modelos con 4 nodos.

Interacción suelo – material

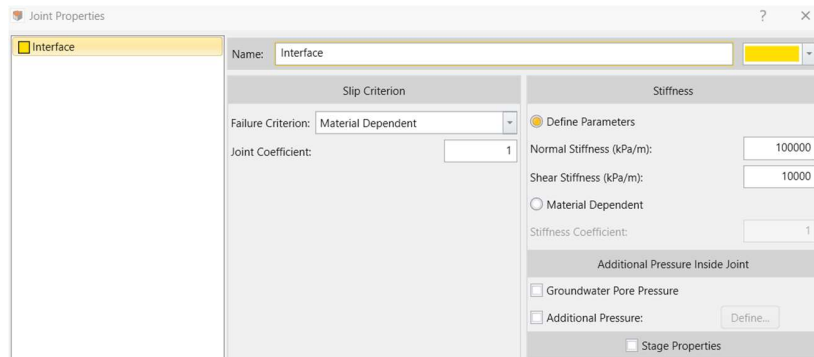
El software RS3 ofrece múltiples configuraciones y opciones de simulación para lograr una interacción óptima entre el suelo y el material, teniendo en cuenta factores como rugosidades o modos de falla. Con la asesoría proporcionada por el equipo de Rocscience, se optó por utilizar la configuración por defecto, la cual se ajusta automáticamente en función de la cantidad de nodos y el mallado configurado. La principal característica es que permite un desplazamiento entre los materiales, pero no es riguroso con el método de falla y se calcula en función del tiempo de ejecución. Dentro del contexto de la interacción suelo-estructura que se consideró para el desarrollo de esta tesis, es esencial subrayar que no se implementó ningún criterio de deslizamiento específico.

Cuando se opta por el criterio de deslizamiento "None", se establece que las uniones involucradas operan de manera elástica, respondiendo a las propiedades de rigidez en términos tanto de compresión como de corte. Bajo esta elección, se excluye la posibilidad de que se produzca deslizamiento plástico en estas uniones.

Es importante tener en cuenta que además de esta alternativa existen otros enfoques disponibles para abordar la compleja interacción entre el suelo y la estructura, como son: Mohr-Coulomb, Barton-Bandis, *Geosynthetic Hyperbolic* y *Material Dependent models*. Si se decide ajustar el Criterio de Deslizamiento siguiendo alguno de estos modelos es crucial considerar que podría presentarse deslizamiento local en las uniones. Esta situación puede ocurrir cuando el esfuerzo cortante en un componente de la unión supera la resistencia a la corte definida por los parámetros específicos del Criterio de Deslizamiento seleccionado. Mayor detalle de las interfaces se encuentra en: *Join Properties – Rocscience – User Guide*.

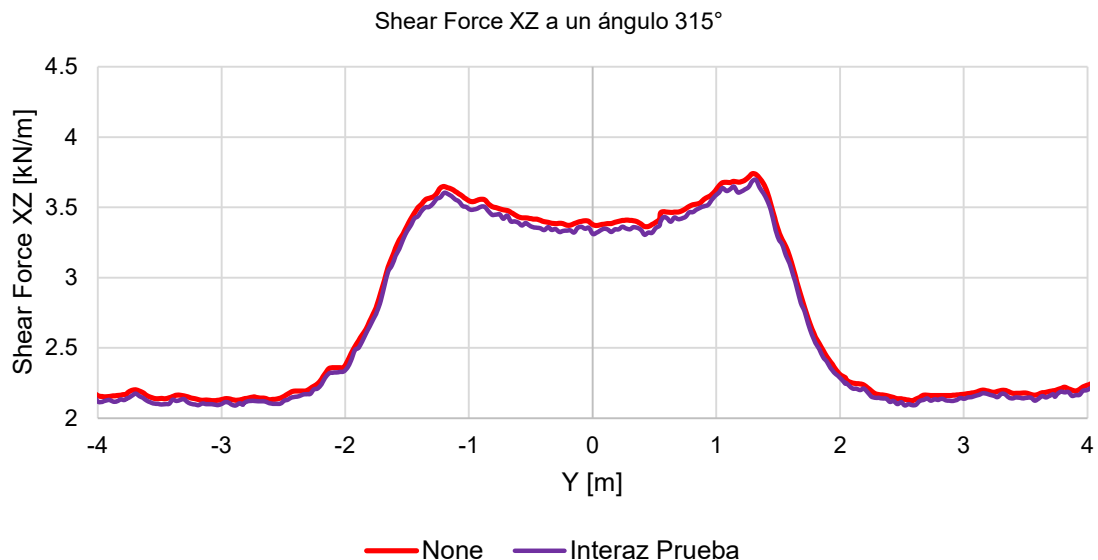
En la ilustración 22 se expone una de las configuraciones que se usaron en el software RS3, específicamente la configuración *Material Dependent* para comprender el comportamiento del sistema con diferentes interfases. En la ilustración 23 se expone un resultado obtenido con y sin esta interfaz para la fuerza cortante en el sentido XZ, en un ángulo a 315° para un modelo a 0.5D de profundidad, sin lámina de protección y una lámina de protección de 3".

Ilustración 22. Una de las configuraciones usadas en el software RS3 para determinar la variación en el sistema



En la figura 23 se muestra los resultados obtenidos al usar una configuración de interfaz *None* (color rojo) y *Material Dependent* (color magenta).

Ilustración 23. Comparación de interfases *None* y *Material Dependent*

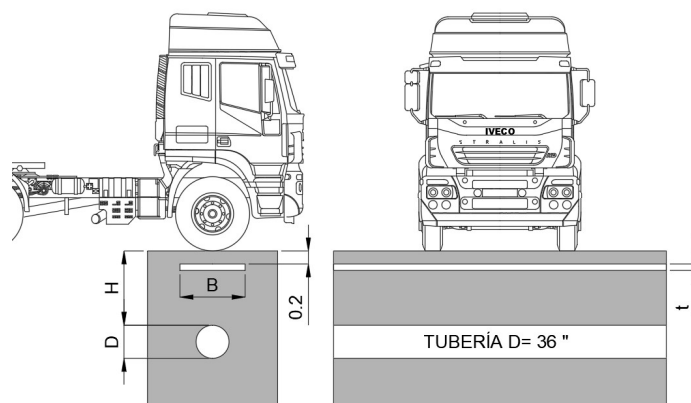


De acuerdo con los resultados obtenidos y replicando configuraciones de interfases de otros autores, los resultados de esfuerzo cortante en XZ para nuestro estudio no muestran una diferencia superior al 5%. Con respecto a los recursos tecnológicos, la interfaz *Material Dependent* aumentó el tiempo de ejecución de cada modelo en 750% y hasta 1350% para los modelos en donde el ancho de la lámina es de 2 D y la tubería está a una profundidad de 2 D.

3.2. Modelos por desarrollar

En la Ilustración 24 se ilustra en forma esquemática el problema que se analizará mediante el programa de elementos finitos RS3.

Ilustración 24. Esquema del problema que se analizará mediante el programa RS3



3.2.1. Modelo sin protección mecánica

En la Tabla 5 se expone los parámetros de entrada para el modelamiento desarrollado sin protección mecánica.

Tabla 5. Parámetros de entrada de los modelos desarrollados sin protección

VARIANTE	DESCRIPCIÓN	MODELOS
Profundidad tubería (H)	0.5 D – 1 D – 1.5 D	3
Tipo de suelo	Arena: Suelta – Media – Densa	3
Total de modelos de cálculo		9

3.2.2. Modelo con protección mecánica

En la Tabla 6 se expone un resumen de los modelos a desarrollar con protección mecánica, en donde se listan los cuatro parámetros del problema que se variarán en los análisis de elementos finitos.

Tabla 6. Parámetros de entrada de los modelos desarrollados con protección

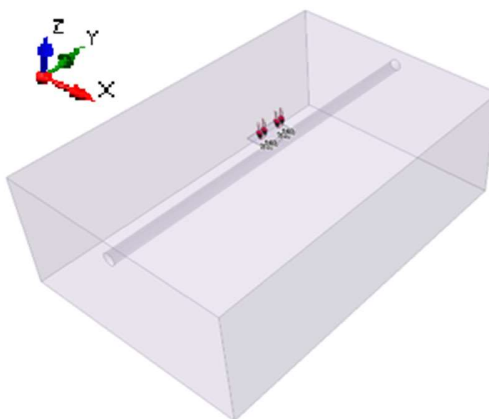
VARIANTE	DESCRIPCIÓN	MODELOS
Profundidad (H)	0.5 D – 1 D – 1.5 D	3
Tipo de suelo	Arena: Suelta – Media – Densa	3
Espesor lámina (t)	1/8 " – 1 " – 3 " 3.2 – 25.4 – 76.2 mm	3
Ancho lámina (B)	1 D - 1.5 D - 2 D	3
Total de modelos de cálculo		81

Fueron desarrollados un total de 90 modelos de cálculo con el programa RS3.

3.3. Sistema de referencia

En la Ilustración 25 se aprecia el sistema de referencia usado por RS3.

Ilustración 25. Sistema de referencia usado por RS3



3.4. Materiales

3.4.1. Suelo de atraque de la tubería

En la Tabla 7 se expone los parámetros del suelo que se está empleando con el fin de lograr una densificación del material.

Tabla 7. Suelo de atraque en donde se expone una densificación

MATERIAL	γ Peso Unitario Seco [kN/m ³]	E Módulo de Elasticidad [Kpa]	U Relación de Poisson	\emptyset Ángulo de fricción interna [°]
Arena suelta	13	5000	0.3	28
Arena media	16	20000	0.3	36
Arena densa	19	40000	0.3	45

Se usará el modelo de falla Mohr Coulomb para modelar el suelo ($\tau = c' + \sigma' * \tan \emptyset$) y no se contempla agua al interior del suelo.

3.4.2. Lámina de acero

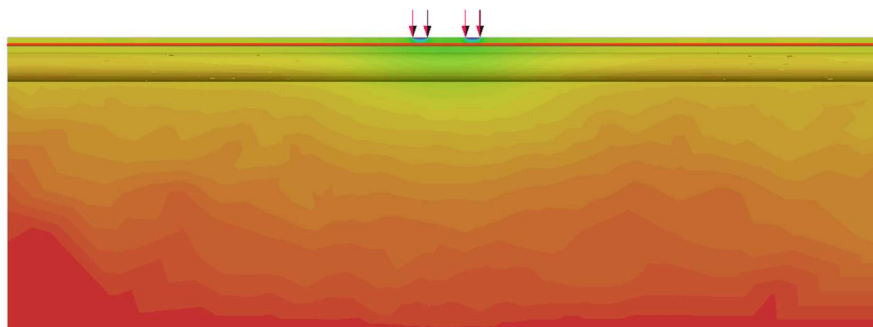
En la Tabla 8 se exponen los valores para el modelamiento de la lámina de acero.

Tabla 8. Valores de la lámina de acero

MATERIAL	γ Peso Unitario Total [kN/m ³]	E Módulo de Elasticidad [Kpa]	U Relación de Poisson	¿PESO PROPIO?
Acero	77	2 E+8	0.3	SI

En un principio, se decidió que la longitud de la lámina de acero coincidiera con la longitud del modelo. No obstante, esta elección restringía el movimiento de la tubería y evitaba que se produjeran deformaciones por pandeo. El impacto de esta limitación se visualiza en la Ilustración 26, en donde toda la deformación solo ocurrió en la dirección Z vertical.

Ilustración 26. Desplazamiento con lámina de acero infinita dirección -Z



Para evitar este fenómeno y que fuera coherente con la realidad, se llevó a cabo un análisis de los esfuerzos Von Mises para determinar a partir de qué distancia los efectos de la carga aplicada se volvían insignificantes (ver 2.7.4 Von Mises stress). Se encontró que a una distancia de 0.3 m ya no se observaban efectos laterales significativos.

Con base en este análisis, se determinó que el largo total de la lámina de protección debía ser de 2.9 m (ancho del camión de extremo a extremo es de 2.3 m). En la Ilustración 27, se aprecia el desplazamiento en Z positivo sin la limitación de la lámina de acero a lo largo de toda la tubería.

Ilustración 27. Desplazamiento con lámina de acero acorde a la realidad dirección +Z

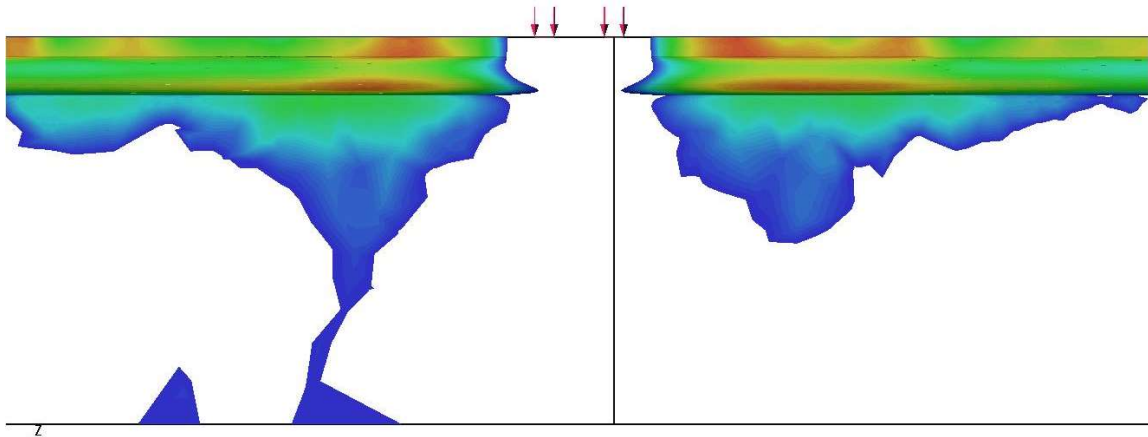
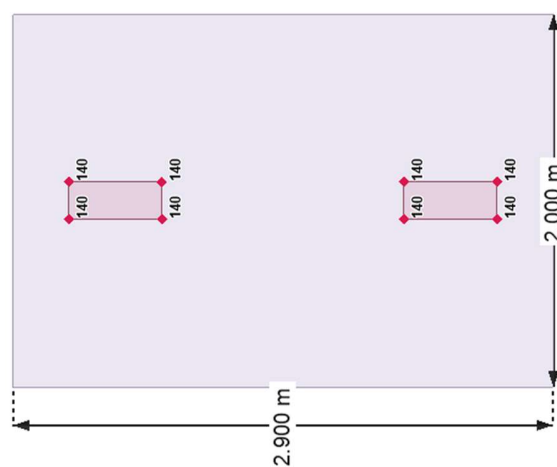


Ilustración 28. Dimensionamiento de la lámina de acero en el modelo con respecto a la aplicación de la carga en kN.



3.4.3. Tubería

Para definir los parámetros de configuración de la tubería se llevaron a cabo consultas con proveedores como Durman y Pavco, así como la revisión de artículos científicos que utilizaban tuberías de PVC para modelamiento de tuberías enterradas. En la Tabla 9, se exponen los resultados obtenidos.

Tabla 9. Parámetros de entrada del modelo a desarrollar

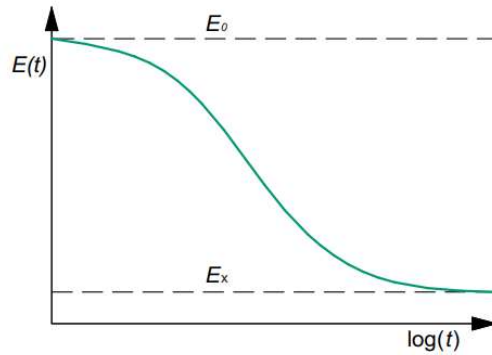
MATERIAL	E (LARGO PLAZO) Módulo de Elasticidad [Kpa]	U Relación de Poisson	ESPESOR [mm]	¿PESO PROPIO?
TUBERÍA PVC	2.800.000	0.4	3.81	NO

En relación con el peso propio de la tubería, es importante señalar que se omitió el peso de acuerdo con las recomendaciones de Rocscience. Esta elección se basa en el hecho de que el análisis se está llevando a cabo bajo la premisa de que la tubería se encuentra vacía, lo que hace que la fuerza ejercida por su propio peso sobre el suelo sea despreciable. Esta configuración específica ha sido adoptada con el propósito de agilizar los tiempos de ejecución.

Durante el desarrollo de la tesis se realizó una comparativa entre las condiciones de la tubería con y sin su propio peso, evidenciando diferencias en el orden de décimas de milímetro. Para configuraciones más complejas que involucren consideraciones de fuerzas del fluido y modelos con 10 nodos, se recomienda incorporar el efecto del peso propio de la tubería.

Con respecto al módulo de elasticidad reducido empleado en los análisis realizados en el desarrollo de esta tesis se basa en que la resistencia se va reduciendo a lo largo de su vida útil (ver Ilustración 29), tal como se establece en los manuales de *Plastic Pipe Institute*, *Chevron Philips Chemical Company* (Khademi-Zahedi, 2019). Lo anterior producto del contacto con el suelo, agua, contenido de potencial de hidrógeno (pH), radiación solar, temperatura, entre otros factores. En la investigación realizada no se encontró con claridad un valor “típico” de diseño dado que esto depende de cada problema en específico. Se optó por usar los módulos de elasticidad indicados por el proveedor.

Ilustración 29. Relajación del módulo de elasticidad a través del tiempo para el PVC



Fuente: (Quesada, 2019)

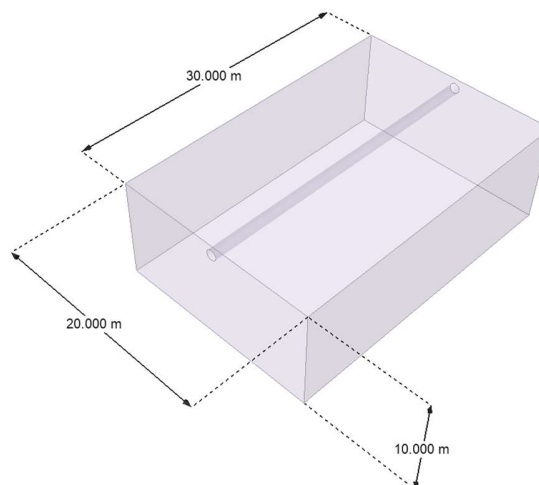
3.5. Etapas

Siguiendo el estudio de Neves (2021), se decidió realizar únicamente una etapa de análisis, con el objetivo de enfocarse exclusivamente en el efecto de una sobrecarga sobre la tubería. Para este propósito, se consideró que no era necesario tomar en cuenta el proceso constructivo por etapas.

3.6. Geometría

La dimensión optada para el modelo es de 30 m de largo (30D), 20 m de ancho (20D) y 10 m de alto (10D). En la Ilustración 30, se aprecia el modelo realizado.

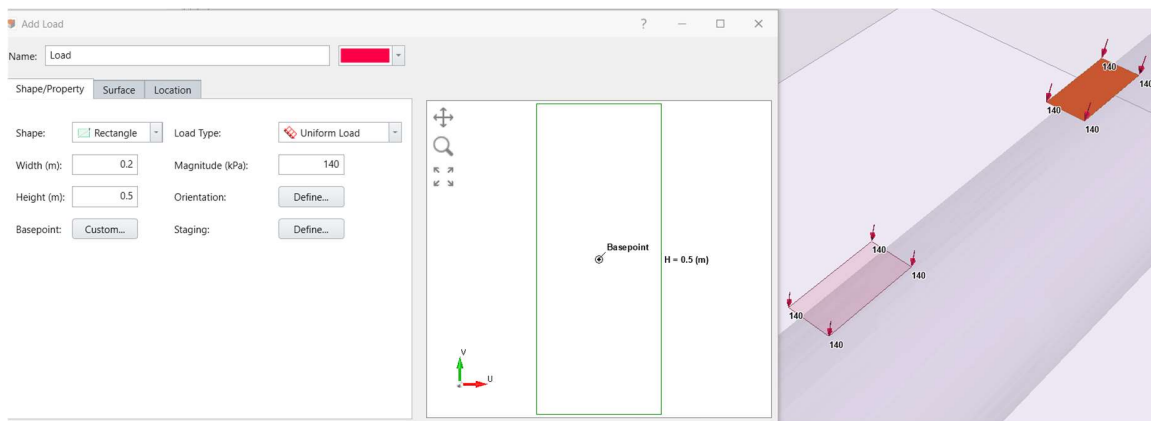
Ilustración 30. Geometría para el desarrollo FEM



3.7. Aplicación de cargas

Se hace la modelación de la carga de acuerdo con recomendaciones del CCP 14, en donde se indica un largo de 500 mm y ancho 250 mm, separadas por una distancia de 1800 mm de centro a centro. El valor de la carga aplicada inicial en el eje es de 140 kN. Teniendo en cuenta las diferentes normativas, artículos consultados, conceptos de amplificación de carga de impacto, frenado, se estableció un valor de carga aplicado de 140 kN en un área de 500 x 250 mm. Ver Ilustración 31

Ilustración 31. Geometría de aplicación de carga



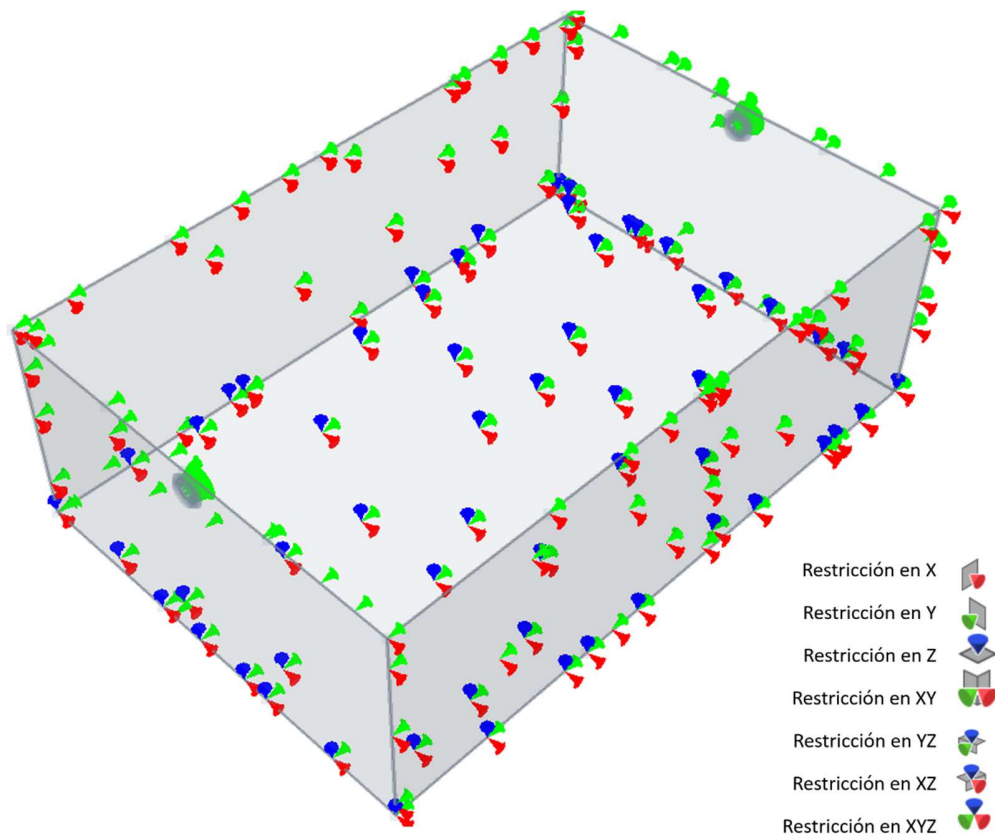
Adicionalmente, se toma en cuenta las cargas máximas de las llantas traseras y no un intermedio, teniendo en cuenta las conclusiones del estudio realizado por Rakitin y Xu (2015), donde se demostró que se tiene más influencia por las cargas puestas de manera axial al tubo.

3.8. Restricciones

Siguiendo las recomendaciones de Rocscience y con base en los múltiples modelos desarrollados, se estableció una serie de restricciones para el análisis. Se aplicó una restricción de un grado de libertad en paralelo a la tubería, dos grados de libertad en perpendicular a la tubería, tres grados de libertad en el fondo del modelo y se consideró la

superficie libre. Estas restricciones se implementaron con el objetivo de garantizar una representación adecuada de las condiciones de contorno y asegurar la coherencia y estabilidad del análisis. En la Ilustración 32 se expone las restricciones que se aplicaron a cada modelo de análisis.

Ilustración 32. Restricciones empleadas



3.9. Mallado

Se realiza un mallado con 4 nodos. Por defecto, el software toma un mallado más fino en la zona de la lámina de acero y en la tubería. En la Ilustración 33 se aprecia el mallado realizado.

Ilustración 33. Mallado del modelo corte XZ

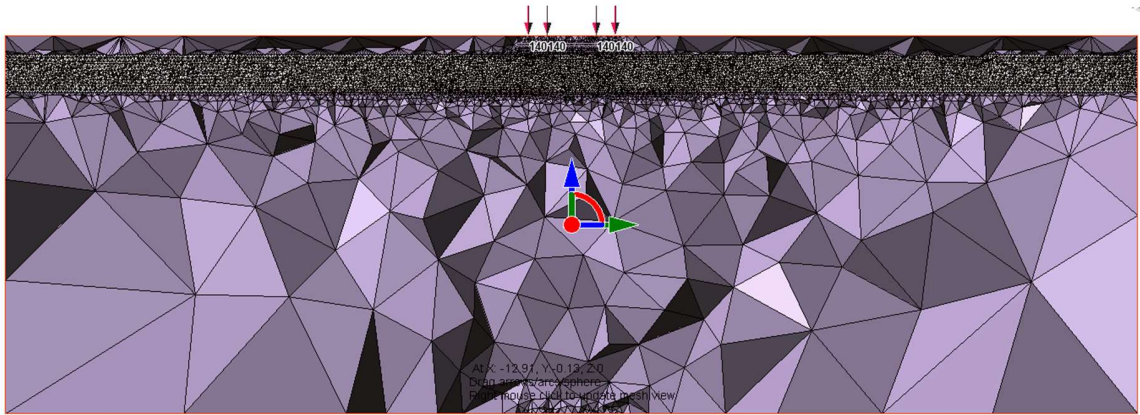
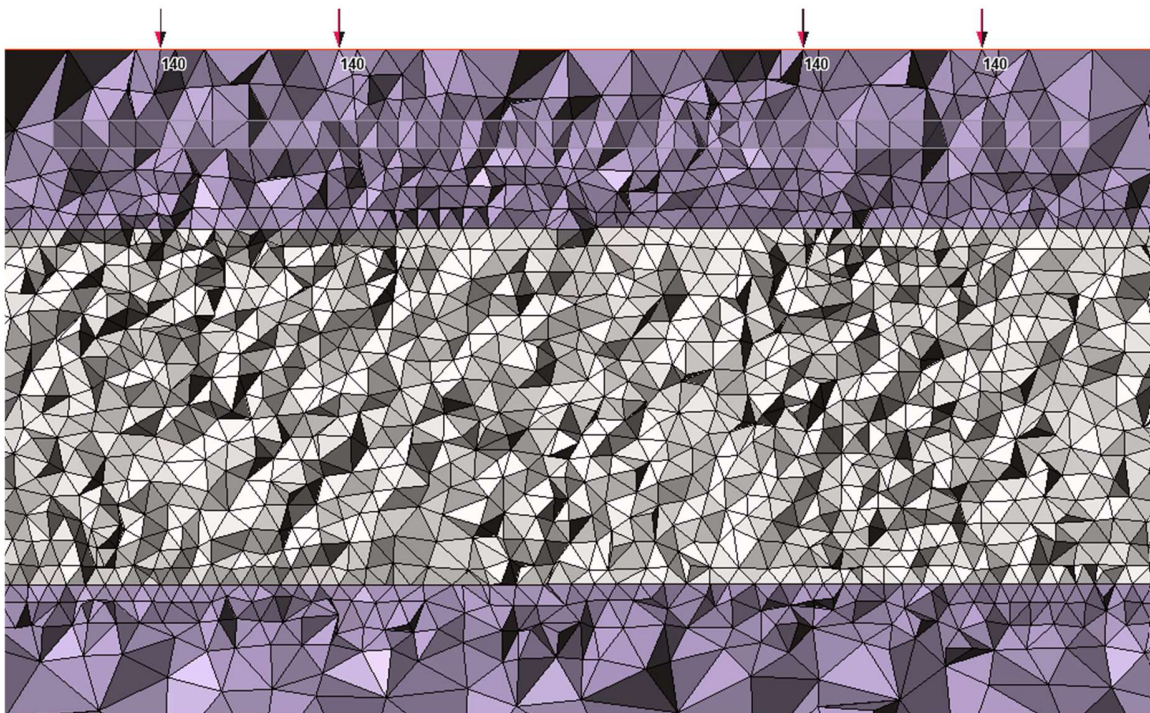


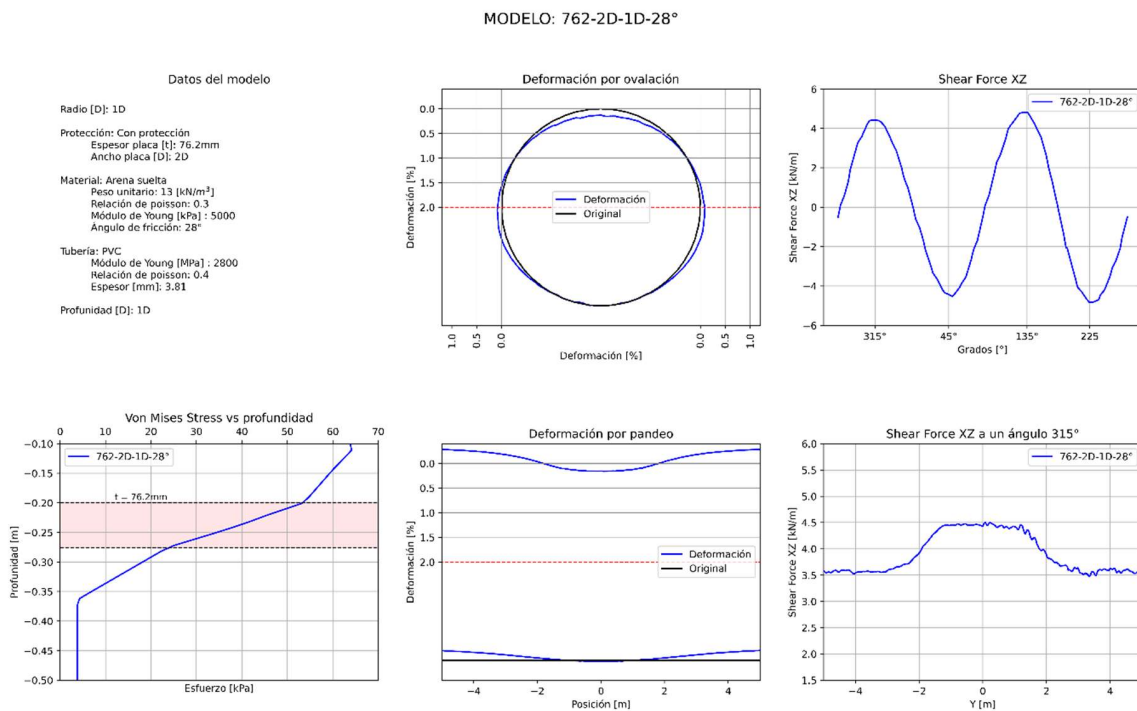
Ilustración 34. Mallado del modelo corte XZ con zoom en la lámina de acero



3.10. Ficha técnica

Con el objetivo de presentar de forma clara los 90 modelos desarrollados, se ha creado una ficha técnica para cada uno de ellos. Cada ficha consta de 8 elementos. En la Tabla 10 se muestra una descripción detallada de cada uno de estos elementos, mientras que la Ilustración 35 proporciona una vista general de la ficha técnica.

Ilustración 35. Ficha técnica desarrollada.



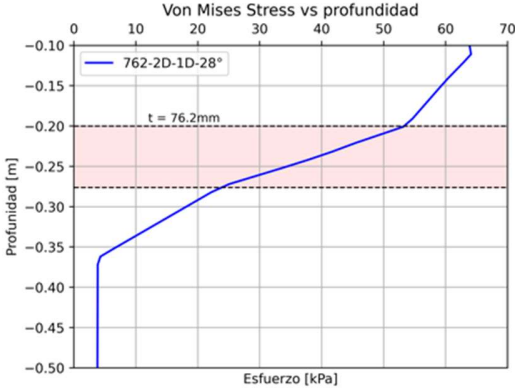
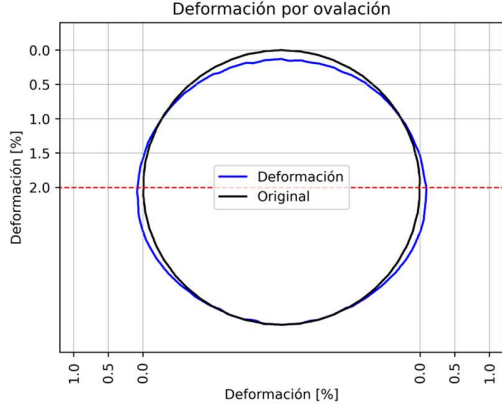
Con el fin de identificar fácilmente cada modelo realizado, se maneja en el nombre la siguiente convención:

Espesor – ancho lámina – profundidad – ángulo fricción

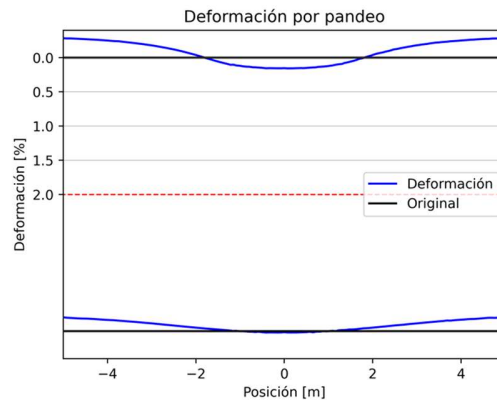
Como ejemplo:

762-2D-1D-28

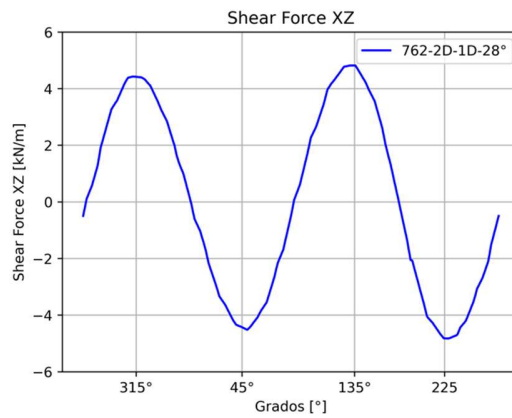
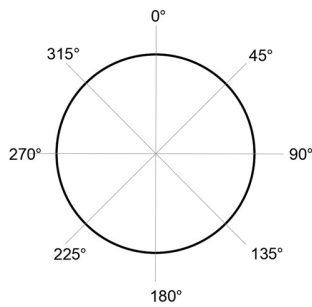
Tabla 10. Componentes de la ficha técnica

DESCRIPCIÓN	REPRESENTACIÓN
<p>1. Expone los datos del modelo para su identificación.</p>	<p style="text-align: center;">Datos del modelo</p> <p>Radio [D]: 1D</p> <p>Protección: Con protección Espesor placa [t]: 76.2mm Ancho placa [D]: 2D</p> <p>Material: Arena suelta Peso unitario: 13 [kN/m³] Relación de poisson: 0.3 Módulo de Young [kPa] : 5000 Ángulo de fricción: 28°</p> <p>Tubería: PVC Módulo de Young [MPa] : 2800 Relación de poisson: 0.4 Espesor [mm]: 3.81</p> <p>Profundidad [D]: 1D</p>
<p>2. Presenta el análisis del esfuerzo realizado por Von Mis en relación con la profundidad, abarcando desde los 10 cm hasta los 50 cm.</p>	
<p>3. Presenta información sobre la deformación de la tubería en perpendicular, lo que permite observar el fenómeno de ovalación. Adicionalmente, se muestra la limitación del 2% con el fin de tener una referencia.</p>	

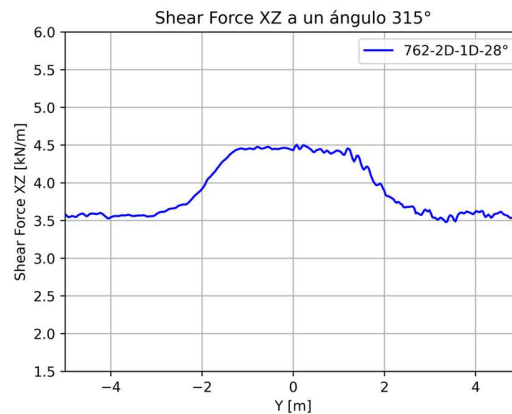
4. Presenta información sobre la deformación de la tubería en paralelo, lo que permite observar el fenómeno del pandeo. Adicionalmente, se muestra la limitación del 2% con el fin de tener una referencia.



5. Presenta la fuerza cortante que sufre la tubería en el sentido XZ con respecto al ángulo (manecillas del reloj) en todo el centro de la carga aplicada.



6. Presenta la fuerza cortante a lo largo de la tubería con respecto al ángulo de 315°.



CAPITULO IV

ANÁLISIS NUMÉRICO DESARROLLADO

4.1. Análisis paramétrico de tuberías enterradas sin lámina de protección

Es fundamental mantener la claridad acerca de las dimensiones en consideración. El diámetro de análisis de la tubería es de 1 m y la carga muerta adquiere mayor relevancia a una profundidad de 2 m. Esto implica que si la tubería se encuentra enterrada a 1.5 m, la cota del fondo estará situada a una profundidad de 2.5 m, perdiendo interés la carga viva. Así mismo, la carga viva está aplicada a 0.9 y -0.9 m en la superficie del terreno.

4.1.1. Efecto de la profundidad de la tubería

Dentro de los datos extraídos de los 9 modelos, se puede apreciar claramente el efecto de la profundidad al analizar los gráficos de Fuerza Cortante. Estos gráficos revelan cómo la magnitud de la fuerza cortante varía en función de la profundidad a la que se encuentra la tubería enterrada. En la Ilustración 36 se muestra el gráfico de fuerza cortante en el plano XZ bajo la carga aplicada. En dicho gráfico, se observa que a una profundidad de 0.5D hay un mayor esfuerzo cortante en un ángulo de 315° en comparación con un ángulo de 135°. A una profundidad de 1D, los esfuerzos tienden a ser uniformes, mientras que a 1.5D de profundidad, los esfuerzos son mayores en un ángulo de 135°.

En la Ilustración 37, se puede observar que a una profundidad de 0.5D, el esfuerzo cortante genera una deformación con picos (bajo la carga aplicada), el esfuerzo cortante produce una deformación con picos pronunciados bajo la carga aplicada. Sin embargo, a medida que la profundidad aumenta, como se aprecia en 1.5D, este efecto de picos en la deformación tiende a desaparecer y se genera una deformación más uniforme en la tubería.

Ilustración 36. Efecto de la profundidad de la tubería ovalación para arena suelta

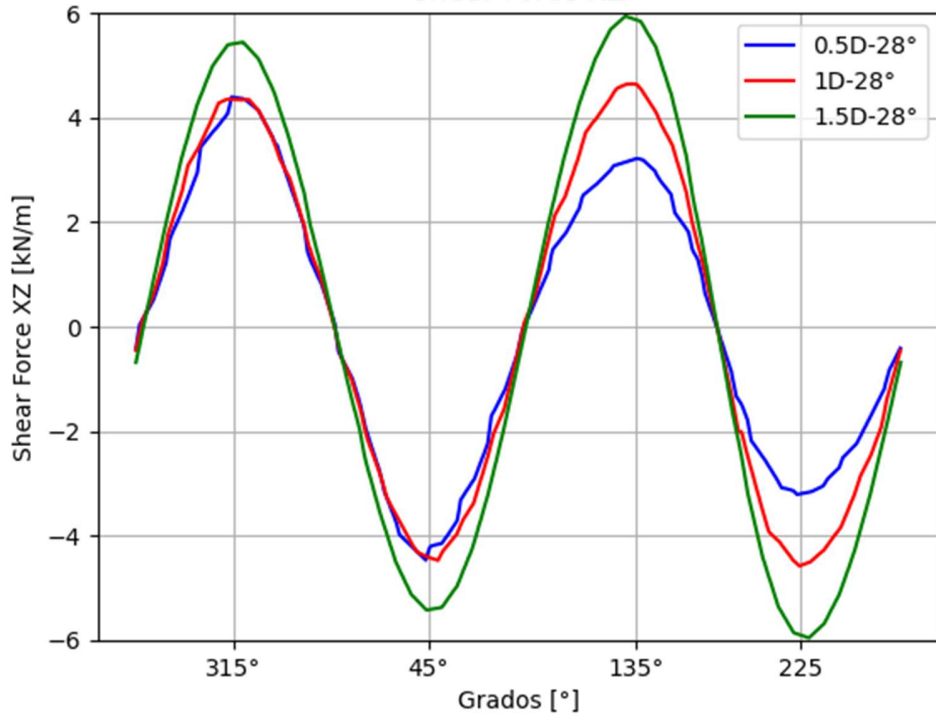
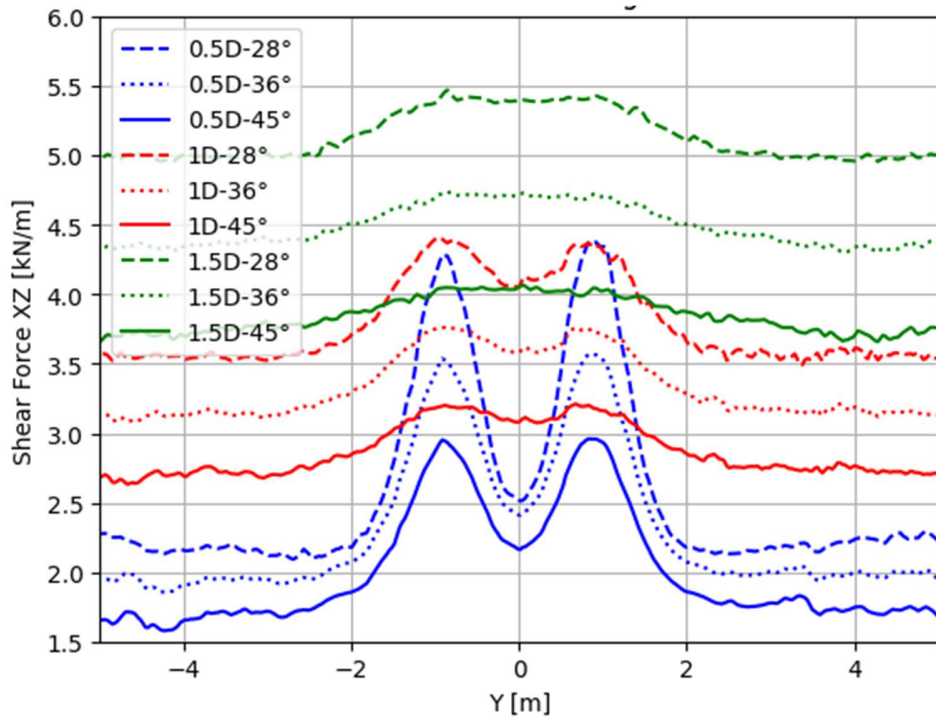


Ilustración 37. Efecto de la profundidad de la tubería pandeo



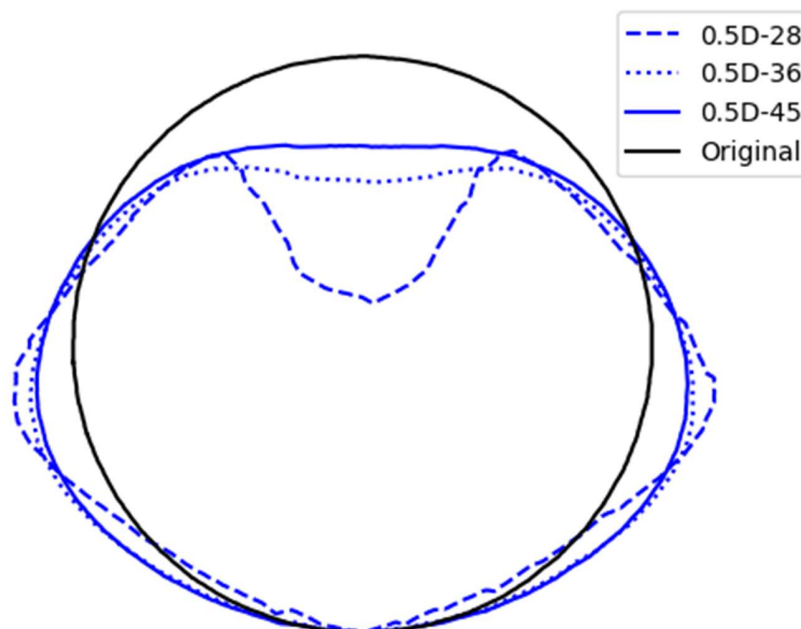
4.1.2. Efecto de la densificación del suelo

Como se aprecia en la Ilustración 37, al aumentar la densificación del suelo se puede observar una disminución en el esfuerzo cortante, especialmente en los picos de esfuerzo cortante que se producen bajo la aplicación de la carga. Esta reducción en los picos de esfuerzo cortante contribuye a evitar deformaciones excesivas en la tubería.

Asimismo, se aprecia que a medida que se aumenta la densificación del suelo, en general, el esfuerzo cortante disminuye. Esto indica que una mayor compactación del suelo resulta en una distribución más uniforme de las fuerzas cortantes en la tubería, lo que a su vez favorece su estabilidad y resistencia ante las cargas aplicadas.

En relación con la ovalación, en la Ilustración 38 se observa que en el caso más crítico (0.5D), la deformación por ovalación presenta una disminución. Cabe destacar que el gráfico no se encuentra representado a escala real.

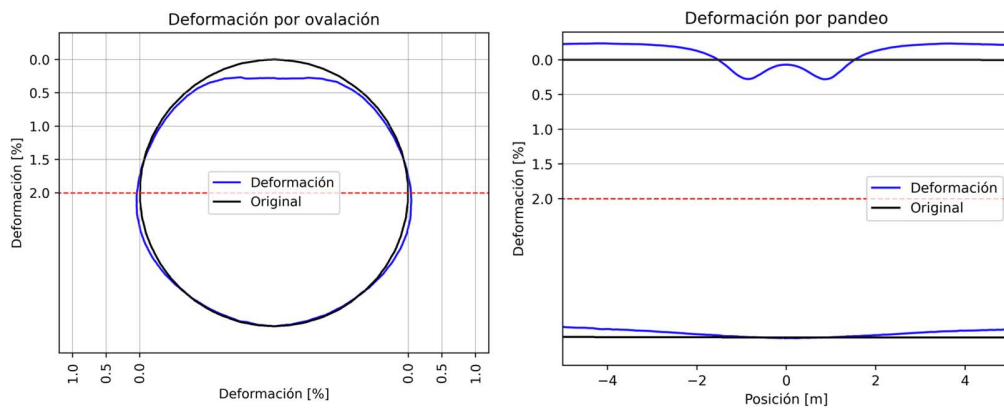
Ilustración 38. Efecto de la densificación del suelo sin escala



4.1.3. Resumen

En la situación más crítica, que de acuerdo al análisis corresponde a una profundidad de 0.5 m y una arena suelta, se pudo observar que la deformación no superó el umbral del 0.5% (ver Ilustración 39). Estos resultados son similares a los obtenidos en investigaciones previas realizadas por Navas et al. (2020). Además, al revisar diversas referencias consultadas, se encontraron resultados consistentes con esta tendencia. Estos hallazgos indican que el comportamiento de la tubería muestra una buena capacidad de resistencia y estabilidad ante las condiciones críticas evaluadas.

Ilustración 39. Densificación crítica 0.5D – 28°



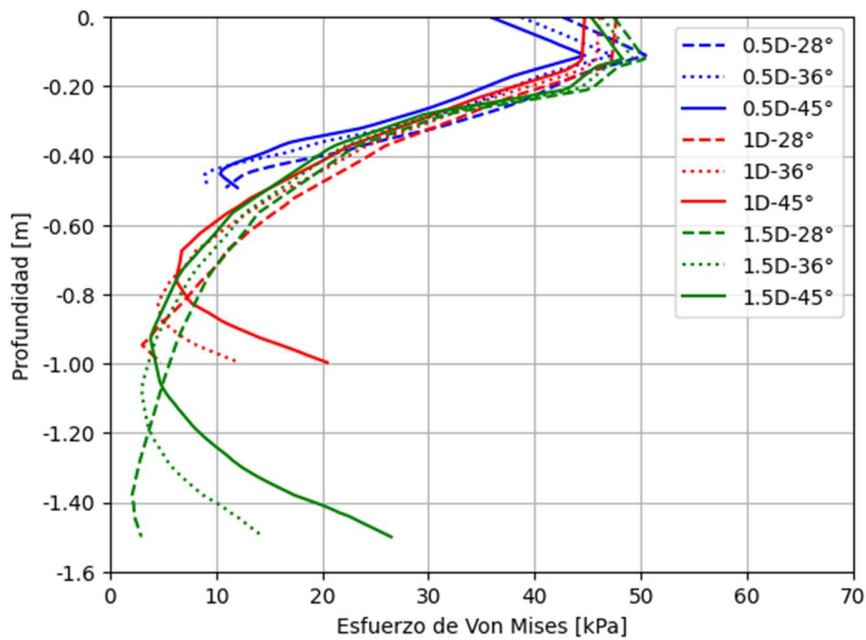
En la Tabla 11 se indica el número del modelo, el nombre y la página en la que puede ser consultada la ficha técnica.

Tabla 11. Resumen de los efectos sin protección mecánica

#	NOMBRE MODELO	PAG	#	NOMBRE MODELO	PAG	#	NOMBRE MODELO	PAG
1	0.5D-28	93	4	1D-28	96	7	1.5D-28	99
2	0.5D-36	94	5	1D-36	97	8	1.5D-36	100
3	0.5D-45	95	6	1D-45	98	9	1.5D-45	101

En la Ilustración 40 se expone la gráfica del esfuerzo Von Mises desde una profundidad de 0.10 m hasta una profundidad de 1.5 m.

Ilustración 40. Máximo esfuerzo Von Mises con respecto a la profundidad



4.2. Análisis paramétrico de tuberías enterradas con lámina de protección

4.2.1. Efecto del ancho de la lámina

Con el propósito de analizar el impacto del ancho de la lámina en la disipación del esfuerzo generado por una carga vehicular sobre la tubería, se emplea el esfuerzo cortante para llevar a cabo dicho análisis. El procedimiento es el siguiente:

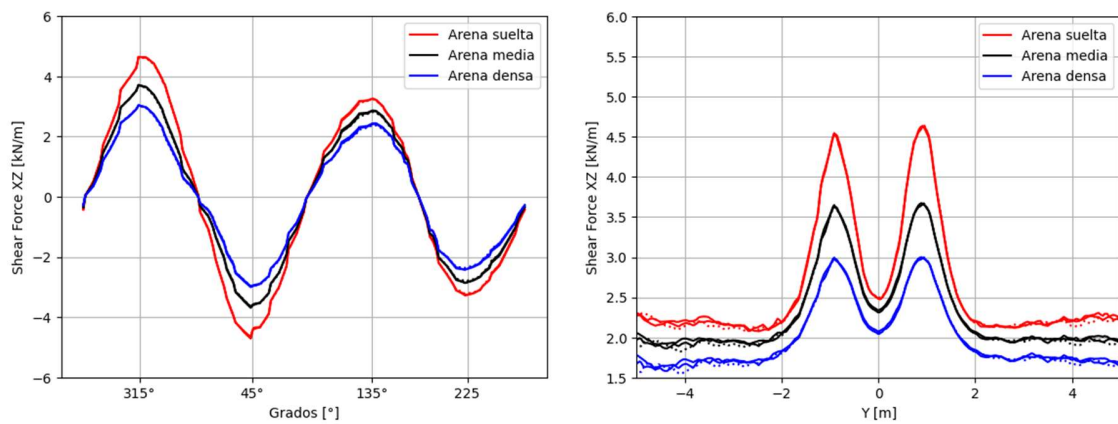
- En color rojo, se graficó el ancho de 1D, 1.5D y 2D para arenas sueltas.
- En color negro, se graficó el ancho de 1D, 1.5D y 2D para arenas medias.
- En color azul se graficó el ancho de 1D, 1.5D y 2D para arenas densas.

Este ejercicio se realiza para una profundidad de 0.5D, 1D y 1.5D y se repite para un espesor de lámina de acero de 3.2 mm, 25.4 mm y 76.2 mm.

4.2.1.1. Análisis para una lámina espesor de 3.2 mm a diferentes profundidades y diferentes anchos

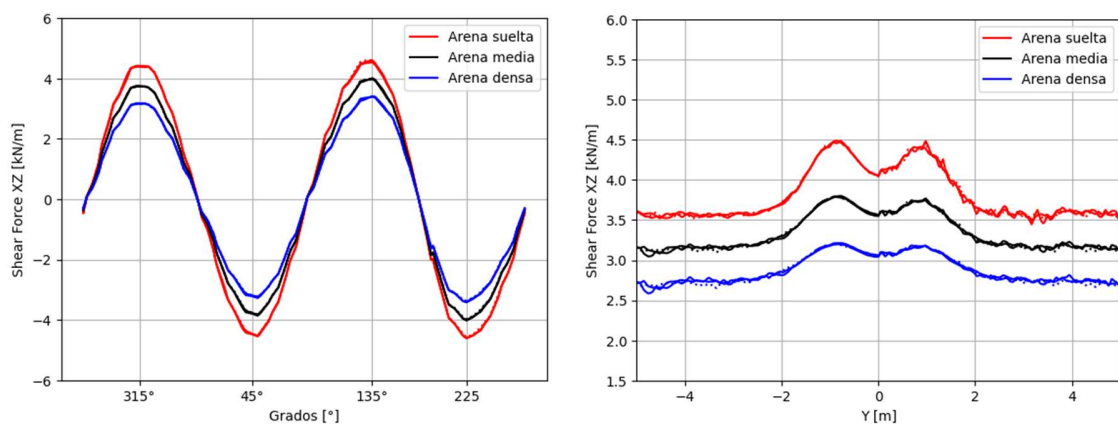
De acuerdo con la Ilustración 41 se aprecia que para el caso de una profundidad de 0.5D, siendo esta la más crítica para la tubería, no afecta el ancho de la lámina con respecto a un incremento o decrecimiento de la fuerza cortante.

Ilustración 41. Variación del esfuerzo cortante a una profundidad de 0.5D y lámina de 3.2mm y diferentes anchos de lámina



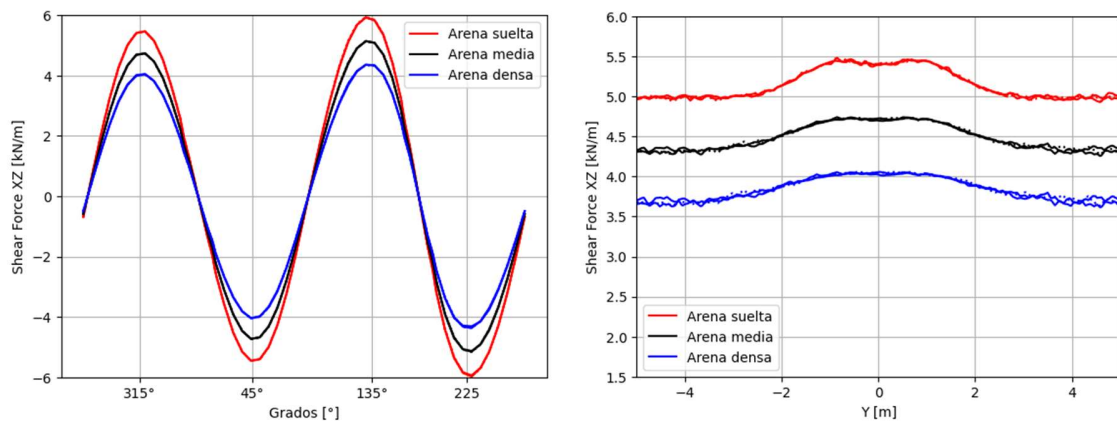
De acuerdo con la Ilustración 42 se aprecia que para el caso de una profundidad de 1D, siendo esta la más crítica para la tubería, no afecta el ancho de la lámina con respecto a un incremento o decrecimiento de la fuerza cortante.

Ilustración 42. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de 1D y lámina de 3.2mm y diferentes anchos de lámina



De acuerdo con la Ilustración 43 se aprecia que para el caso de una profundidad de 1.5D, siendo esta la más crítica para la tubería, no afecta el ancho de la lámina con respecto a un incremento o decrecimiento de la fuerza cortante.

Ilustración 43. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de 1.5D y lámina de 3.2mm y diferentes anchos de lámina

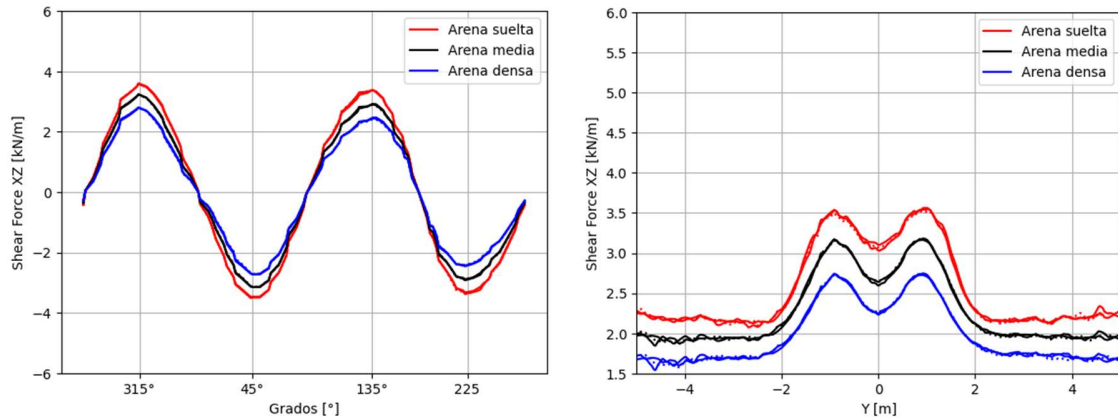


Según las ilustraciones presentadas, al emplear una lámina de acero de 32 mm de espesor y aumentar el ancho de la lámina por encima de 1D, no se observa ninguna mejora en la protección de las tuberías enterradas. Esto puede deberse a la relación del área de contacto de la llanta, que son 25 cm, con respecto al ancho de la lámina 100 cm. Las investigaciones deben centrarse en anchos de lámina menores a 1D y variar a profundidad a la que está ubicada la lámina de acero, que para este documento se estableció a 20 cm.

4.2.1.2. Análisis para una lámina con espesor de 25.4 mm a diferentes profundidades y diferentes anchos

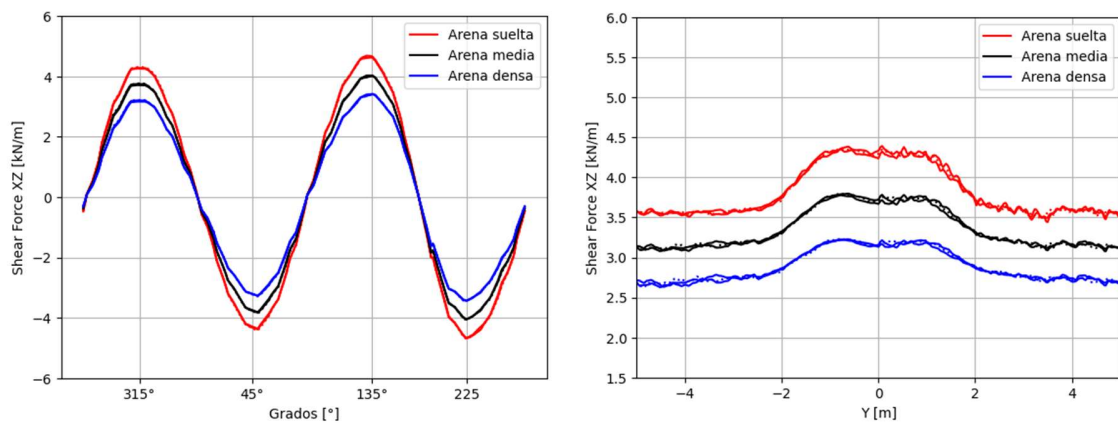
De acuerdo con la Ilustración 44 se aprecia que para el caso de una profundidad de 0.5D, siendo esta la más crítica para la tubería, no afecta el ancho de la lámina con respecto a un incremento o decrecimiento de la fuerza cortante.

Ilustración 44. Variación del esfuerzo cortante a una profundidad de 0.5D y lámina de 25.4mm y diferentes anchos de lámina



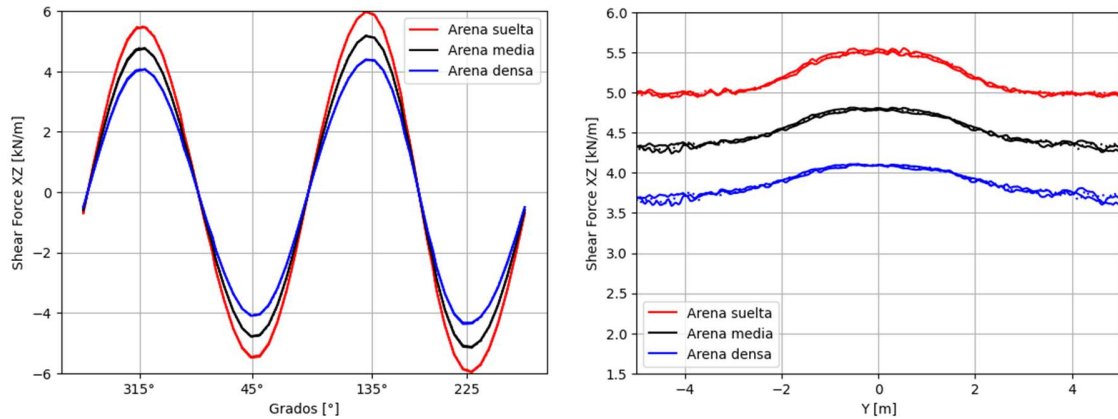
De acuerdo con la Ilustración 45 se aprecia que para el caso de una profundidad de 1D, siendo esta la más crítica para la tubería, no afecta el ancho de la lámina con respecto a un incremento o decrecimiento de la fuerza cortante.

Ilustración 45. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de 1D y lámina de 25.4mm y diferentes anchos de lámina



De acuerdo con la Ilustración 46 se aprecia que para el caso de una profundidad de 1.5D, siendo esta la más crítica para la tubería, no afecta el ancho de la lámina con respecto a un incremento o decrecimiento de la fuerza cortante.

Ilustración 46. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de 1.5D y lámina de 25.4mm y diferentes anchos de lámina

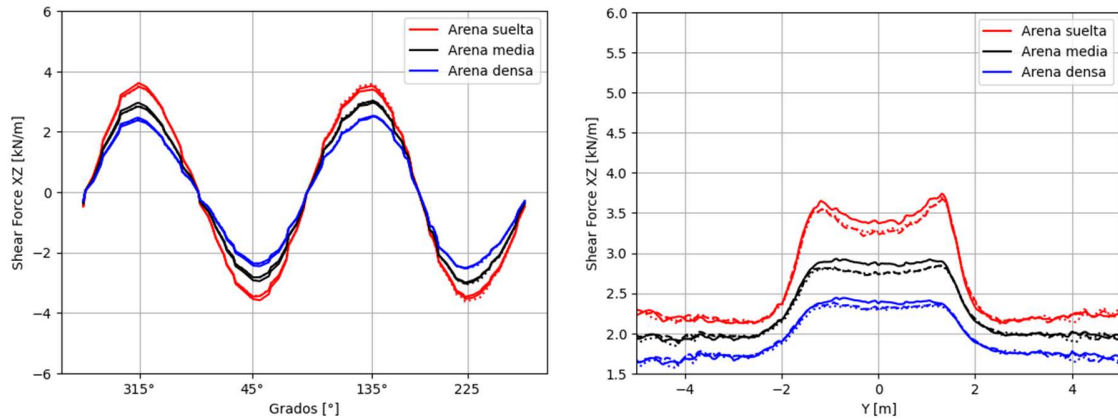


Según las ilustraciones presentadas, al emplear una lámina de acero de 25.4 mm de espesor y aumentar el ancho de la lámina por encima de 1D, no se observa ninguna mejora en la protección de las tuberías enterradas. Esto se da a la relación del área de contacto de la llanta, que son 25 cm, con respecto al ancho de la lámina 100 cm. Las investigaciones deben centrarse en anchos de lámina menores a 1D y variar a profundidad a la que está ubicada la lámina de acero, que para este documento se estableció a 20 cm.

4.2.1.3. Análisis para una lámina con espesor de 76.2mm a diferentes profundidades y diferentes anchos

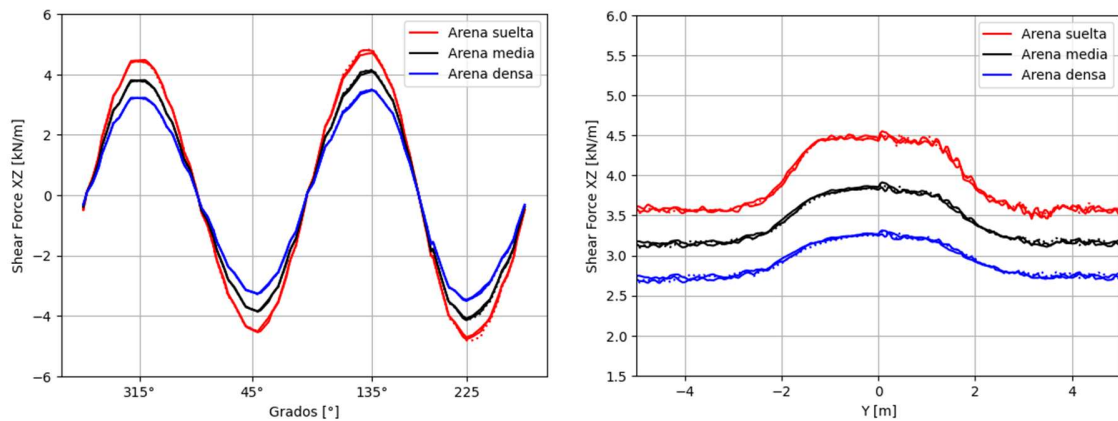
De acuerdo con la Ilustración 47 se aprecia que para el caso de una profundidad de 0.5D, siendo esta la más crítica para la tubería, no afecta el ancho de la lámina con respecto a un incremento o decrecimiento de la fuerza cortante.

Ilustración 47. Variación del esfuerzo cortante a una profundidad de 0.5D y lámina de 76.2mm y diferentes anchos de lámina



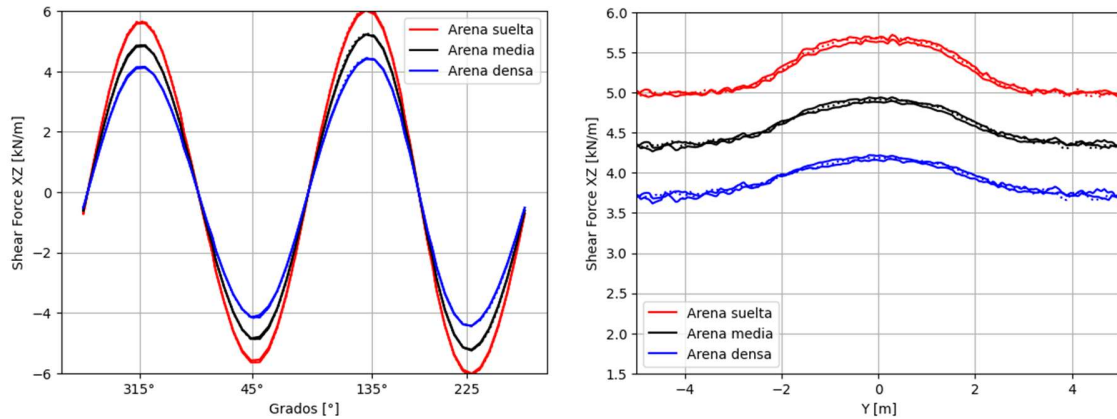
De acuerdo con la Ilustración 48 se aprecia que para el caso de una profundidad de 1D, siendo esta la más crítica para la tubería, no afecta el ancho de la lámina con respecto a un incremento o decrecimiento de la fuerza cortante.

Ilustración 48. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de 1D y lámina de 76.2mm y diferentes anchos de lámina



De acuerdo con la Ilustración 49 se aprecia que para el caso de una profundidad de 1.5D, siendo esta la más crítica para la tubería, no afecta el ancho de la lámina con respecto a un incremento o decrecimiento de la fuerza cortante.

Ilustración 49. Variación del esfuerzo cortante una profundidad de 1.5D y lámina de 76.2mm y diferentes anchos de lámina



Según las ilustraciones presentadas, al emplear una lámina de acero de 76.2 mm de espesor y aumentar el ancho de la lámina por encima de 1D, no se observa ninguna mejora en la protección de las tuberías enterradas. Esto puede darse a la relación del área de contacto de la llanta, que son 25 cm, con respecto al ancho de la lámina 100 cm. Las investigaciones deben centrarse en anchos de lámina menores a 1D y variar a profundidad a la que está ubicada la lámina de acero, que para este documento se estableció a 20 cm.

4.2.2. Efecto del espesor de la lámina de acero

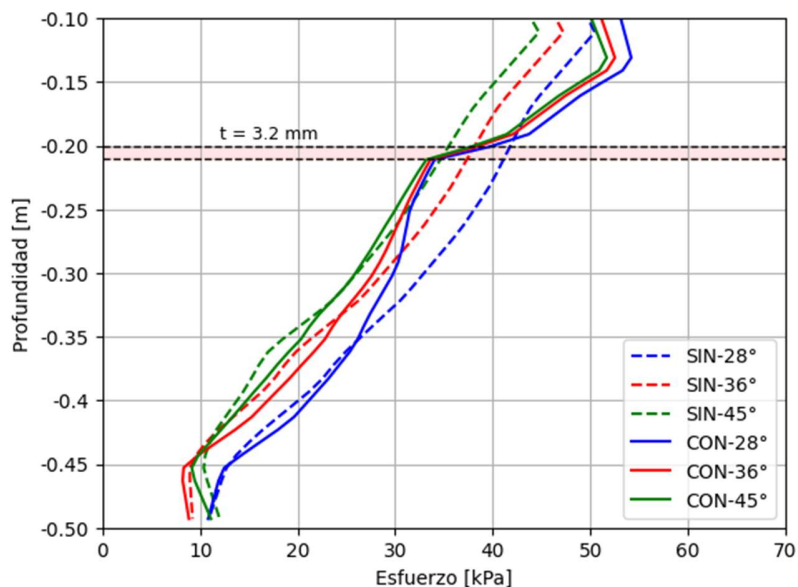
En todas las situaciones examinadas, el incremento en la amplitud de la lámina para relaciones superiores a 1D no afecta la salvaguarda de la tubería enterrada. Estos hallazgos concuerdan con la investigación llevada a cabo por Mahgoub y Naggari (2020), quienes ampliaron el ancho de las geoceldas desde 0.4D hasta 4D, concluyendo que para amplitudes mayores a $\geq 0.8D$, no se observaba ningún efecto en el sistema.

Considerando los resultados previos, centraremos nuestra atención en láminas de acero con un ancho de 1D. Se procede a comparar cada espesor de lámina junto a la profundidad, con el fin de analizar su capacidad de reducir el efecto. Para esto, se analiza con el esfuerzo Von Mises.

4.2.2.1. Lámina con espesor de 3.2 mm

En la Ilustración 50 se expone los resultados con una lámina de espesor de 3.2 mm, en punteado se expone los datos sin protección mecánica y en un trazo continuo, se expone los datos con protección mecánica. Se puede apreciar una disminución parcial del esfuerzo debajo del inferior de la lámina, sin embargo, estos valores retoman a sus valores iniciales a medida que se baja en profundidad. Con la tubería ubicada a una profundidad de 0.5 metros, la lámina de acero no exhibe un efecto en la disminución del esfuerzo causado por la carga en vivo. Esta tendencia se mantiene constante, sin importar el grado de densidad de la arena.

Ilustración 50. Efecto espesor de lámina de 3.2mm para 0.5D profundidad



Además, se observa un aumento en los esfuerzos Von Mises en la zona superior de la lámina de acero. Este efecto puede atribuirse al hecho de que el suelo ubicado entre la lámina de acero y la llanta termina generando un efecto sándwich, típico de una estructura inversa, lo que provoca dicho aumento en los esfuerzos.

El comportamiento descrito anteriormente se reproduce de manera similar para profundidades de 1 m y 1.5 m, como se puede apreciar claramente en las Ilustraciones 51 e Ilustración 52.

Ilustración 51. Efecto espesor de lámina de 3.2mm para 1D profundidad

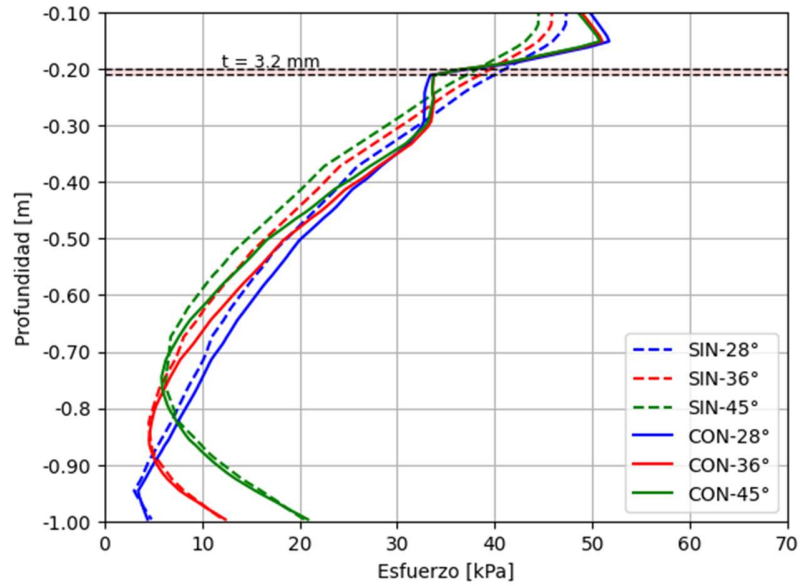
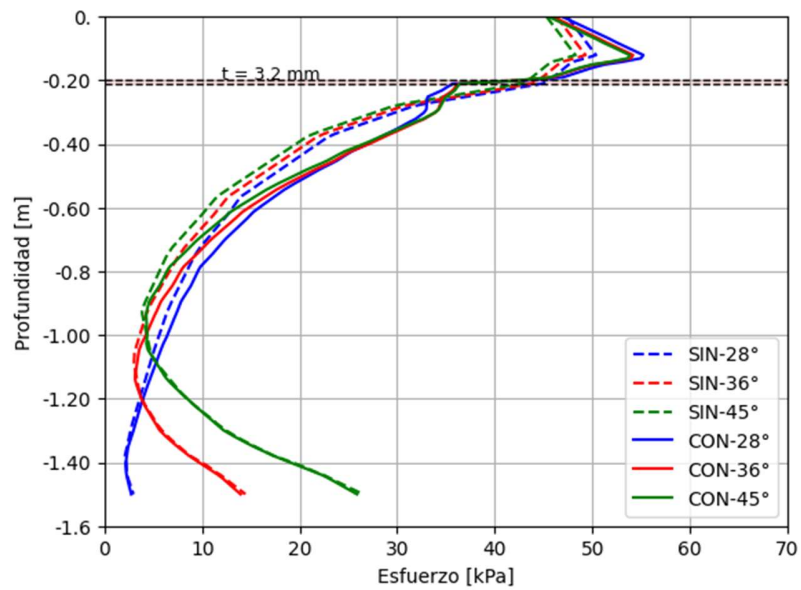


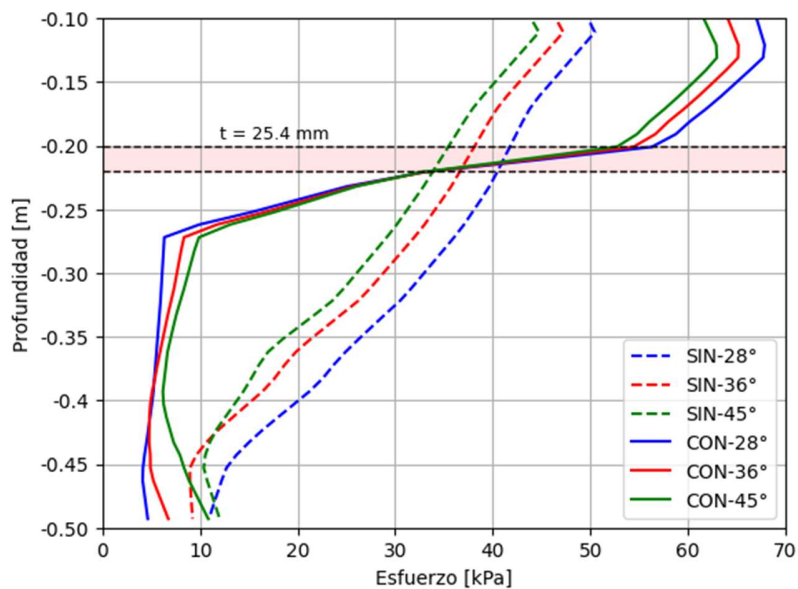
Ilustración 52. Efecto espesor de lámina de 3.2mm para 1.5D profundidad



4.2.2.2. Lámina con espesor de 25.4 mm

En la Ilustración 53 se expone los resultados con una lámina de espesor de 3.2 mm, en punteado se expone los datos sin protección mecánica y en un trazo continuo, se expone los datos con protección mecánica. Se puede apreciar una disipación prácticamente total del esfuerzo después de la lámina de acero, manteniéndose esta reducción hasta una distancia de 0.5 m. Por otro lado, los esfuerzos en la zona superior a la lámina de acero experimentan un aumento de alrededor del 40%. Es importante señalar que esta tendencia se mantiene constante, sin verse afectada por el grado de densidad de la arena.

Ilustración 53. Efecto espesor de lámina de 25.4 mm para 0.5D profundidad



El comportamiento descrito anteriormente se reproduce de manera similar para profundidades de 1 m y 1.5 m, como se puede apreciar claramente en las Ilustraciones 54 e Ilustración 55.

Ilustración 54. Efecto espesor de lámina de 25.4 mm para 1D profundidad

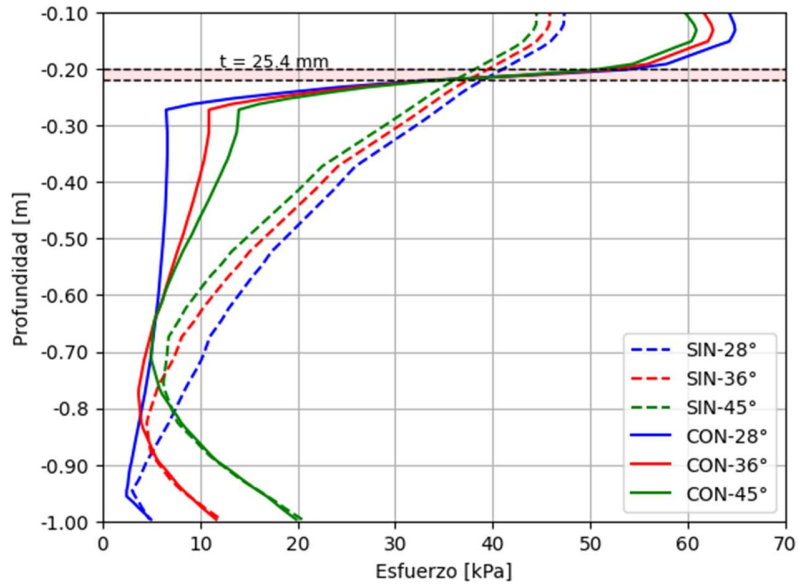
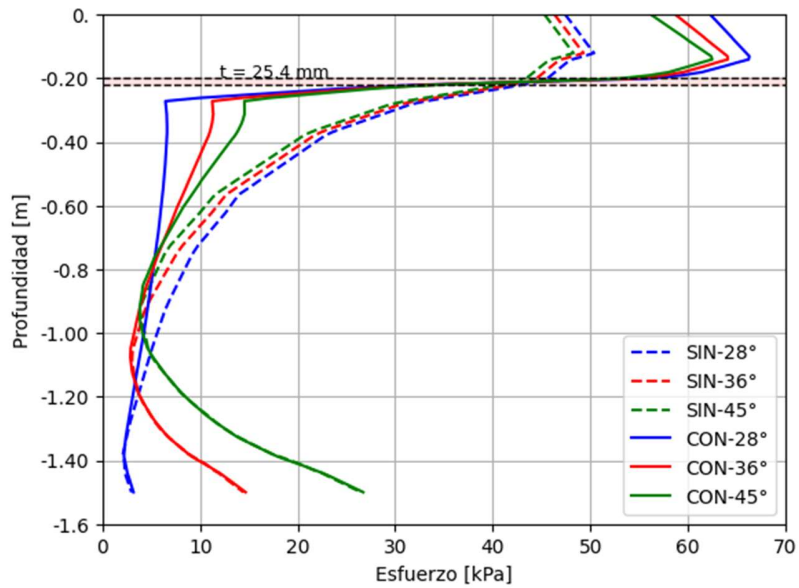


Ilustración 55. Efecto espesor de lámina de 25.4 mm para 1.5D profundidad

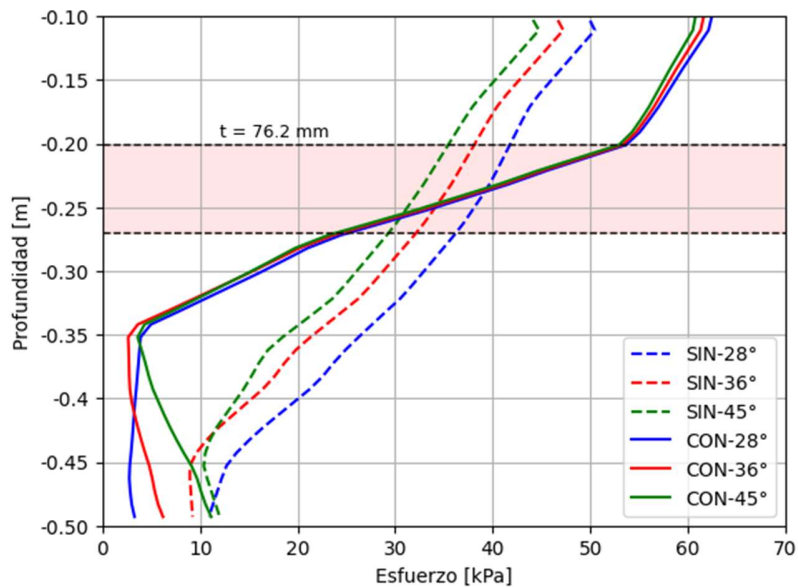


Con base al análisis descrito, se considera que una lámina de espesor de 1" o 25.4 mm y de un ancho de 1D, afecta positivamente en la reducción del esfuerzo sobre la tubería.

4.2.2.3. Lámina con espesor de 76.2 mm

En la Ilustración 56, se puede apreciar una disipación prácticamente total del esfuerzo después de la lámina de acero, manteniéndose esta reducción hasta una distancia de 0.5 m. Por otro lado, los esfuerzos en la zona superior a la lámina de acero experimentan un aumento de alrededor del 40%, lo que resalta la relevancia de tenerlo en cuenta. Es importante señalar que esta tendencia se mantiene constante, sin verse afectada por el grado de densidad de la arena

Ilustración 56. Efecto espesor de lámina de 76.2 mm para 0.5D profundidad



El comportamiento descrito anteriormente se reproduce de manera similar para profundidades de 1D y 1.5D, como se puede apreciar claramente en las Ilustraciones 57 e Ilustración 58.

Ilustración 57. Efecto espesor de lámina de 76.2 mm para 1D profundidad

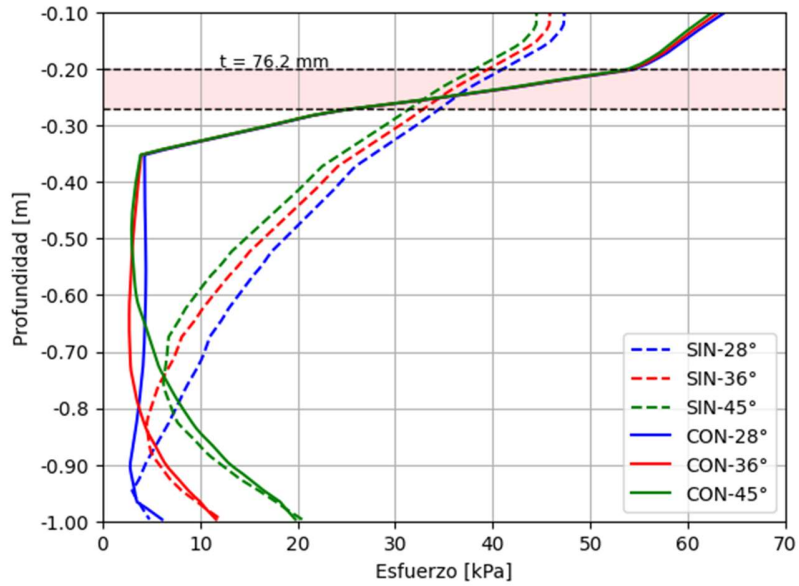
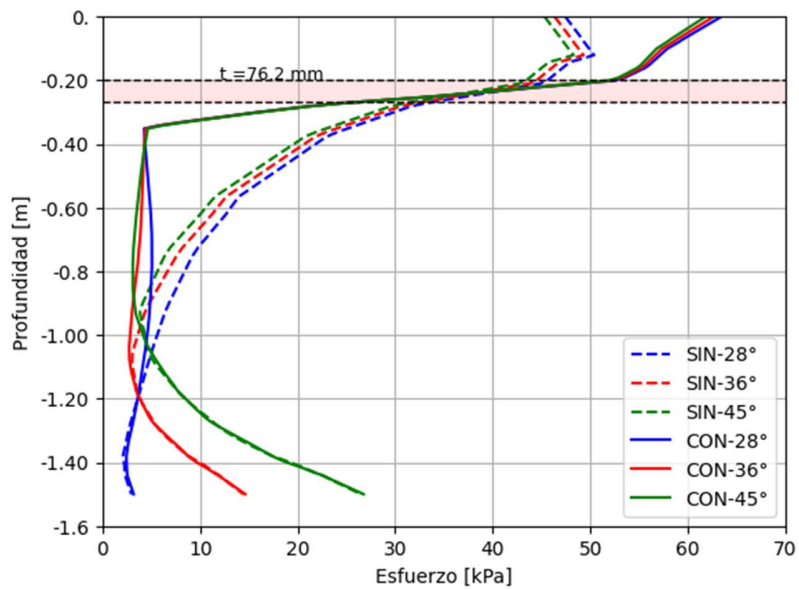


Ilustración 58. Efecto espesor de lámina de 76.2 mm para 1.5D profundidad

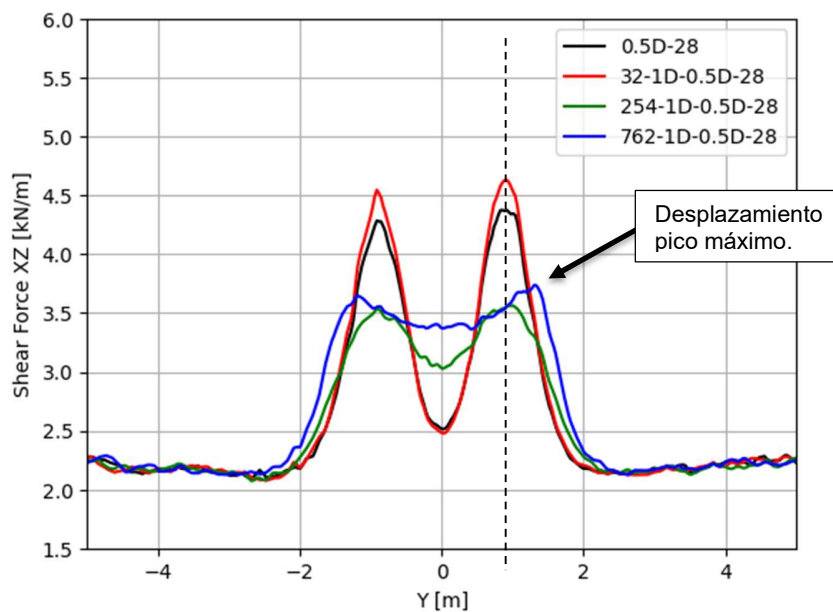


Con base al análisis descrito, se considera que una lámina de espesor de 3" o 76.2 mm y de un ancho de 1D, afecta positivamente en la reducción del esfuerzo sobre la tubería.

En la Ilustración 59, Ilustración 60 e Ilustración 61 se aprecia cómo está disipando diferentes espesores de lámina de acero a una profundidad de 0.5 m, 1 m y 1.5 m respectivamente.

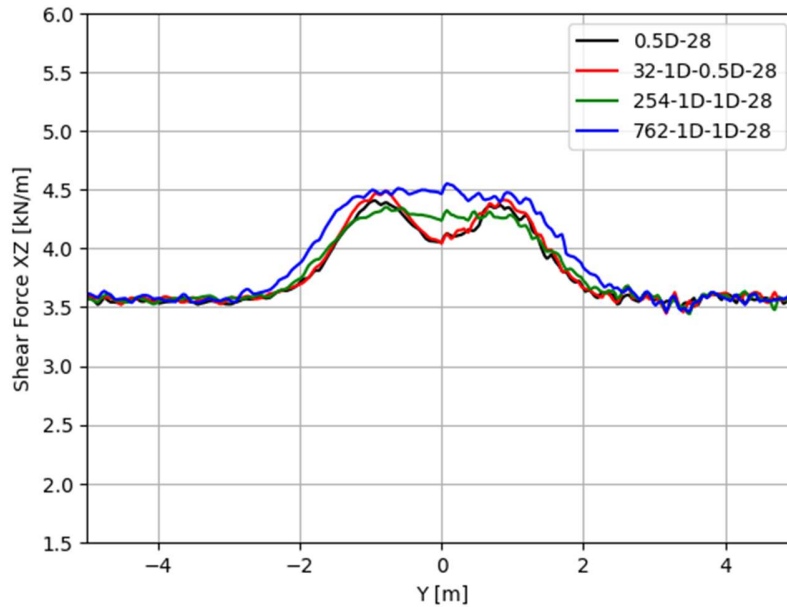
En la Ilustración 59, se observa un fenómeno de borde ocasionado por el aumento de la rigidez de la lámina. A medida que se aumenta este espesor, la protección pasa de ser una protección flexible caso 1" a una protección rígida de 3". Como resultado, los esfuerzos máximos, si bien disminuyeron, tienden a desplazarse al borde de la lámina.

Ilustración 59. Esfuerzo cortante a diferentes profundidades en el ángulo 315° para una lámina de espesor de 3.2mm



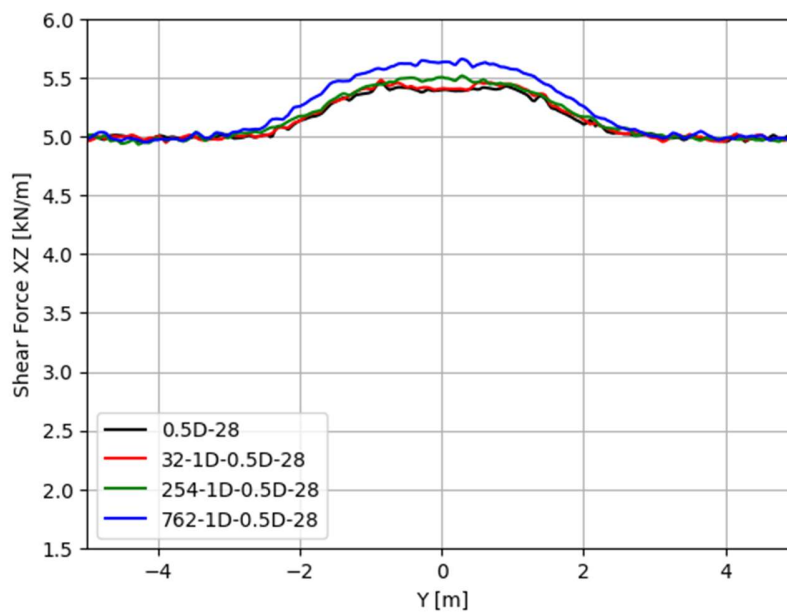
En la Ilustración 60, se puede observar que la lámina de acero de 76.2 mm y 25.4 mm está generando fuerzas axiales uniformes. Esta distribución de fuerzas es relevante y puede tener implicaciones significativas en el comportamiento de la tubería. Por otro lado, es importante destacar que la lámina de acero de 3.2 mm no muestra ningún efecto significativo en términos de reducción de fuerzas cortantes. Esta observación sugiere que su espesor no es suficiente para cumplir con los objetivos de protección requeridos.

Ilustración 60. Esfuerzo cortante a diferentes profundidades en el ángulo 315° para una lámina de espesor de 25.4 mm



En la Ilustración 61, demuestra que a una profundidad de 1.5D, la tubería aún sufre esfuerzos producto de la aplicación de la carga viva, sin embargo, no tiene la capacidad de generar picos. Una protección mecánica no tiene aporte significativo.

Ilustración 61. Esfuerzo cortante a diferentes profundidades en el ángulo 315° para una lámina de espesor de 76.2 mm



4.2.3. Resumen

Estos resultados son coherentes con el estudio realizado por Mahgoub y Naggar (2020), en donde ampliaron el ancho de la geoceldas desde 0.4D hasta 4D y obtuvieron que para ancho mayores a $\geq 0.8D$ no tenía efecto en el sistema.

La protección mecánica no tiene aporte significativo a profundidades mayores de 1.8 m, información que coincide con la norma API, en donde establece que a profundidades mayores de 1.8 m para cruce de autopistas, no requiere de protección mecánica.

Tabla 12. Resumen de los efectos con protección mecánica

#	NOMBRE MODELO	PAG	#	NOMBRE MODELO	PAG	#	NOMBRE MODELO	PAG
10	32-1D-0.5D-28	102	13	32-1D-1D-28	105	16	32-1D-1.5D-28	108
11	32-1D-0.5D-36	103	14	32-1D-1D-36	106	17	32-1D-1.5D-36	109
12	32-1D-0.5D-45	104	15	32-1D-1D-45	107	18	32-1D-1.5D-45	110
19	32-1.5D-0.5D-28	111	22	32-1.5D-1D-28	114	25	32-1.5D-1.5D-28	117
20	32-1.5D-0.5D-36	112	23	32-1.5D-1D-36	115	26	32-1.5D-1.5D-36	118
21	32-1.5D-0.5D-45	113	24	32-1.5D-1D-45	116	27	32-1.5D-1.5D-45	119
28	32-2D-0.5D-28	120	31	32-2D-1D-28	123	34	32-2D-1.5D-28	126
29	32-2D-0.5D-36	121	32	32-2D-1D-36	124	35	32-2D-1.5D-36	127
30	32-2D-0.5D-45	122	33	32-2D-1D-45	125	36	32-2D-1.5D-45	128
37	254-1D-0.5D-28	129	40	254-1D-1D-28	132	43	254-1D-1.5D-28	135
38	254-1D-0.5D-36	130	41	254-1D-1D-36	133	44	254-1D-1.5D-36	136
39	254-1D-0.5D-45	131	42	254-1D-1D-45	134	45	254-1D-1.5D-45	137

#	NOMBRE MODELO	PAG	#	NOMBRE MODELO	PAG	#	NOMBRE MODELO	PAG
46	254-1.5D-0.5D-28	138	49	254-1.5D-1D-28	141	52	254-1.5D-1.5D-28	144
47	254-1.5D-0.5D-36	139	50	254-1.5D-1D-36	142	53	254-1.5D-1.5D-36	145
48	254-1.5D-0.5D-45	140	51	254-1.5D-1D-45	143	54	254-1.5D-1.5D-45	146
55	254-2D-0.5D-28	147	58	254-2D-1D-28	150	61	254-2D-1.5D-28	153
56	254-2D-0.5D-36	148	59	254-2D-1D-36	151	62	254-2D-1.5D-36	154
57	254-2D-0.5D-45	149	60	254-2D-1D-45	152	63	254-2D-1.5D-45	155
64	762-1D-0.5D-28	156	67	762-1D-1D-28	159	70	762-1D-1.5D-28	162
65	762-1D-0.5D-36	157	68	762-1D-1D-36	160	71	762-1D-1.5D-36	163
66	762-1D-0.5D-45	158	69	762-1D-1D-45	161	72	762-1D-1.5D-45	164
73	762-1.5D-0.5D-28	165	76	762-1.5D-1D-28	168	79	762-1.5D-1.5D-28	171
74	762-1.5D-0.5D-36	166	77	762-1.5D-1D-36	169	80	762-1.5D-1.5D-36	172
75	762-1.5D-0.5D-45	167	78	762-1.5D-1D-45	170	81	762-1.5D-1.5D-45	173
82	762-2D-0.5D-28	174	85	762-2D-1D-28	177	88	762-2D-1.5D-28	180
83	762-2D-0.5D-36	175	86	762-2D-1D-36	178	89	762-2D-1.5D-36	181
84	762-2D-0.5D-45	176	87	762-2D-1D-45	179	90	762-2D-1.5D-45	182

4.3. Disipación de esfuerzos en profundidad

Para conocer la disipación del esfuerzo de la carga viva vehicular, se relaciona la profundidad contra el esfuerzo en porcentaje de la carga aplicada con los datos obtenidos directamente del software. En la gráfica se ilustra el esfuerzo sin protección mecánica (color azul), el comportamiento del esfuerzo con una protección de una lámina de 1/8" (color verde), el comportamiento del esfuerzo con una protección de una lámina de 1" (color negro). Por último, el comportamiento del esfuerzo con una protección de una lámina de 3" (color rojo).

Dependiendo de la profundidad de análisis se cambia el tipo de estilo de la línea para poder identificar la data de 0.5D, 1D y 1.5D.

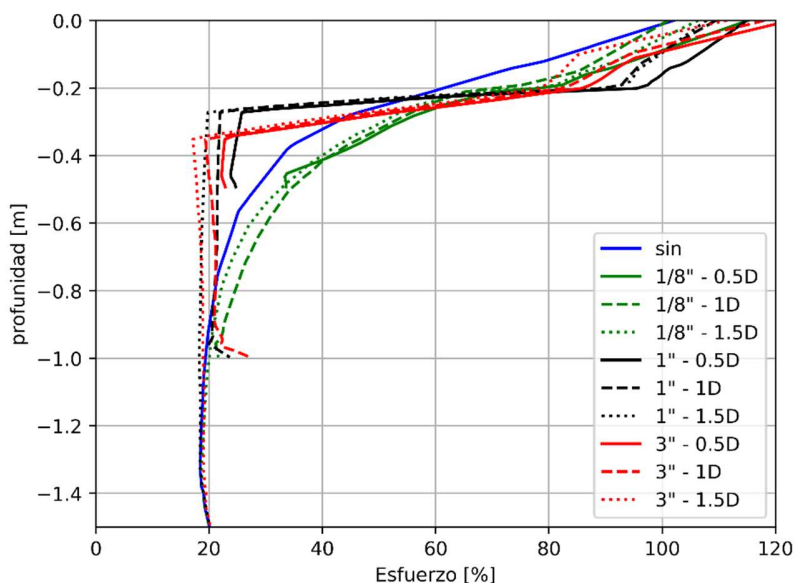
4.3.1. Arena suelta

En la ilustración 62 se aprecia la disipación de esfuerzos para el caso una arena suelta y una profundidad (H) de 0.5D. La visualiza como la carga viva se concentra entre 0 a 0.2 m, en donde a mayor rigidez de la placa instalada existe una mayor concentración de esfuerzos. Así mismo, la instalación de una protección de una lámina de acero de 1/8" no genera una disipación de esfuerzos. Las placas de 1" y 3" logran disipar la carga en profundidad, una protección de 3" posee menor capacidad de disipación, esto puede ocurrir por la misma rigidez del elemento, que no se considera una protección flexible.

A una profundidad aproximada de 1 m la carga viva se ha disipado hasta alcanzar un 20%, sin embargo, se mantiene en este valor constante hasta la alcanzar una profundidad de 1.5 m. Se puede apreciar que a una profundidad mayor a 0.6 m, no hay diferencia entre utilizar una lámina con espesor de 1" o 3".

Como se espera, a medida que se aumenta la profundidad hay una similitud en los datos de 0.5D, 1D y 1.5D, evidenciando que el análisis numérico es concordante.

Ilustración 62. Disipación de esfuerzos para arena suelta con protección y sin protección mecánica

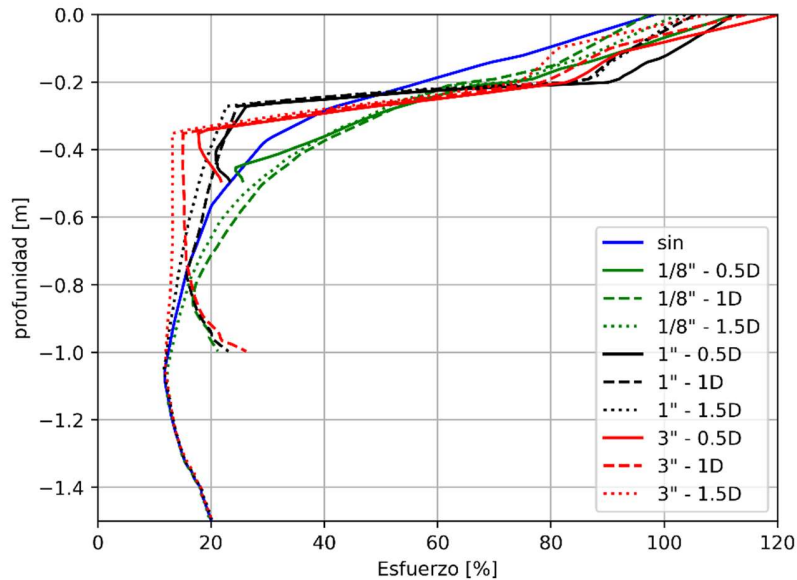


4.3.2. Arena media

Se evidencia una similitud con la situación mencionada anteriormente. En la ilustración 63 se aprecia la disipación de esfuerzos para el caso una arena suelta y una profundidad (H) de 0.5D. La visualiza como la carga viva se concentra entre 0 a 0.2 m, en donde a mayor rigidez de la placa instalada existe una mayor concentración de esfuerzos. Así mismo, la instalación de una protección de una lámina de acero de 1/8" no genera una disipación de esfuerzos. Las placas de 1" y 3" logran disipar la carga en profundidad, una protección de 3" posee menor capacidad de disipación, esto puede ocurrir por la misma rigidez del elemento, que no se considera una protección flexible.

A una profundidad aproximada de 0.6 m la carga viva se ha disipado hasta alcanzar un 20%, sin embargo, se mantiene en este valor constante hasta la alcanzar una profundidad de 1.5 m. Se puede apreciar que a una profundidad mayor a 0.6 m, no hay diferencia entre utilizar una lámina con espesor de 1" o 3". A una profundidad mayor de 1 m la carga viva empieza a aumentar hasta el 20%, esto se debe al elemento rígido, que es la tubería instalada. Como se espera, a medida que se aumenta la profundidad hay una similitud en los datos de 0.5D, 1D y 1.5D, evidenciando que el análisis numérico es concordante.

Ilustración 63. Disipación de esfuerzos para arena media con protección y sin protección mecánica



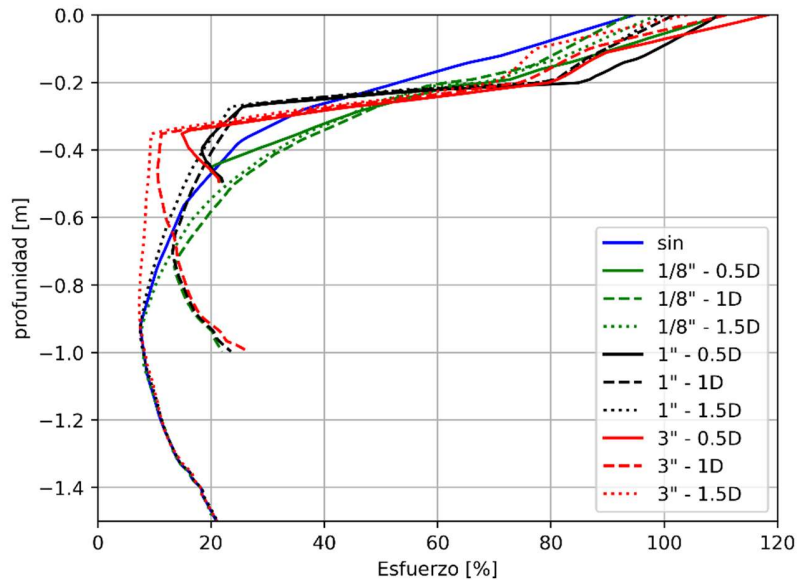
4.3.3. Arena densa

Se evidencia una similitud con la situación mencionada anteriormente. En la ilustración 64 se aprecia la disipación de esfuerzos para el caso una arena suelta y una profundidad (H) de $0.5D$. La visualiza como la carga viva se concentra entre 0 a 0.2 m, en donde a mayor rigidez de la placa instalada existe una mayor concentración de esfuerzos. Así mismo, la instalación de una protección de una lámina de acero de $1/8''$ no genera una disipación de esfuerzos. Las placas de $1''$ y $3''$ logran disipar la carga en profundidad, una protección de $3''$ posee menor capacidad de disipación, esto puede ocurrir por la misma rigidez del elemento, que no se considera una protección flexible.

A una profundidad aproximada de 0.48 m, se aprecia que la carga viva se ha disipado hasta alcanzar un 20%, sin embargo, se mantiene en este valor constante hasta la alcanzar una profundidad de 1.5 m. Se puede apreciar que a una profundidad mayor a 0.6 m, no hay diferencia entre utilizar una lámina con espesor de $1''$ o $3''$. A una profundidad mayor de 1 m la carga viva empieza a aumentar hasta el 20%, esto se debe al elemento rígido, que es la tubería instalada. Como se espera, a medida que se aumenta la profundidad hay una

similitud en los datos de 0.5D, 1D y 1.5D, evidenciando que el análisis numérico es concordante.

Ilustración 64. Disipación de esfuerzos para arena densa con protección y sin protección mecánica



4.3.4. Comparativa

La evaluación comparativa de la disipación de esfuerzos en tres escenarios de suelos diferentes revela patrones similares. En los casos de arena suelta, media y densa, la carga viva se concentra principalmente entre 0 y 0.2 m, con una mayor rigidez de la placa resultando en una intensificación de los esfuerzos. La aplicación de una lámina delgada de acero de 1/8" no muestra una disipación efectiva, mientras que las láminas de 1" y 3" logran disipar la carga en profundidad, siendo la de 3" menos eficiente, posiblemente debido a su mayor rigidez. A profundidades superiores a 0.6 m, no se observan diferencias notables entre el uso de láminas con espesor de 1" o 3". A aproximadamente 1 m de profundidad, la carga viva se disipa hasta alcanzar un 20%, manteniéndose constante hasta 1.5 m. Más allá de esta profundidad, en todos los casos, se evidencia una similitud entre los datos de 0.5D, 1D y 1.5D, demostrando consistencia en los resultados del análisis numérico.

CAPITULO V

RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIÓN

5.1. Modelos constitutivos del suelo

Según lo evidenciado en la tabla 4, varios autores respaldan tanto el modelo constitutivo de Mohr Coulomb como el modelo Hardening Soil, lo que lleva a la conclusión de que no existe una clara ventaja en cuanto a cuál modelo proporciona una interacción suelo-estructura más adecuada. La elección del modelo debe basarse en el grado de deformación esperado en el análisis.

5.2. Uso de láminas de acero de diferentes espesores como medidas de protección

5.2.1. Resultados sin lámina de protección:

5.2.1.1. Efecto de la Profundidad de la Tubería:

- A profundidades menores (0.5D), se observa un mayor esfuerzo cortante en ciertos ángulos.
- A profundidades intermedias (1D), los esfuerzos tienden a ser más uniformes.
- A profundidades mayores (1.5D), los esfuerzos son mayores en ángulos específicos.
- La ovalación y pandeo de la tubería disminuyen con la profundidad.

5.2.1.2. Efecto de la Densificación del Suelo:

- Aumentar la densidad del suelo reduce los picos de esfuerzo cortante bajo carga.
- Una mayor compactación del suelo resulta en una distribución más uniforme de las fuerzas cortantes en la tubería.

5.2.1.3. Resumen General

- En la situación crítica (0.5 m de profundidad y arena suelta), la deformación no supera el 0.5%.
- Los resultados son consistentes con investigaciones previas, indicando que la tubería muestra buena resistencia y estabilidad en condiciones críticas.

5.2.2. Resultados con lámina de protección:

5.2.2.1. Efecto del Ancho de la Lámina:

- A una profundidad de 0.5D, el ancho de la lámina no afecta significativamente el esfuerzo cortante.
- Esta tendencia se mantiene para profundidades de 1D y 1.5D.
- Anchuras de lámina mayores a 1D no mejoran la protección de la tubería debido a la relación con el área de contacto de la llanta.

5.2.2.2. Efecto del Espesor de la Lámina

- Para una lámina de espesor de 3.2 mm, no se observa una reducción significativa del esfuerzo, incluso en la profundidad crítica de 0.5D.
- Con una lámina de 25.4 mm, se logra una disipación efectiva del esfuerzo bajo la lámina, manteniéndose hasta una distancia de 0.5 m.
- Una lámina de 76.2 mm también ofrece protección efectiva, pero con un aumento de esfuerzos en la parte superior.

5.2.2.3. Resumen general

- Láminas de espesor de 1" (25.4 mm) y con un ancho de 1D proporcionan una reducción efectiva de los esfuerzos en la tubería.
- En general, una lámina de 76.2 mm (3") de espesor y 1D de ancho reduce los esfuerzos, pero genera un aumento en la parte superior de la lámina.
- A profundidades mayores de 1.8 m, la protección mecánica no tiene un impacto significativo según la norma API.
- A profundidades de 1.5 m, el uso de láminas de acero de 1" o 3" no afecta significativamente el sistema.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En el análisis paramétrico de tuberías se evidencia que la carga viva disminuye notoriamente a medida que aumenta la profundidad de enterramiento. Este fenómeno se vuelve particularmente relevante a profundidades aproximadas a 1.5 veces el diámetro de la tubería (1.5D), donde la carga muerta adquiere una mayor preponderancia en comparación con la carga viva. Este hallazgo subraya la importancia de considerar adecuadamente la carga muerta en el diseño y análisis de tuberías enterradas, ya que el incremento en la profundidad mejora el rendimiento del sistema al reducir deformaciones tanto en la tubería como en la base de apoyo, así como la presión ejercida sobre la tubería.

Los avances en los materiales utilizados en la fabricación de tuberías abren la posibilidad de desarrollar tuberías con una notable capacidad de deformación, potencialmente capaces de experimentar deformaciones del orden del 60 % sin que esto suponga una afectación en la calidad del sistema. En consecuencia, se hace evidente la necesidad de que las normativas específicas evolucionen de manera constante para acomodar estos materiales.

Los modelos de centrífuga consultados presentan limitaciones para analizar fenómenos como la ovalación y el efecto del borde en protecciones rígidas, lo que plantea la necesidad de desarrollar métodos más precisos para evaluar estos aspectos.

En cuanto al uso de láminas de acero, se observa una mayor protección al usar láminas de 3" con respecto a 1/8" y 1" para profundidades de hasta 1D, sin embargo, estas láminas son poco comunes en el mercado. Se recomienda centrar futuras investigaciones en láminas de espesores entre 1/8" y 1" combinadas con anchos menores a 1D, ya que estos parámetros parecen ser efectivos para reducir esfuerzos en la tubería.

En términos de protección mecánica, se concluye que esta no aporta significativamente a profundidades mayores de 1.5 metros. La densificación del suelo que rodea la tubería puede ser un factor crucial, ya que un suelo más compacto tiende a generar esfuerzos más uniformes y a prevenir deformaciones excesivas.

La elección del material de la tubería (PVC, HDPE, AC, concreto) debe sopesarse cuidadosamente de acuerdo con las normativas y el tipo de aplicación, ya que cada material puede exhibir un comportamiento distinto bajo carga. En resumen, este estudio destaca la importancia de analizar el comportamiento de las tuberías enterradas considerando parámetros como la profundidad, el material de la tubería y la protección mecánica, lo que puede conducir a decisiones de diseño más eficientes y seguras en proyectos de infraestructura.

El análisis numérico realizado en este estudio ha proporcionado una comprensión detallada de los efectos de la disipación de la carga viva en profundidad debida al tráfico vehicular sobre tuberías enterradas. Los resultados de la modelación tridimensional han permitido evaluar de manera precisa los esfuerzos inducidos en la tubería, tanto en condiciones sin protección como con la inclusión de láminas de acero como medida de protección superficial.

La comparación de los resultados obtenidos para diferentes espesores de lámina de protección ha revelado diferencias significativas en cuanto a los esfuerzos y las deformaciones de la tubería. Estos hallazgos sugieren que la elección del espesor adecuado de la lámina de acero puede desempeñar un papel fundamental en la protección efectiva de las tuberías enterradas contra cargas externas superficiales.

Con base en las estimaciones realizadas en este estudio, se ha demostrado que las láminas de acero, especialmente aquellas con espesores de 1" y 3", tienen el potencial de mejorar significativamente el rendimiento y la resistencia de las tuberías enterradas bajo cargas vehiculares superficiales. Estos resultados proporcionan información valiosa para la toma de decisiones en el diseño y la protección de infraestructuras de tuberías enterradas.

Con base en los resultados obtenidos en la evaluación de la disipación de esfuerzos en tres escenarios de suelos distintos, primero, se observa que la concentración de esfuerzos en la carga viva vehicular es más pronunciada entre 0 y 0.2 m de profundidad, acentuándose con la mayor rigidez de las placas instaladas. La aplicación de una lámina delgada de acero de 1/8" no demuestra ser efectiva en la disipación de esfuerzos, mientras que las láminas de 1" y 3" logran dispersar la carga en profundidad inmediatamente debajo de la placa. Segundo, a profundidades superiores a 0.6 m, no se aprecian diferencias notables entre el uso de láminas con espesor de 1" o 3". Esta constancia en los resultados, evidenciada por la similitud entre los datos de 0.5D, 1D y 1.5D en todos los casos, confirma la coherencia y fiabilidad del análisis numérico llevado a cabo.

Dentro del alcance de este documento, no se contempló el posible efecto arco que se pueda generar en el sistema.

6.2. Recomendaciones para futuras investigaciones

Tabla 13. Recomendaciones futuras para investigar

TIPO DE CARGA	DESCRIPCIÓN
Uso de centrífuga	Se debe de emplear la centrífuga geotécnica con el fin de calibrar los resultados del análisis numérico obtenidos con el software RS3 (Saboya et al., 2020).
Diversidad de modelos	Se debe de realizar un análisis con una mayor variedad de tipo de suelos.
Comparativa protección mecánica	Los estudios están enfocados en el grado de disipación de un tipo de protección. Es importante comprender cuál es mejor con respecto a otras.
Nuevos materiales de ductos	Dado los avances tecnológicos, existen tuberías con capacidad de deformación hasta del 50%.
Efecto borde en las protecciones rígidas y flexibles	Se sugiere realizar estudios de efecto de borde para protecciones rígidas.
Ancho de lámina	Se debe enfocar la investigación en anchos menores a 1D.
Efecto arco	Se debe de analizar el efecto arco que se pueda generar en el sistema.

REFERENCIAS

- Almohammed, W. H., Fattah, M. Y., & Rasheed, S. E. (2018). Numerical Analysis of the Effect of Geocell Reinforcement above Buried Pipes on Surface Settlement and Vertical Pressure. *12*(3), 256–262
- Al-Naddaf, M., Rasheed, S. E., Sharefi, M. Q., Mustapha Rahmaninezhad, S., & Jie Han, P. E. (2021). Responses of buried steel pipes under footing loadings – a numerical parametric study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1067*(1), 012078. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1067/1/012078>
- American Water Works Association. (2004). *Manual of Water Supply Practices-M11* (4th ed.). United States of America. ISBN 1-58321-274-4.
- Bartlett, S. F., Lingwall, B. N., & Vaslestad, J. (2015). Methods of protecting buried pipelines and culverts in transportation infrastructure using EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, *43*(5), 450-461. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.04.019>
- Bayton, Elmorom, & Black. (2018). Centrifuge modeling utility pipe behaviour subject to vehicular loading.
- Bildik, S. (2012). Parametric studies of buried pipes using finite element analysis. 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 28-30. June 2012, Near East University, Nicosia, North Cyprus
- British Standard. (2010). *Guide to the Structural Design of Buried Pipelines*. ISBN 9780 580601002
- Bryden, P., El Naggat, H., & Valsangkar, A. (2014). Soil-Structure Interaction of Very Flexible Pipes: Centrifuge and Numerical Investigations. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE))
- Elshesheny, A., Mohamed, M., Nagy, N. M., & Sheehan, T. (2020). Numerical behaviour of buried flexible pipes in geogrid-reinforced soil under cyclic loading. *Computers and Geotechnics*, *122*. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103493>
- Emami Saleh, A., Hojat Jalali, H., Pokharel, A., & Abolmaali, A. (2021). Deformation of buried large diameter steel pipes during staged construction and compaction-case study and finite element analysis. *Transportation Geotechnics*, *31*. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100649>
- Fattah, M. Y., Zbar, B. S., & Al-Kalali, H. H. M. (2016). Three-dimensional finite element simulation of the buried pipe problem in geogrid reinforced soil. *Journal of Engineering*, *22*(5), 60–73. <https://joe.uobaghdad.edu.iq/index.php/main/article/view/218>

- Gómez Jiménez, C. A. (2023). Análisis numérico de la protección de tuberías flexibles enterradas mediante láminas de acero ante cargas sobre la superficie del terreno. Jornadas XX Geotécnicas de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá. Colombia.
- Gómez Jiménez, C. A. (2023). Carga dinámica generada por el Regiotram sobre una tubería flexible para hidrocarburo - caso real. VII Congreso internacional de Ingeniería Civil, "Un aporte a la recuperación del país desde la academia, la investigación, la empresa y la institucionalidad", Bogotá. Colombia.
- Gómez Jiménez, C. A. (2022). Conceptos generales en el diseño de transporte de hidrocarburos empleando tubería como medio principal – enfoque civil. VIII Congreso internacional de Ingeniería Civil, "Los retos de la academia frente a las nuevas tendencias postpandemia en tecnología, innovación y sostenibilidad", Bogotá. Colombia.
- Gómez Jiménez, C. A. (2022). Revisión Sobre el Análisis y Protección de Tuberías Enterradas Ante Cargas Sobre la Superficie del Terreno. Revista Innovación Digital Y Desarrollo Sostenible - IDS, 3(1), 59 - 71. <https://doi.org/10.47185/27113760.v3n1.87>
- Goltabar, A. M., & Shekarchi, M. (2010). Investigation of Traffic Load on the Buried Pipeline by Using of Real Scale Experiment and Plaxis-3D Software. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2(2), 107-113.
- Hegde, A. M., & Sitharam, T. G. (2015). Experimental and numerical studies on protection of buried pipelines and underground utilities using geocells. Geotextiles and Geomembranes, 43(5), 372-381. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.010>
- Hodjat Shiri. (2017). A Comparative Study on a Buried Pipeline in different soil conditions under static load using ABAQUS. <https://www.researchgate.net/publication/325767159>
- Jorge Rodríguez Ordóñez, Daniel Ruiz Valencia, Alvaro Coral Otero, & Mauricio Pereira Ordóñez. (2007). Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías enterradas.
- Kadbinakatti Sharan, Hedge Amarnath, & Thallak Sitharam. (2014). Protection of buried pipelines using a combination of geocell and geogrid reinforcement: experimental studies. Geotechnical Special Publication-238, ASCE, Ground Improvement and Geosynthetics. <https://www.researchgate.net/publication/263274189>
- Karmaker, R. (2019). A Comparative Study on a Buried Pipeline in different soil conditions under static load using ABAQUS Engineering 9790: Subsea Pipeline Engineering Term Project On A Comparative Study on a Buried Pipeline in different soil conditions under static load usi. April 2017.

- Khademi-Zahedi, R. (2019). Application of the finite element method for evaluating the stress distribution in buried damaged polyethylene gas pipes. *Underground Space (China)*, 4(1), 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.05.002>
- Khalaj, O., Azizian, M., Darabi, N. J., Tafreshi, S. N. M., & Jirková, H. (2020). The role of expanded polystyrene and geocell in enhancing the behavior of buried HDPE pipes under trench loading using numerical analyses. *Geosciences (Switzerland)*, 10(7), 1-15. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070251>
- Khalaj, O., Joz, N., Moghaddas, S. N., & Mašek, B. (2017). Protection of Buried Pipe under Repeated Loading by Geocell Reinforcement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 95(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/2/022030>
- Kluszczewicz, B. (2013). Numerical 3D Analysis of Buried Flexible Pipeline. *European Scientific Journal*, 9(36), 1857-7881.
- Lozada, C., Garzón, L. X., & Campagnoli, S. X. (2015). Geotechnical centrifuge applications in the teaching of applied soil mechanics. *En Revista Educación en Ingeniería (Vol. 10, Número 20)*. <http://www.educacioneningeneria.org>
- Mahgoub, A., & El Naggar, H. (2019). Using TDA as an Engineered Stress-Reduction Fill over Preexisting Buried Pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000362](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000362)
- Mahgoub, A., & El Naggar, H. (2020). Coupled TDA–Geocell Stress-Bridging System for Buried Corrugated Metal Pipes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002279](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002279)
- Mehrijardi, G. T., Moghaddas Tafreshi, S. N., & Dawson, A. R. (2015). Numerical analysis on Buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mixture. *International Journal of Civil Engineering*, 13(2). <https://doi.org/10.22068/IJCE.13.2.90>
- Mill-Pro HK. (2019). Concrete encasement of flexible plastics pipes Scope.
- Neves, J. B., Saboya, F., & Esquivel, E. R. (2021). Geotechnical centrifuge and numerical modelling of buried pipelines. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 21(1), 18-25. <https://doi.org/10.1680/jphmg.18.00092>
- Park, J., Chung, Y., & Hong, G. (2020). Reinforcement effect of a concrete mat to prevent ground collapses due to buried pipe damage. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(16). <https://doi.org/10.3390/APP10165439>
- Pires, A. C. G., & Palmeira, E. M. (2021). The influence of geosynthetic reinforcement on the mechanical behaviour of soil-pipe systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5), 1117-1128. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2021.03.006>

- Quesada, G. (2019). Modelado viscoelástico del PVC para análisis de formado en caliente de tuberías (campaneo). *Revista Tecnología En Marcha*, 14(5), Pág. 10–16. <https://doi.org/10.18845/tm.v14i5.2952>
- Qin, X., Ni, P., & Du, Y. J. (2019). Buried rigid pipe-soil interaction in dense and medium sand backfills under downward relative movement: 2D finite element analysis. *Transportation Geotechnics*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100286>
- Rakitin, B., & Xu, M. (2015). Centrifuge testing to simulate buried reinforced concrete pipe joints subjected to traffic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(11), 1762-1774. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0483>
- Rakitin, B., & Ming, X. (2016). Centrifuge Modeling of Large Diameter Underground Pipes Subjected To Heavy Traffic Loads. *Bulletin of South Ural State University Series "Construction Engineering and Architecture,"* 16(3), 31–46. <https://doi.org/10.14529/build160305>
- Saboya, F., Tibana, S., Reis, R. M., Durand Farfan, A., & Rangel Melo, C. M. de A. (2020). Centrifuge and numerical modeling of moving traffic surface loads on pipelines buried in cohesionless soil. *Transportation Geotechnics*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100340>
- Sharp, K. D., Anderson, L. R., Moser, A. P., & Bishop, R. R. (1985). Finite-Element Analysis Applied to the Response of Buried FRP Pipe Under Various Installation Conditions. *En Transportation Research Record*.
- Si Xi, Z., Ying, W., & Peng Wei, J. (2019). Reliability analysis of buried polyethylene pipeline subject to traffic loads. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(10). <https://doi.org/10.1177/1687814019883785>
- Waqed Almohammed, Mohammed Fattah, & Sajjad Rasheed. (2018). Numerical Analysis of the effect of geocell reinforcement above buried pipes on surface settlement and vertical pressure. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 12(3).
- Zhang, J., Stewart, D. P., and Randolph, M. F. (2002). "Kinematic hardening model for pipeline-soil interaction under various loading conditions." *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)15762-3641(2002)2:4(419), 419–446

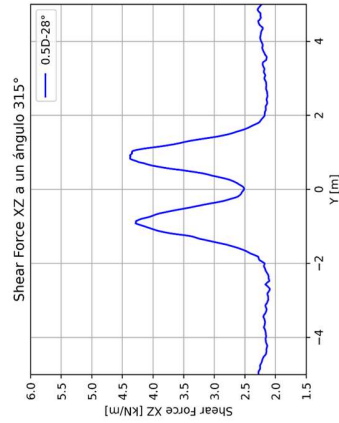
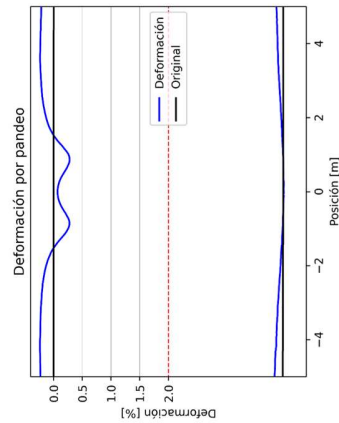
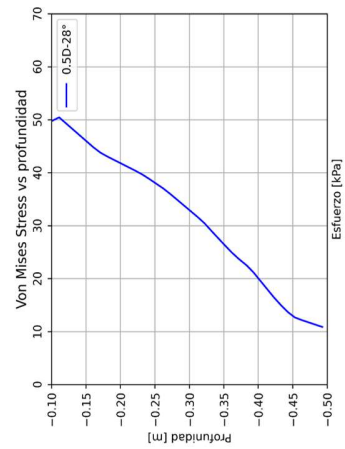
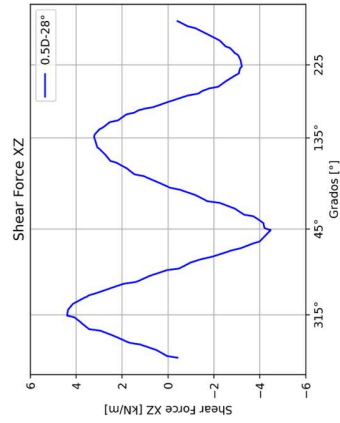
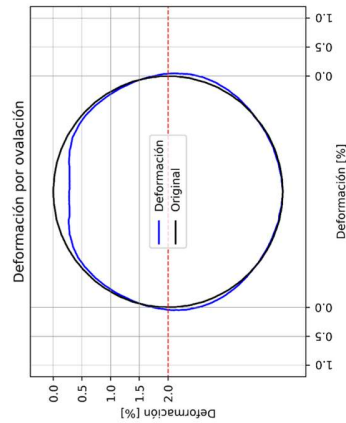
ANEXOS

Fichas técnicas del modelo desarrollado

MODELO: 0.5D - 28°

Datos del modelo

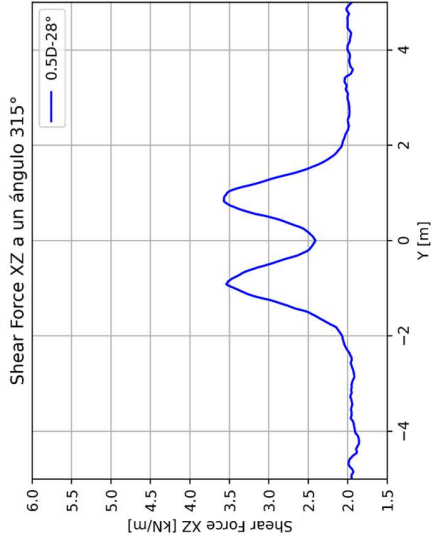
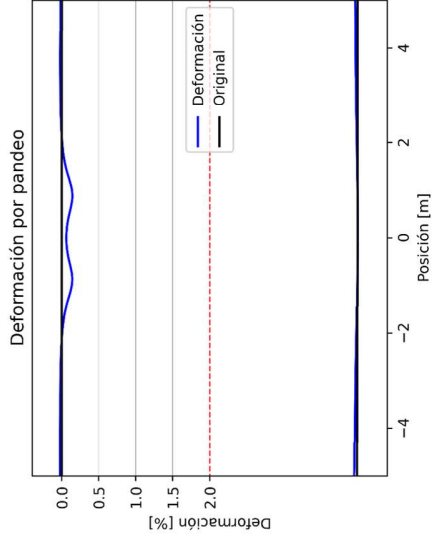
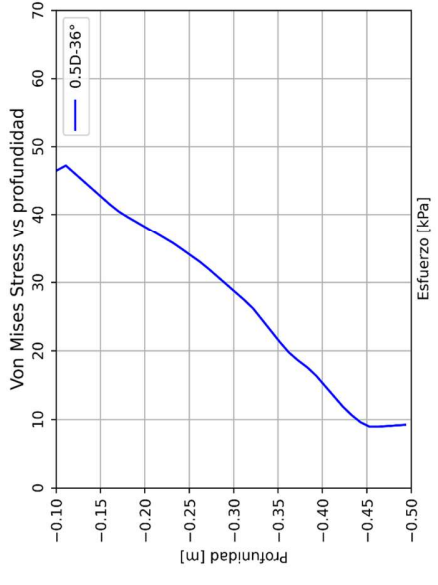
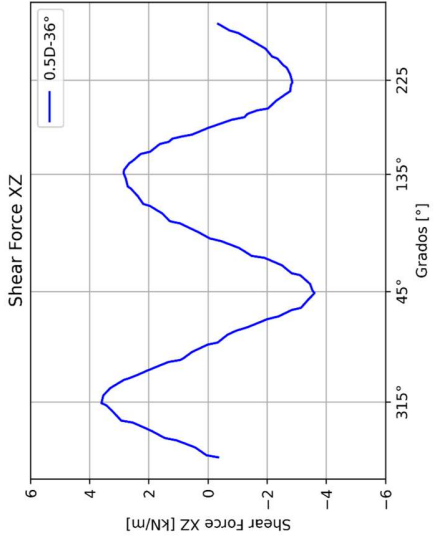
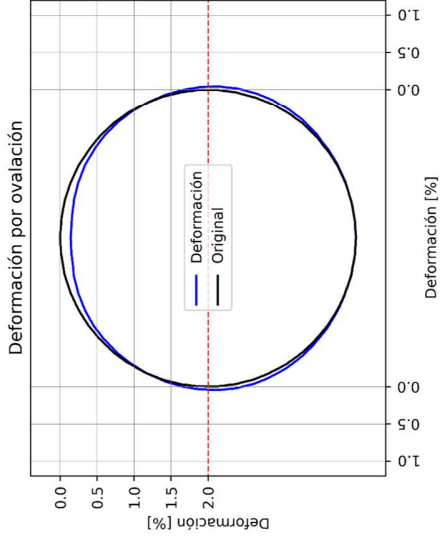
Radio [D]: 1D
 Protección: Sin protección
 Espesor placa [t]: no aplica
 Ancho placa [D]: no aplica
 Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Ángulo de fricción: 28°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 0.5D - 36°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Sin protección
- Espesor placa [t]: no aplica
- Ancho placa [D]: no aplica
- Materia: Arena media
 - Peso unitario: 16 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa]: 20000
 - Angulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa]: 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 0.5D - 45°

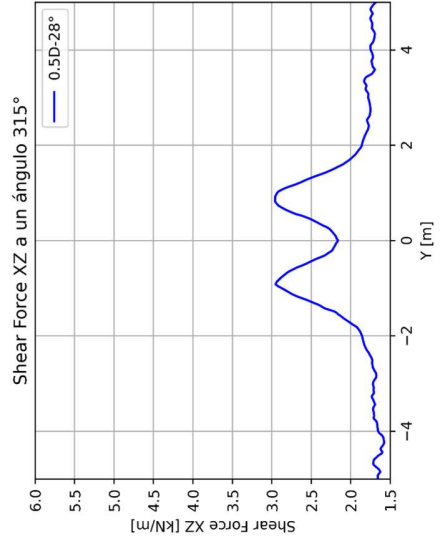
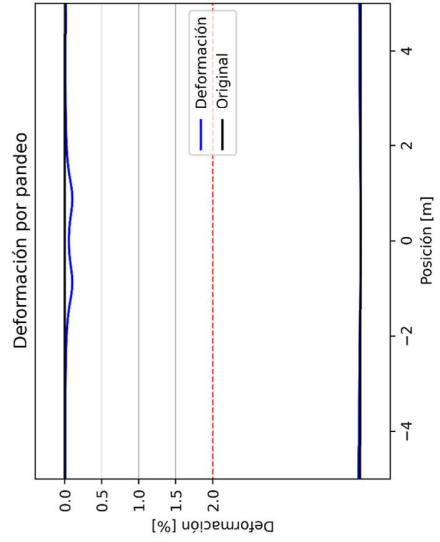
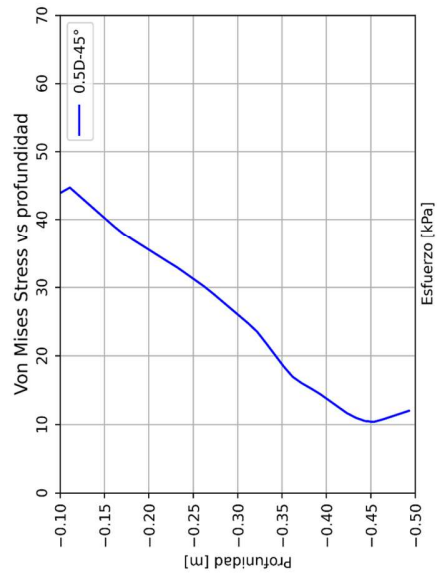
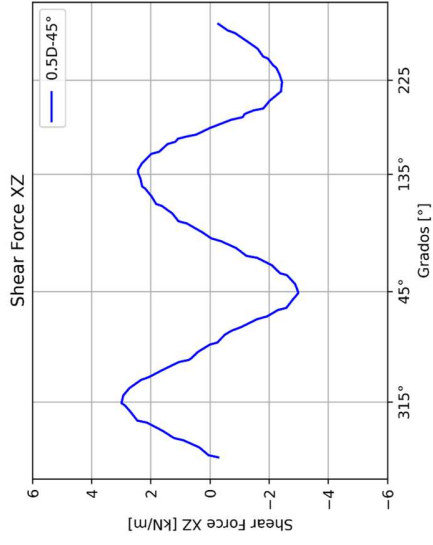
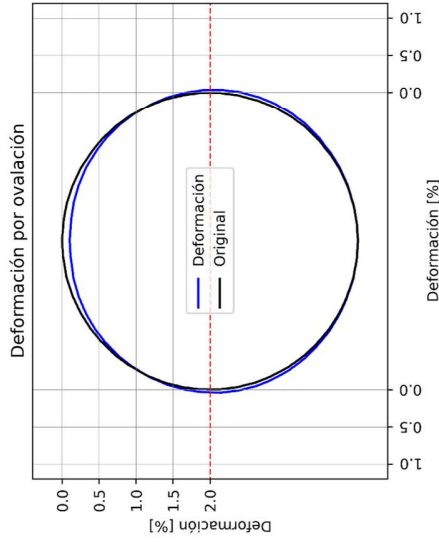
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Sin protección
 Espesor placa [t]: no aplica
 Ancho placa [D]: no aplica

Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 1D - 28°

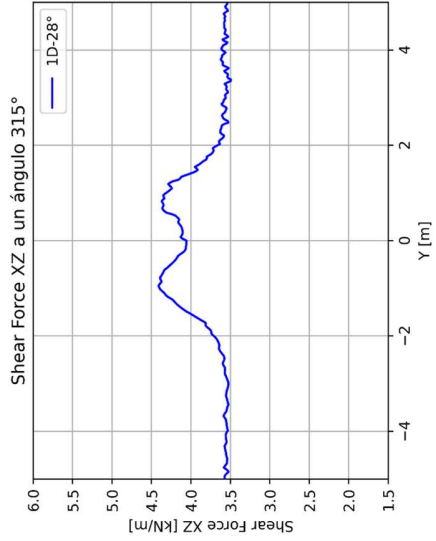
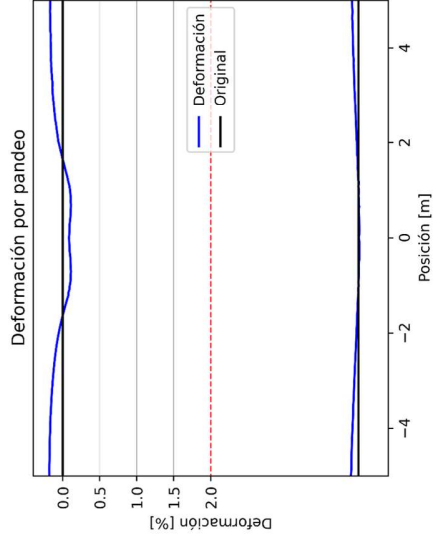
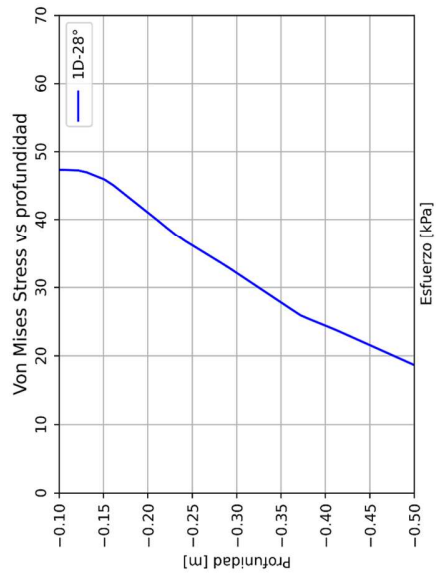
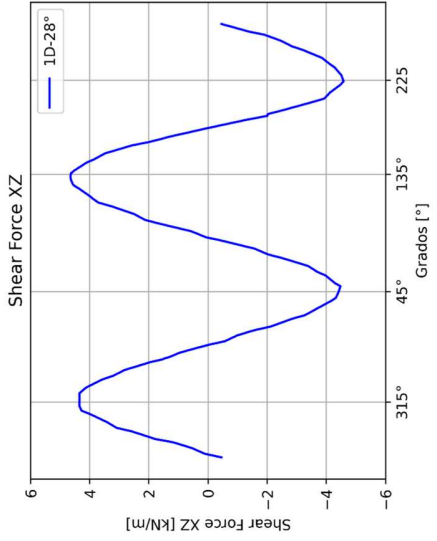
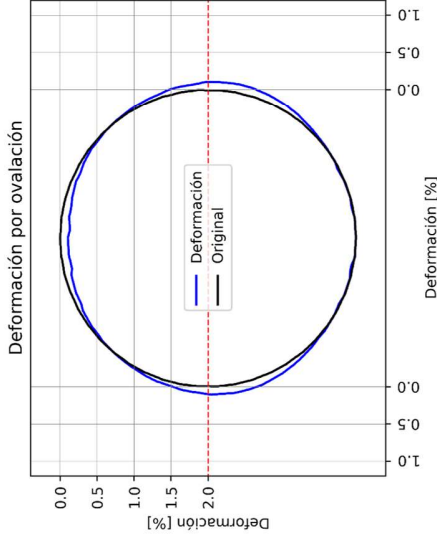
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Sin protección
 Espesor placa [t]: no aplica
 Ancho placa [D]: no aplica

Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 1D - 36°

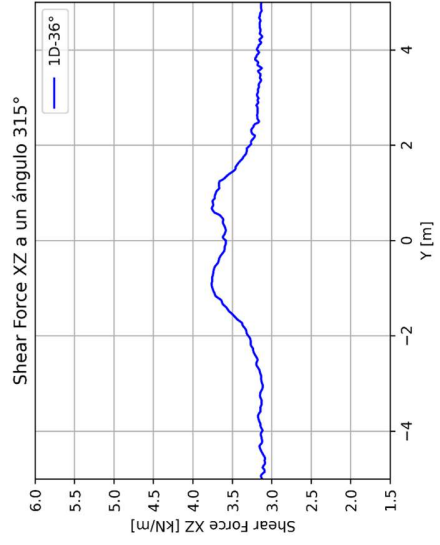
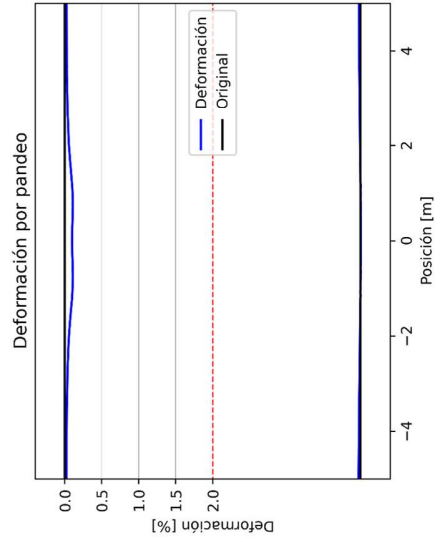
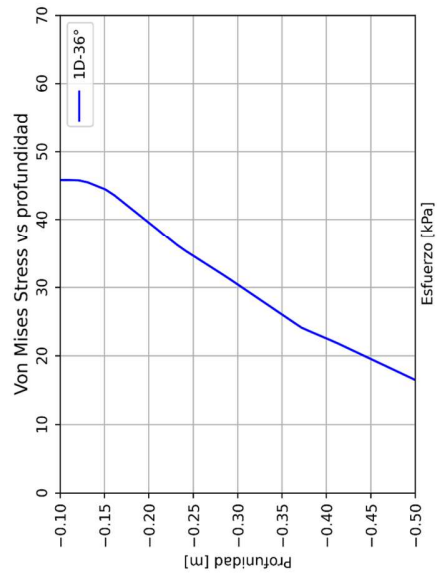
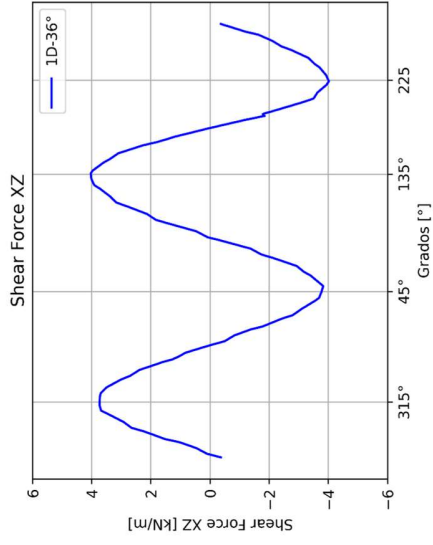
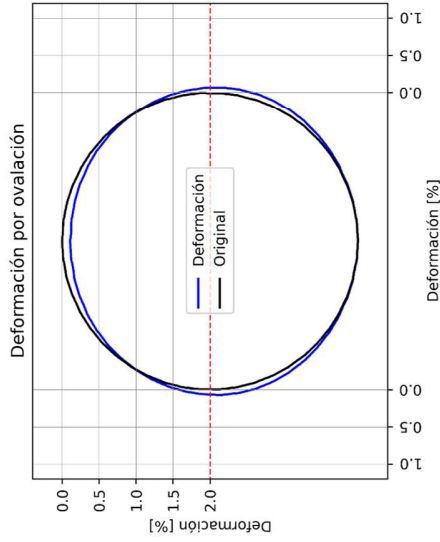
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Sin protección
 Espesor placa [t]: no aplica
 Ancho placa [D]: no aplica

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 1D - 45°

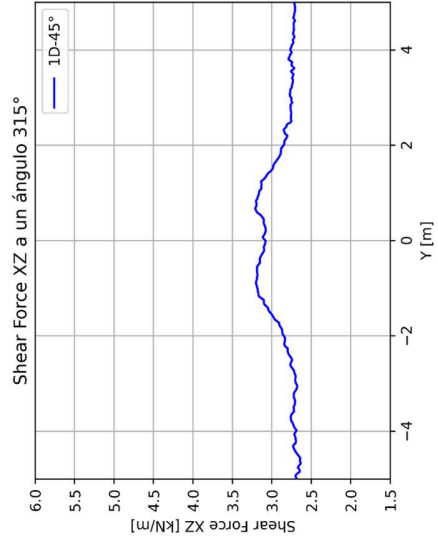
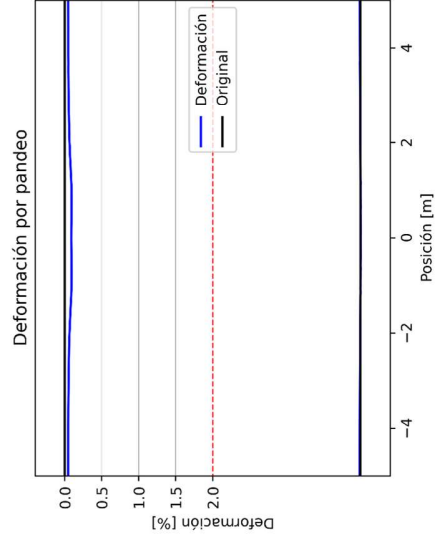
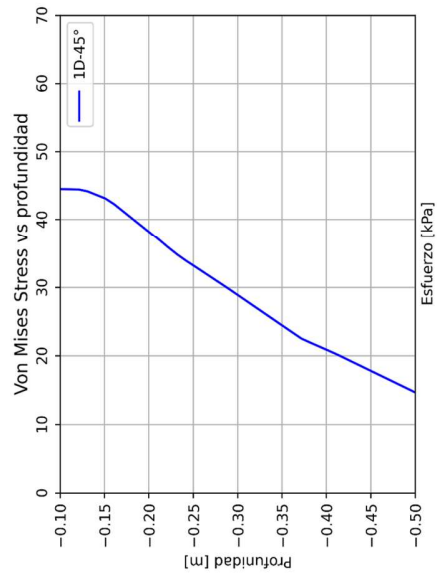
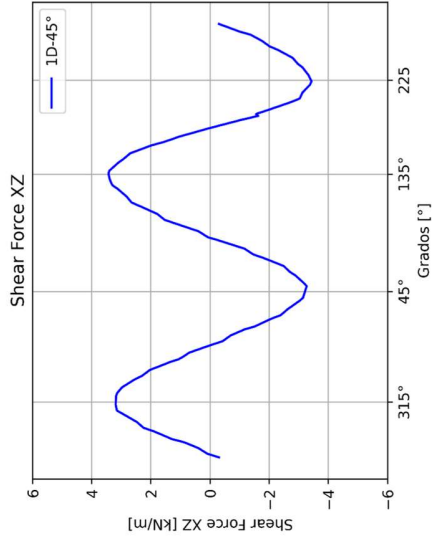
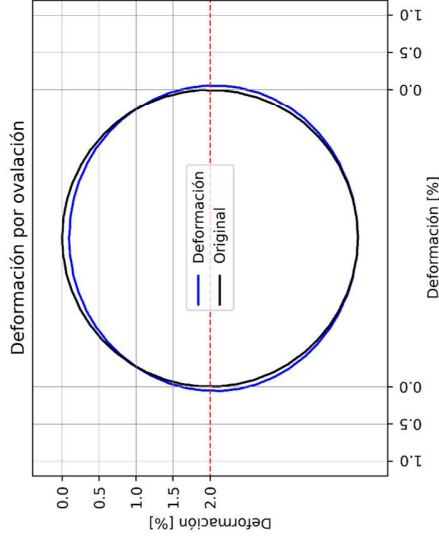
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Sin protección
 Espesor placa [t]: no aplica
 Ancho placa [D]: no aplica

Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

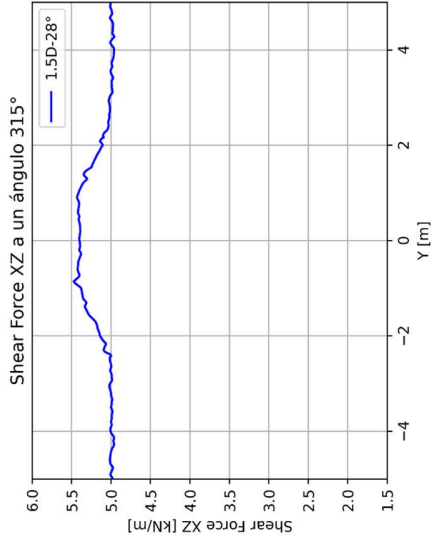
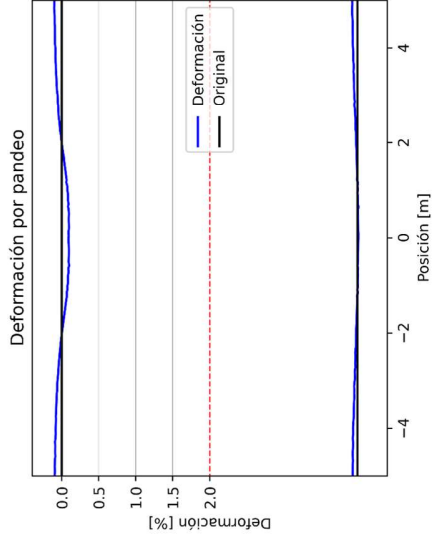
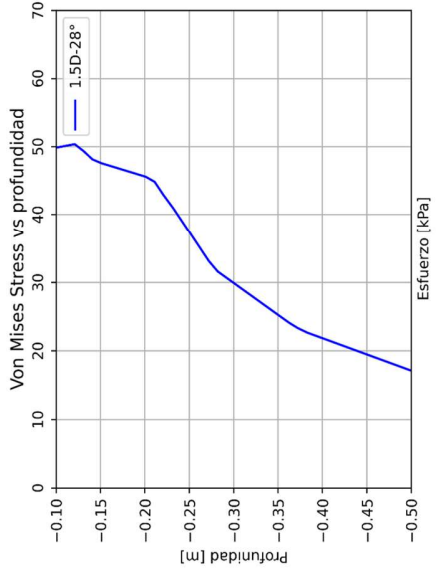
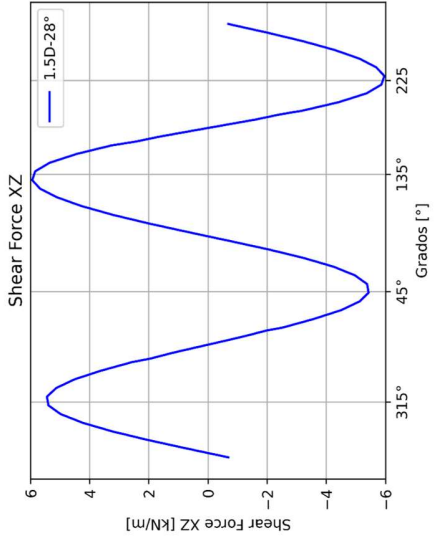
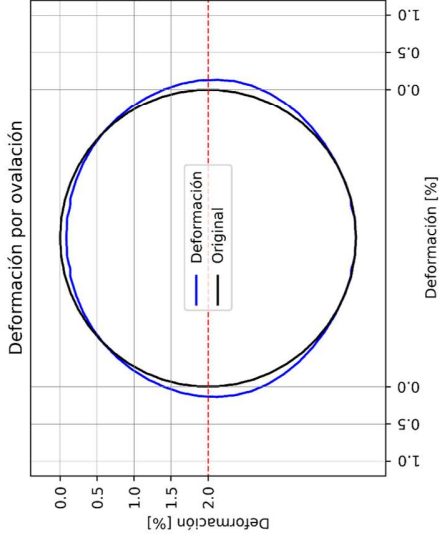
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 1.5D - 28°

Datos del modelo

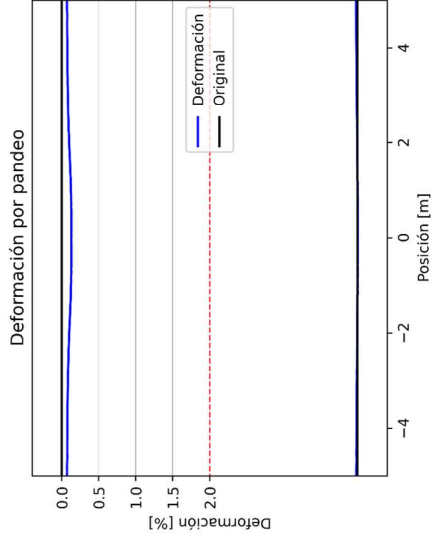
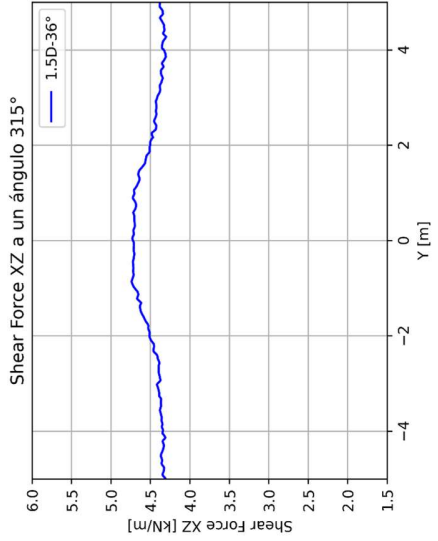
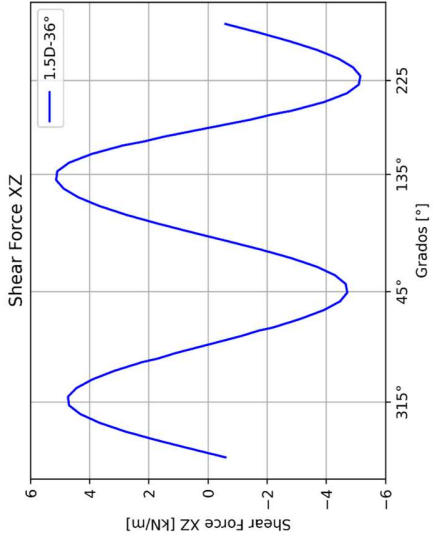
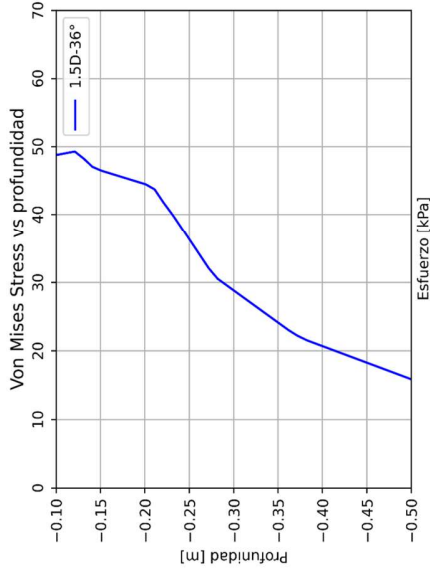
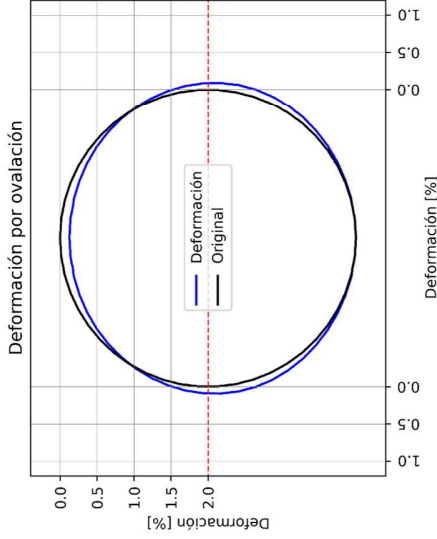
- Radio [D]: 1D
- Protección: Sin protección
- Espesor placa [t]: no aplica
- Ancho placa [D]: no aplica
- Material: Arena suelta
 - Peso unitario: 13 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa]: 5000
 - Angulo de fricción: 28°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa]: 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 1.5D - 36°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Sin protección
- Espesor placa [t]: no aplica
- Ancho placa [D]: no aplica
- Materia: Arena media
 - Peso unitario: 16 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa] : 20000
 - Angulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa] : 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 1.5D - 45°

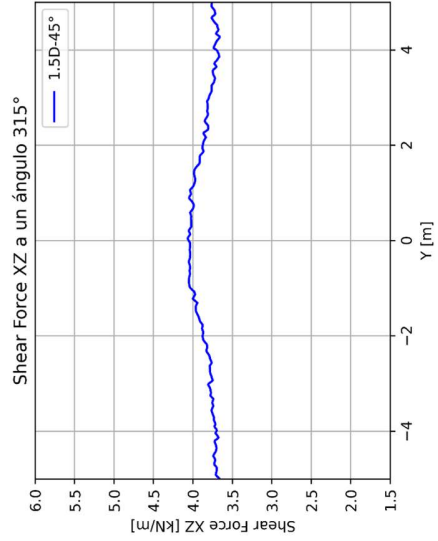
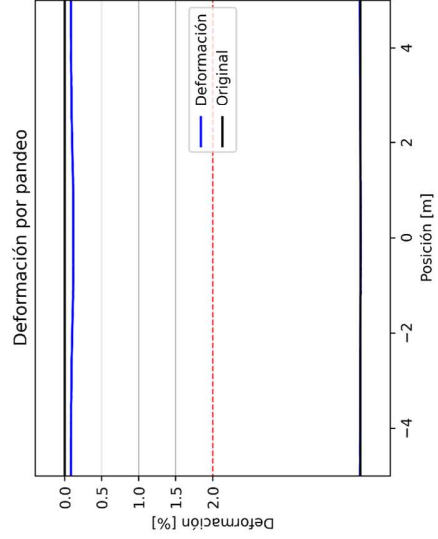
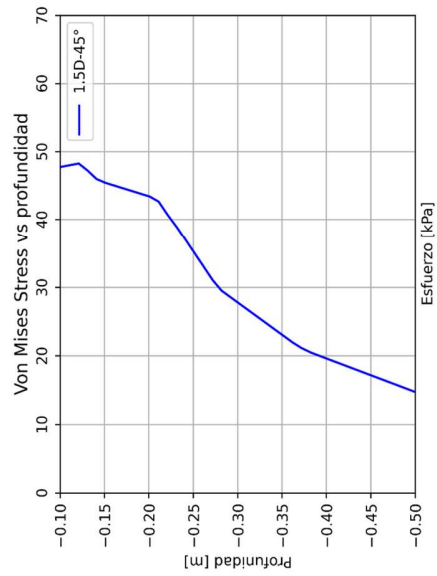
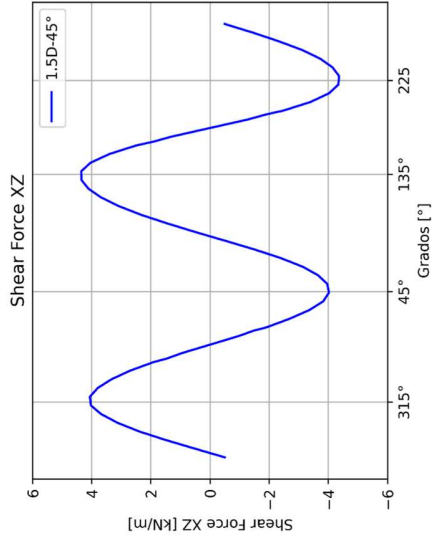
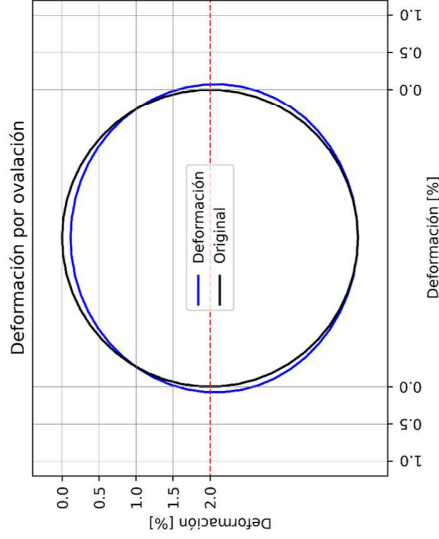
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Sin protección
 Espesor placa [t]: no aplica
 Ancho placa [D]: no aplica

Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 32-1D-0.5D-28°

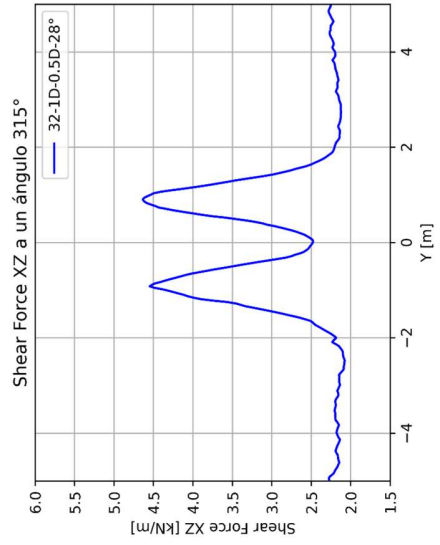
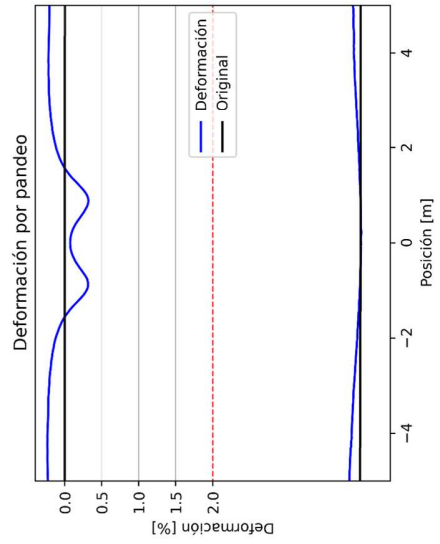
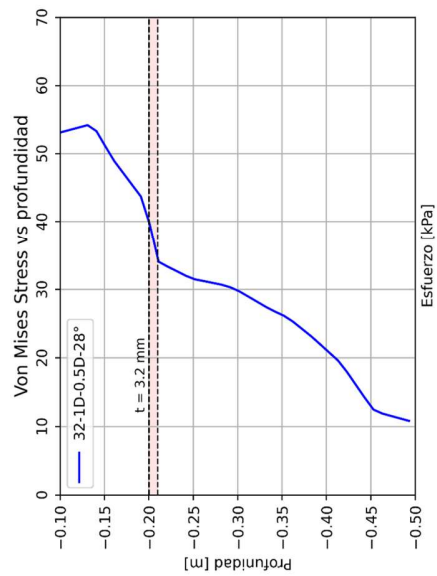
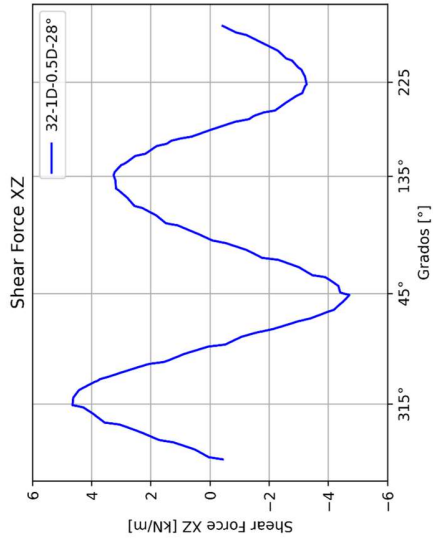
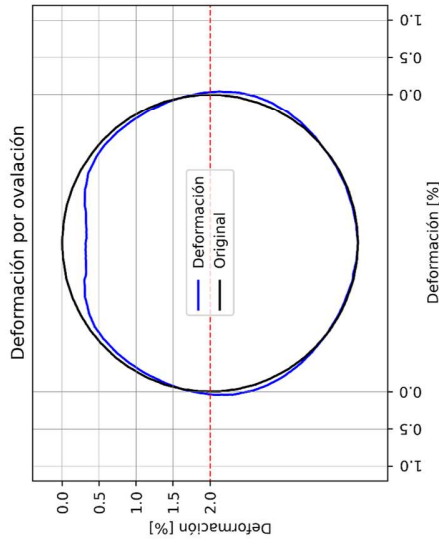
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 32-1D-0.5D-36°

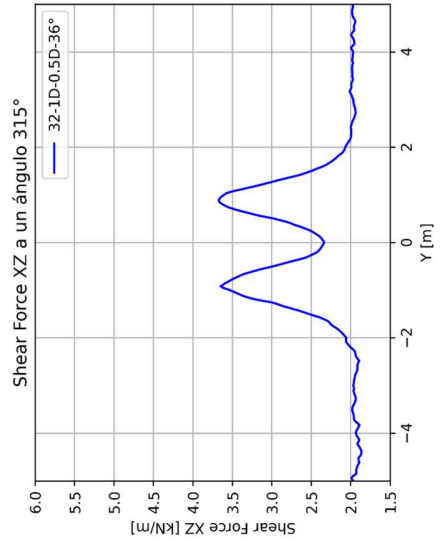
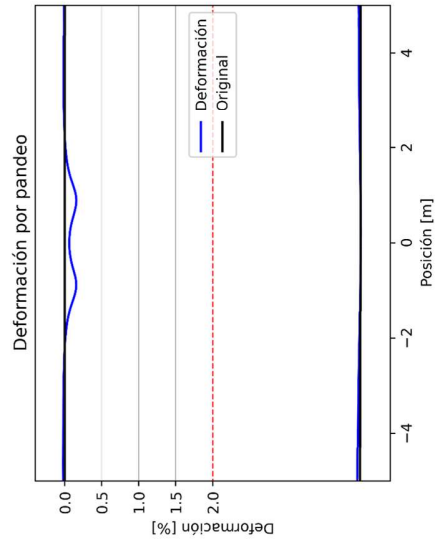
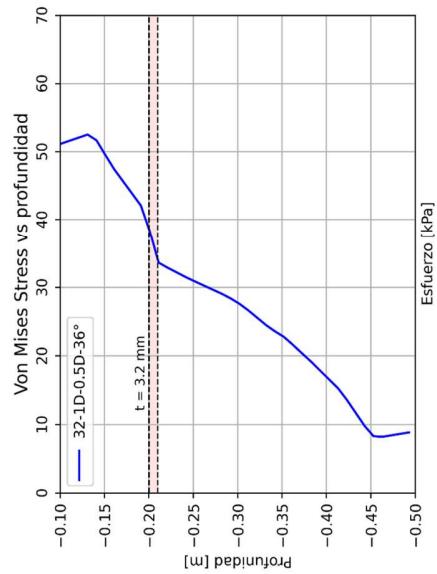
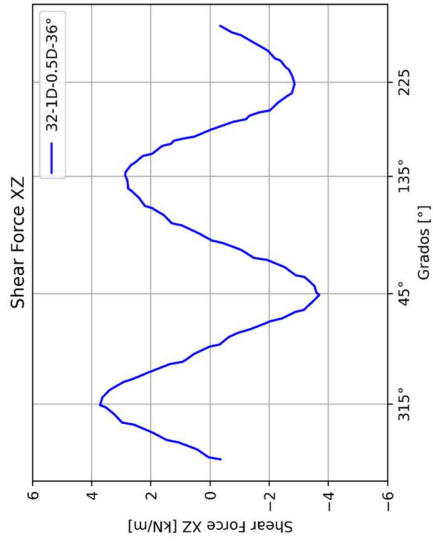
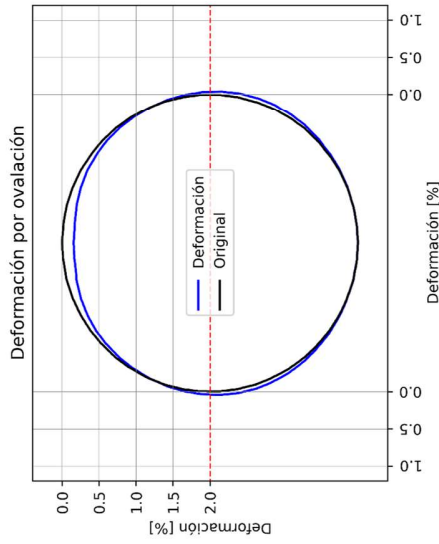
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 32-1D-0.5D-45°

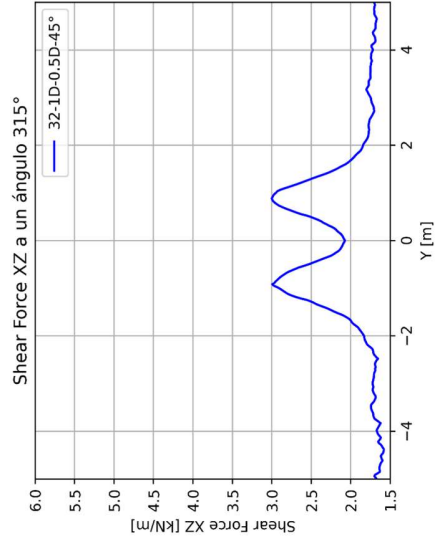
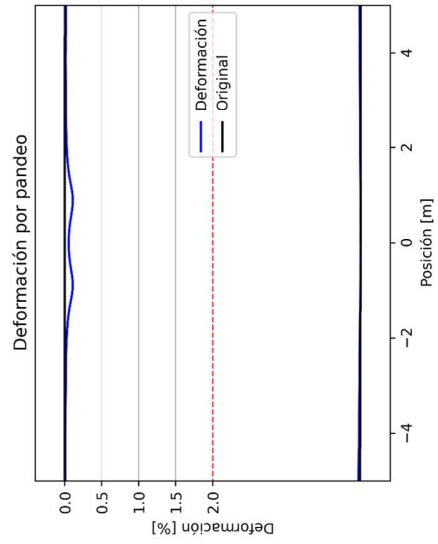
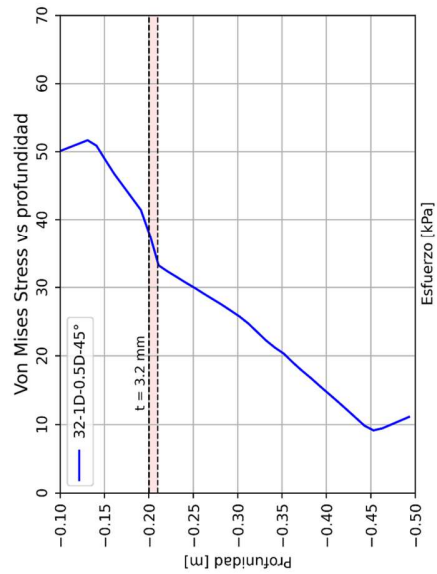
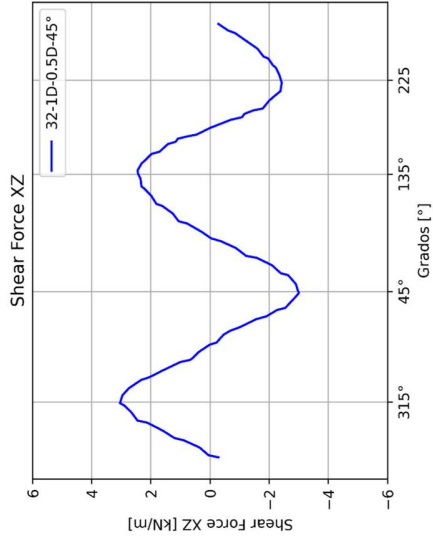
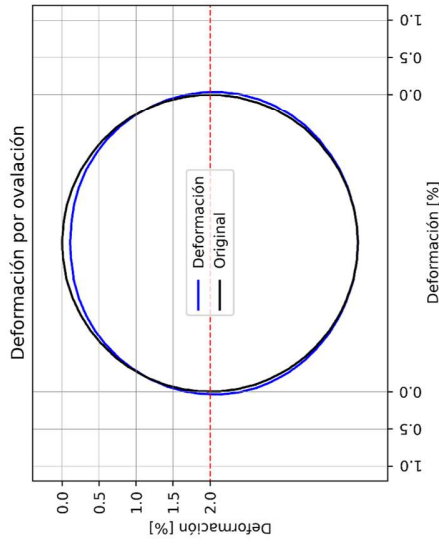
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 32-1D-1D-28°

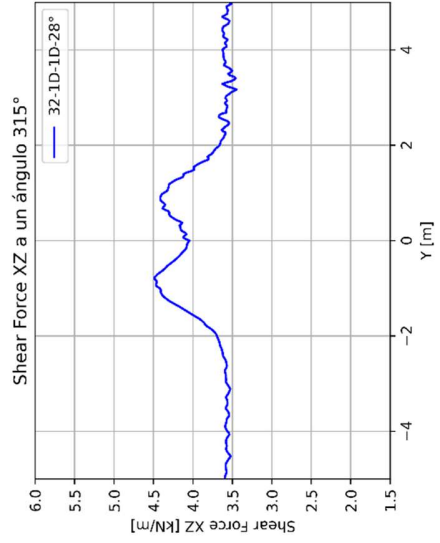
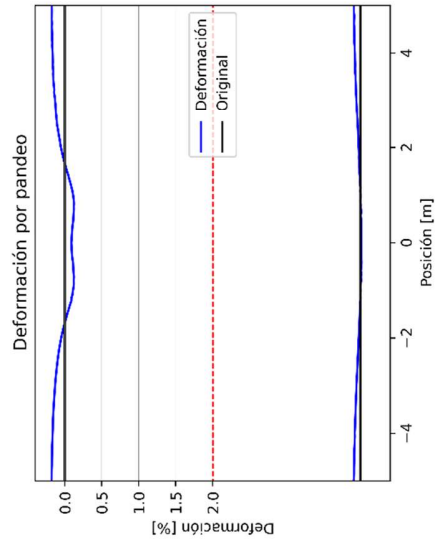
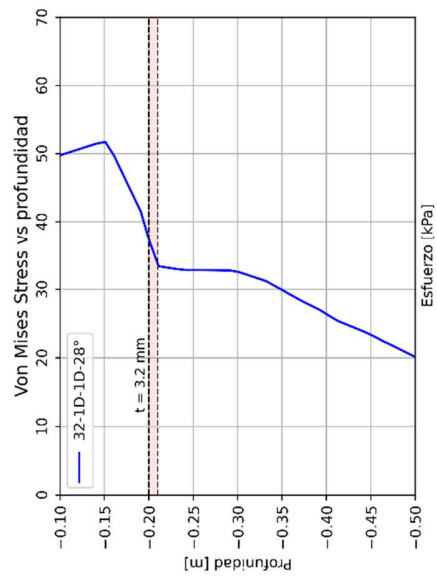
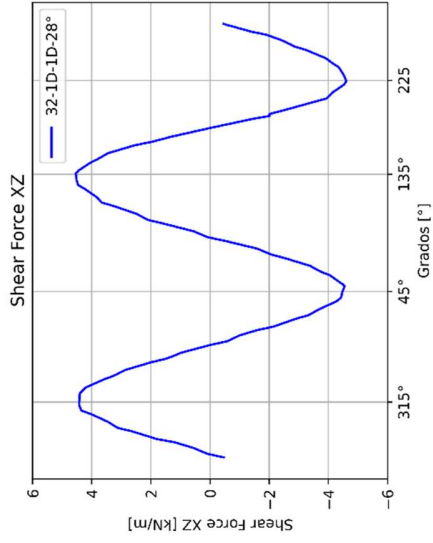
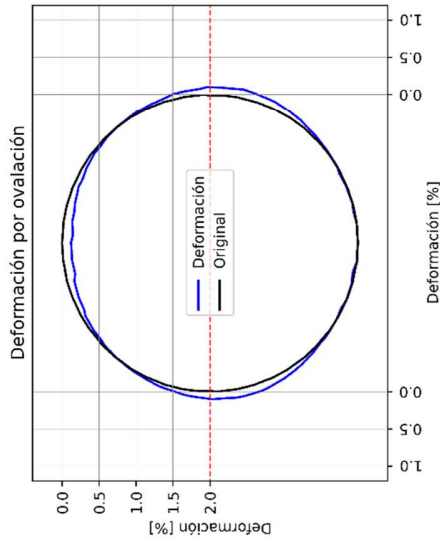
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 32-1D-1D-36°

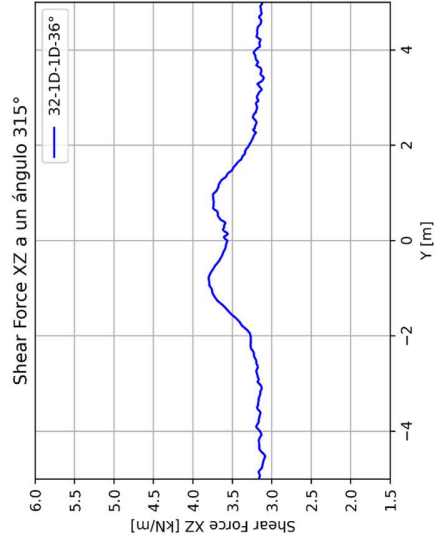
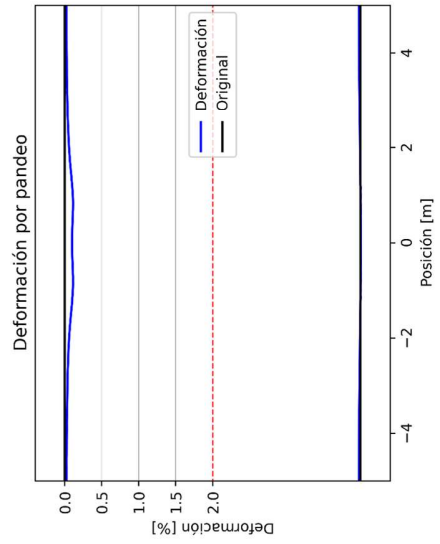
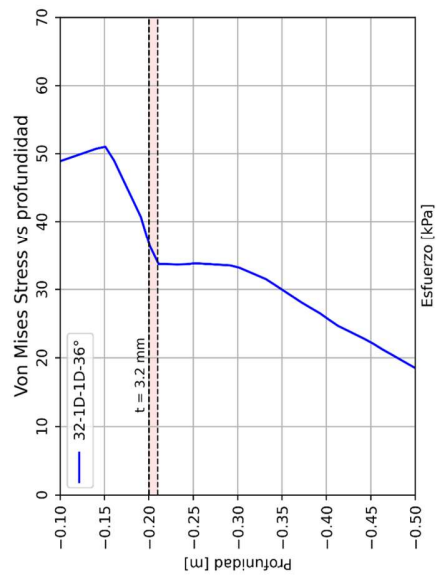
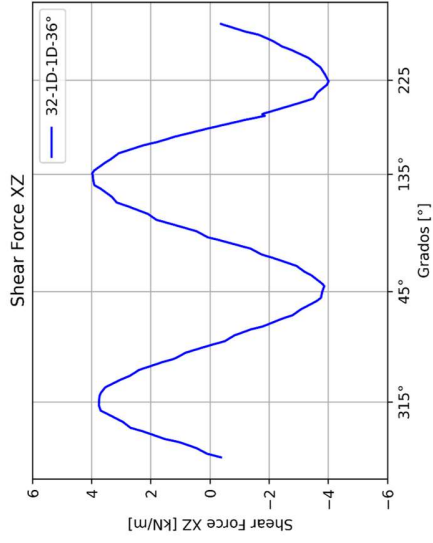
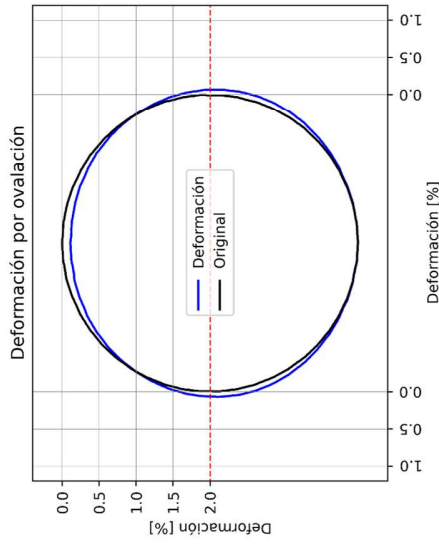
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 32-1D-1D-45°

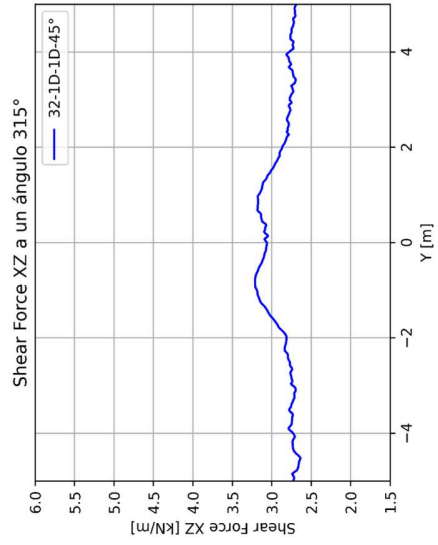
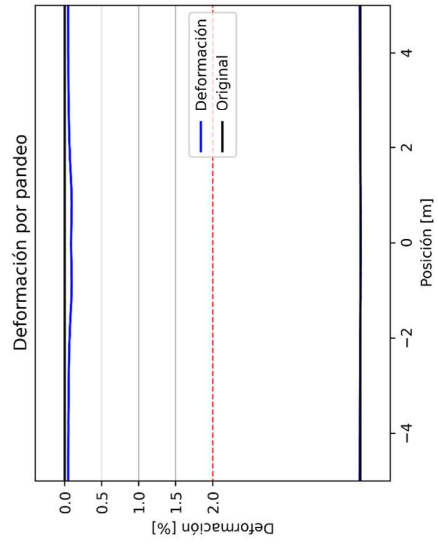
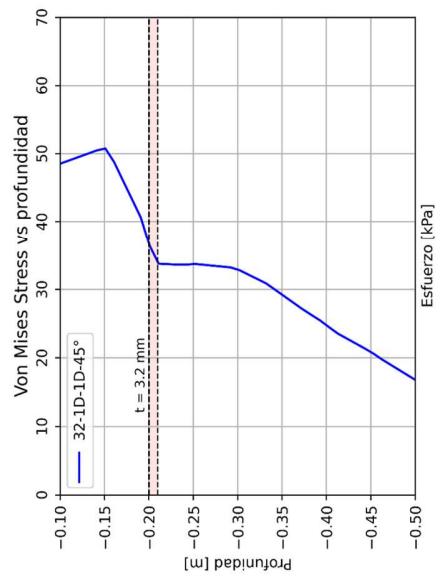
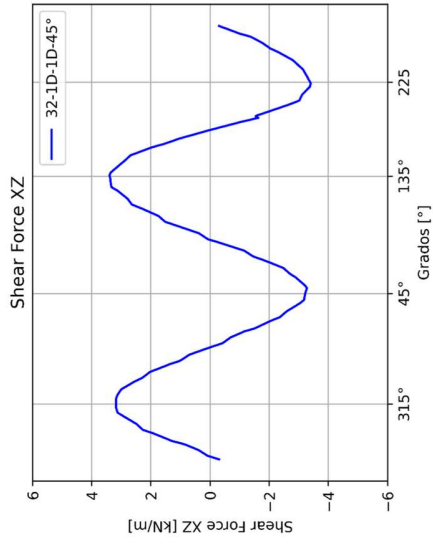
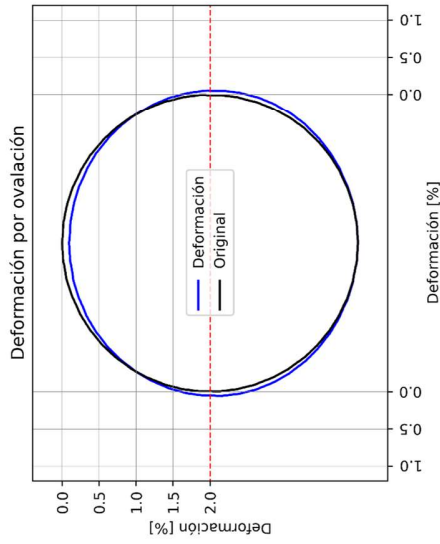
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 32-1D-1.5D-28°

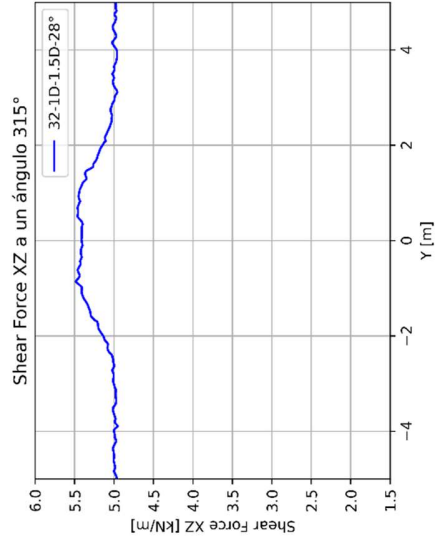
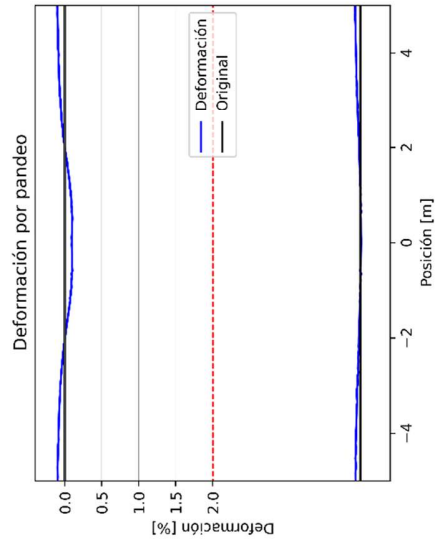
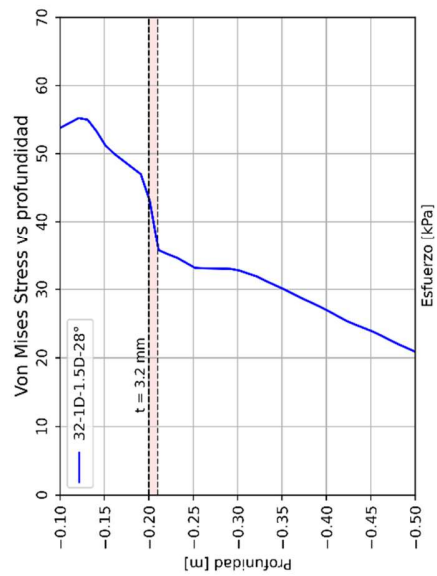
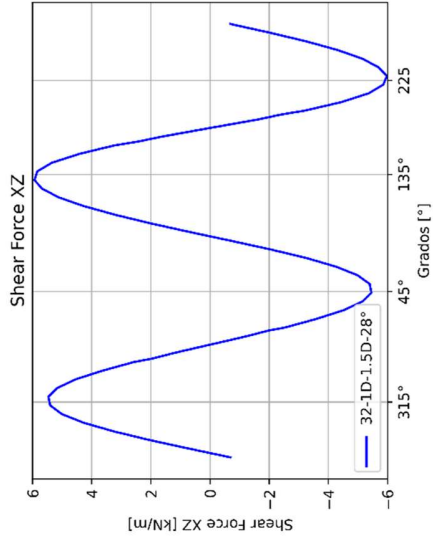
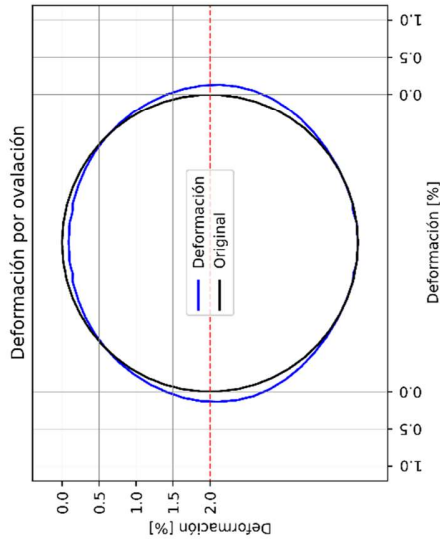
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

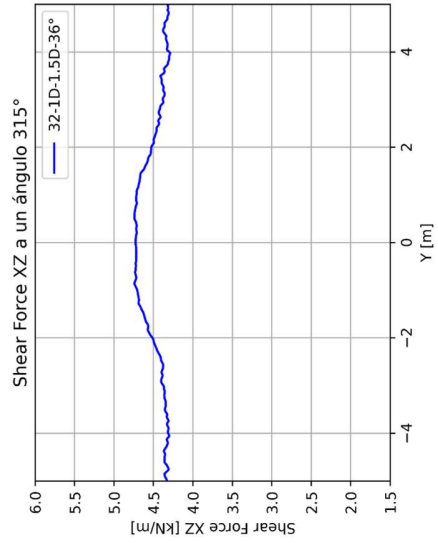
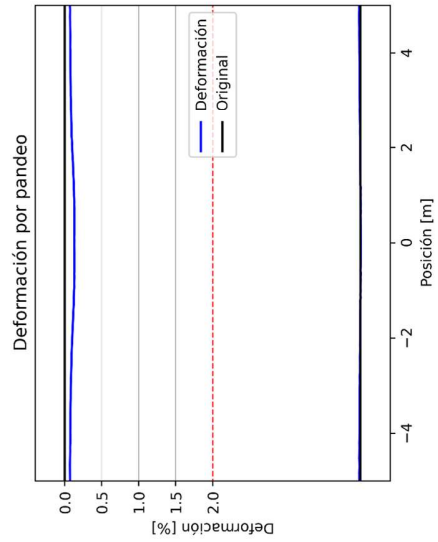
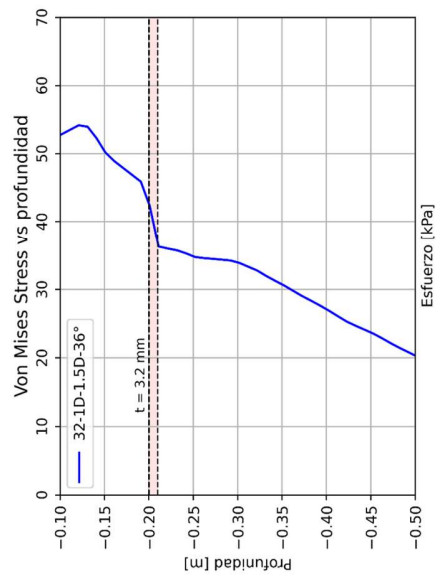
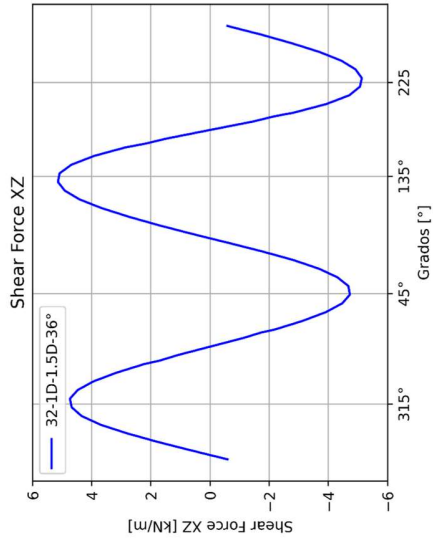
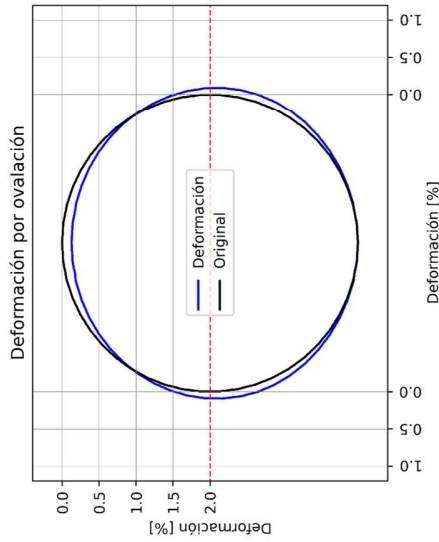
Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 32-1D-1.5D-36°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 3.2mm
- Ancho placa [D]: 1D
- Materia: Arena media
 - Peso unitario: 16 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa]: 20000
 - Angulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa]: 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 32-1D-1.5D-45°

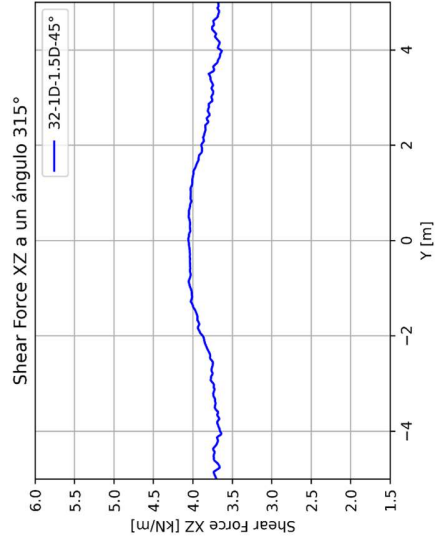
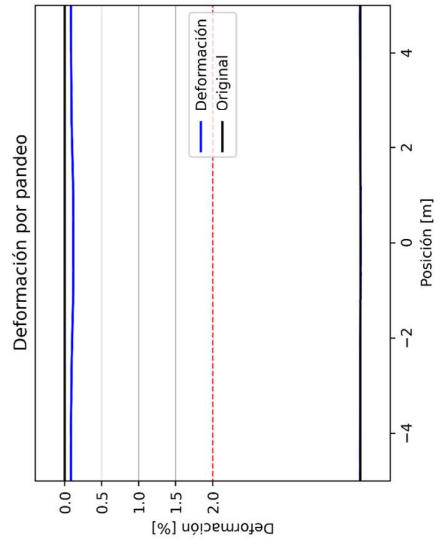
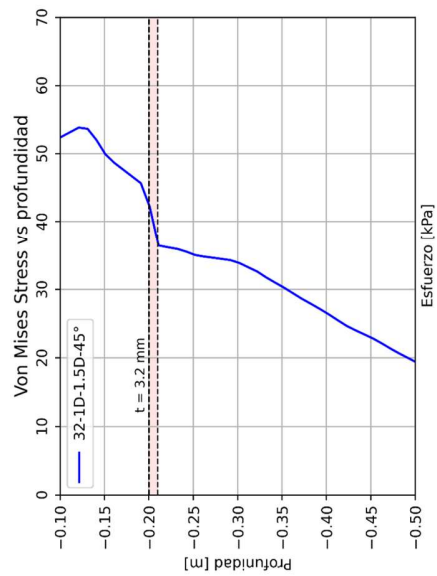
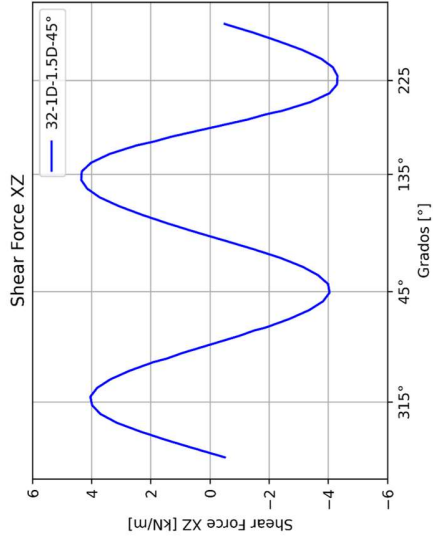
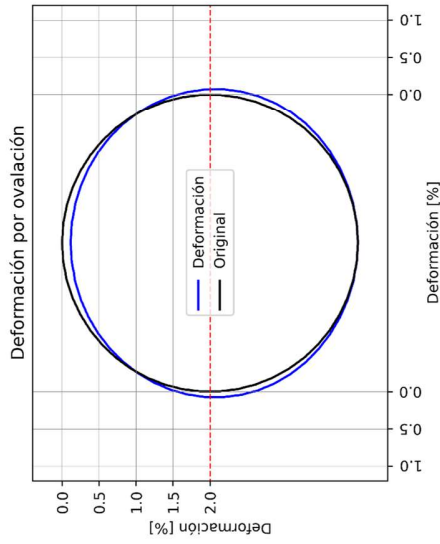
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

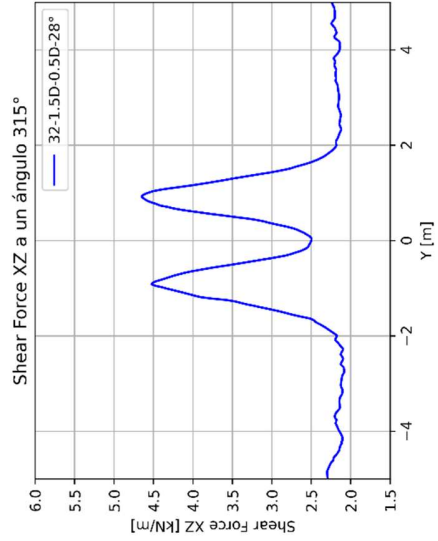
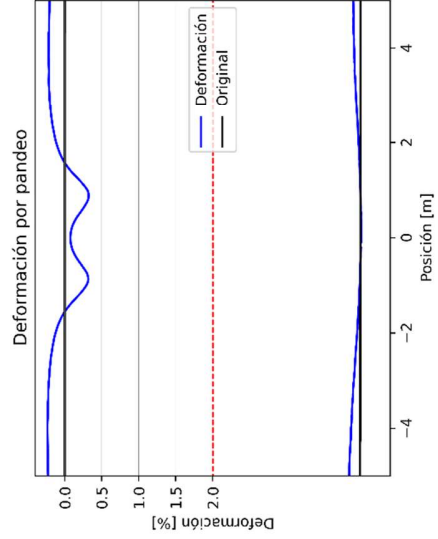
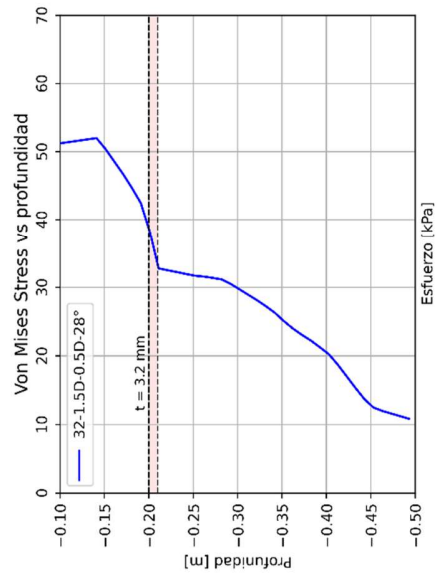
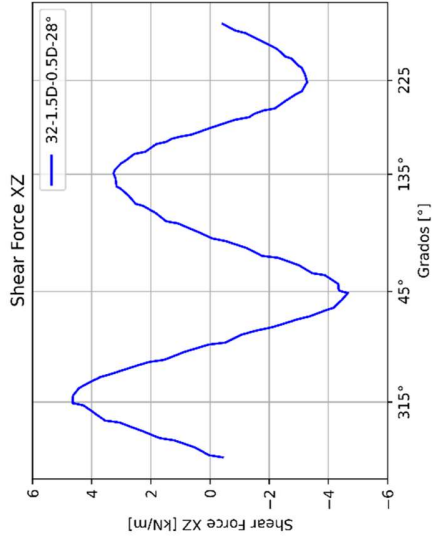
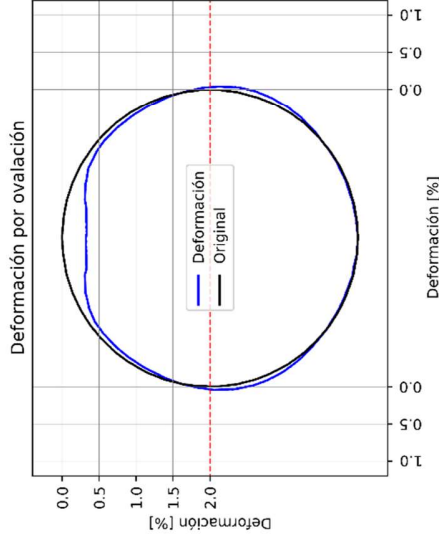
Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 32-1.5D-0.5D-28°

Datos del modelo

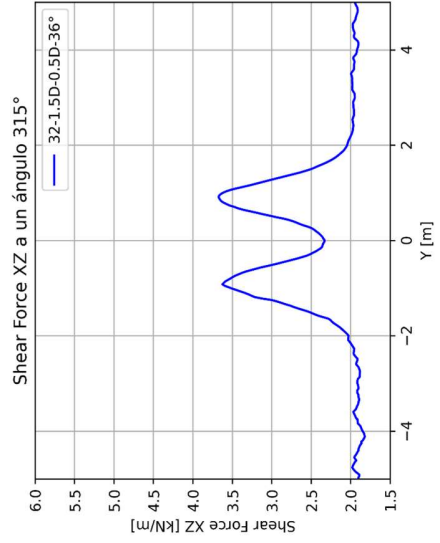
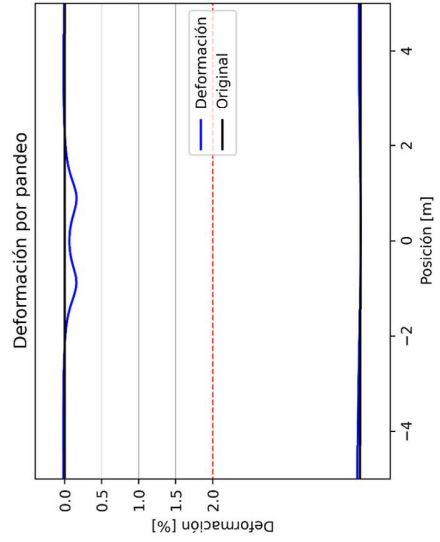
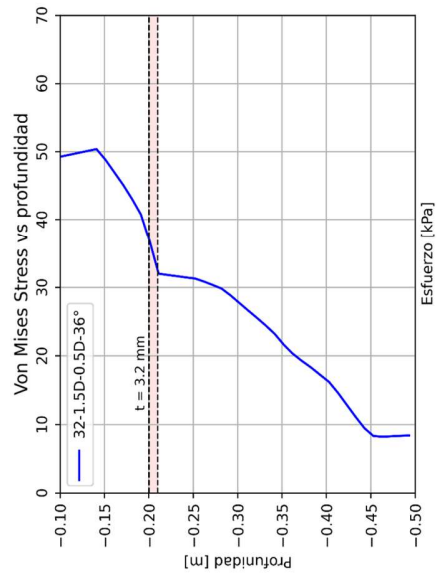
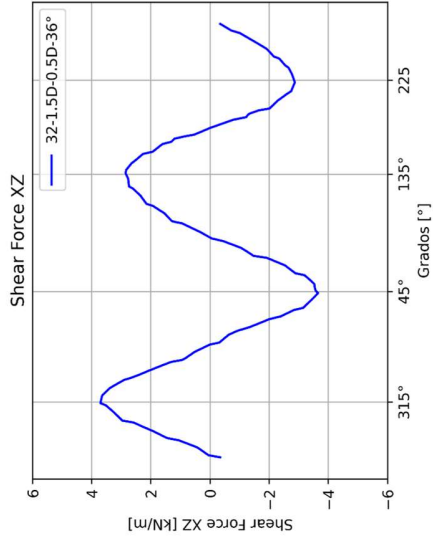
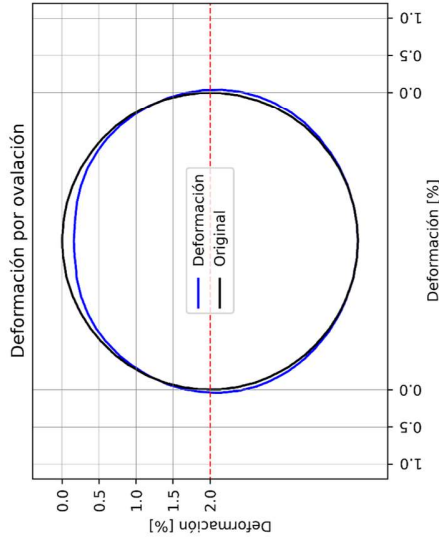
Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D
 Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 32-1.5D-0.5D-36°

Datos del modelo

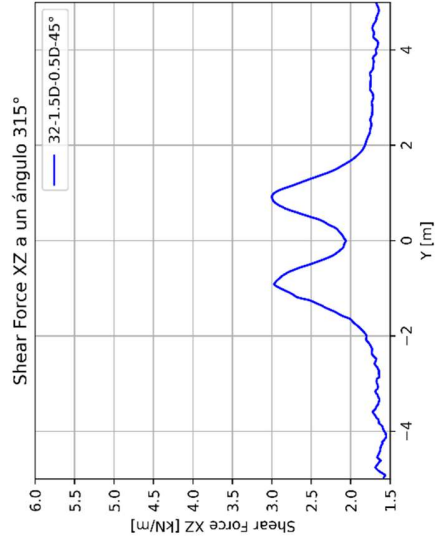
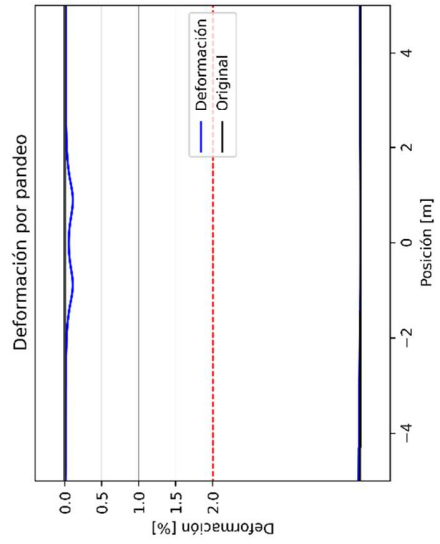
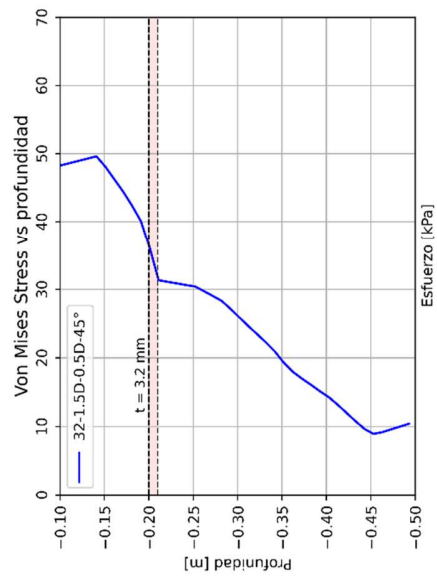
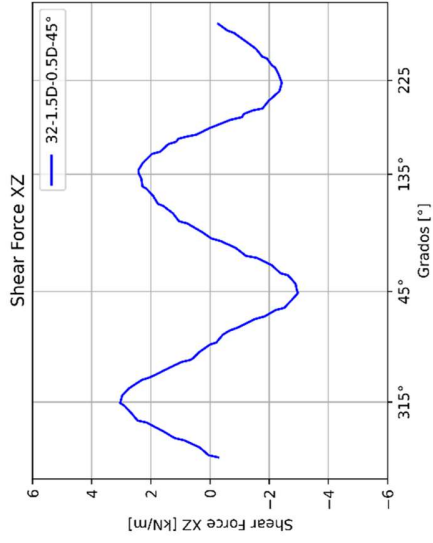
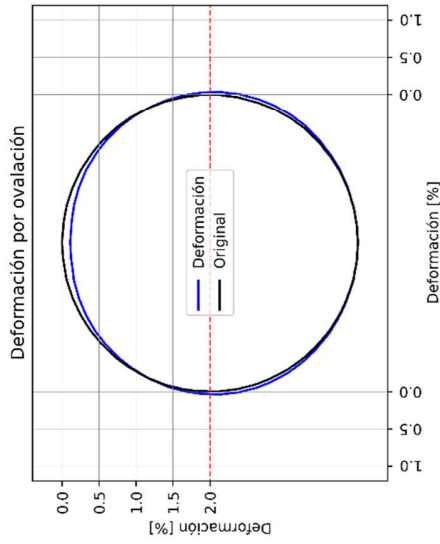
- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 3.2mm
- Ancho placa [D]: 1.5D
- Material: Arena media
- Peso unitario: 16 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa] : 20000
- Angulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa] : 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 32-1.5D-0.5D-45°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 3.2mm
- Ancho placa [D]: 1.5D
- Material: Arena densa
- Peso unitario: 19 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa]: 40000
- Angulo de fricción: 45°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa]: 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 32-1.5D-1D-28°

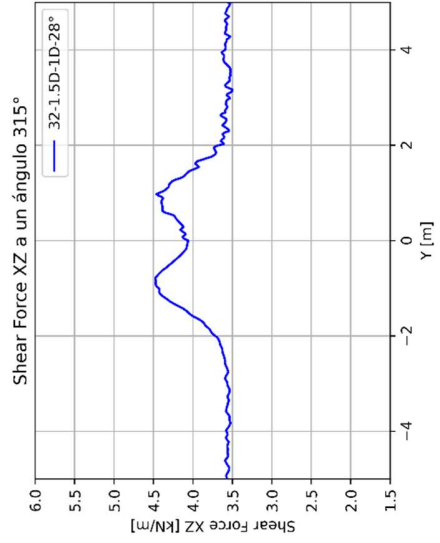
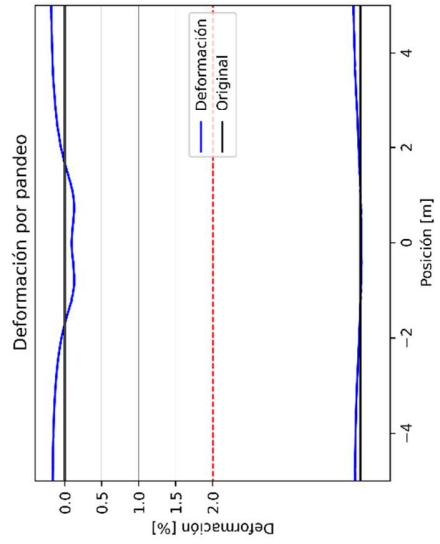
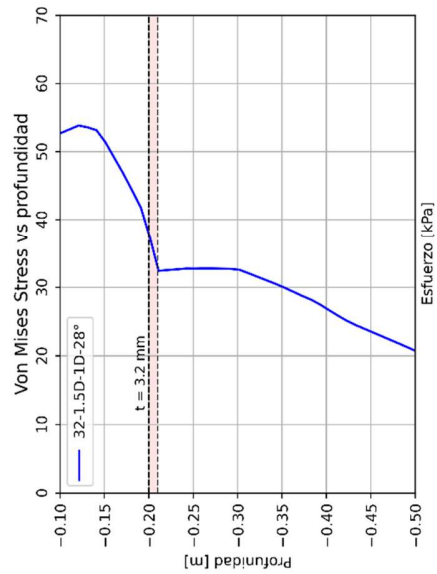
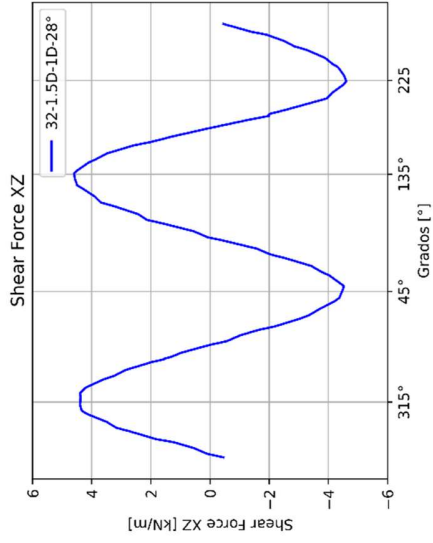
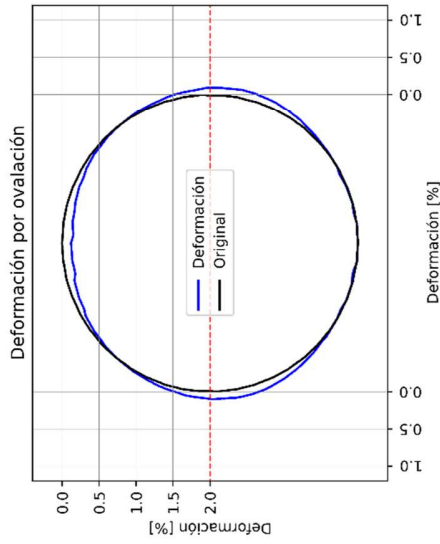
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Materia: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

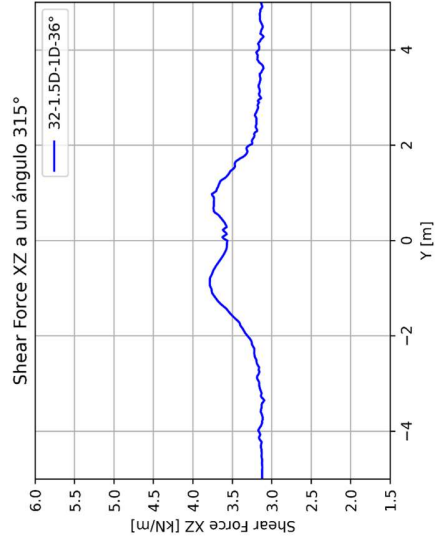
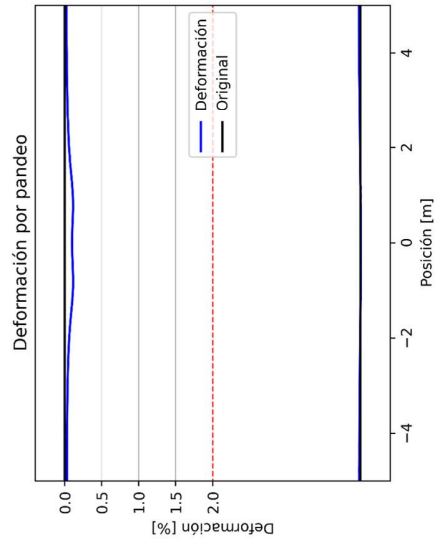
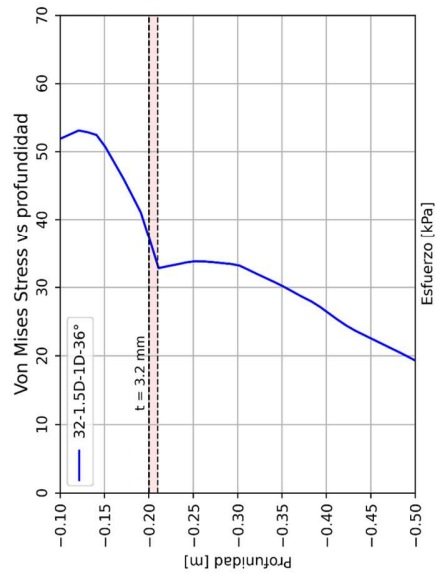
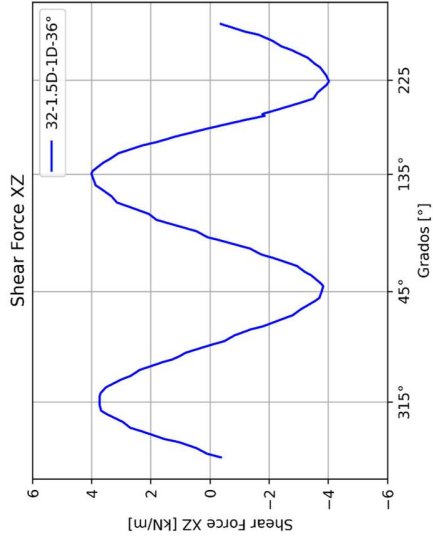
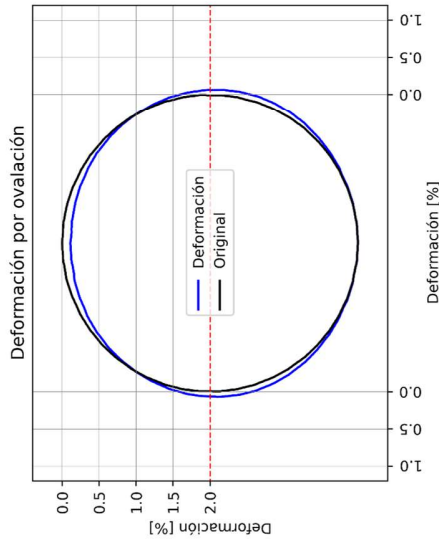
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 32-1.5D-1D-36°

Datos del modelo

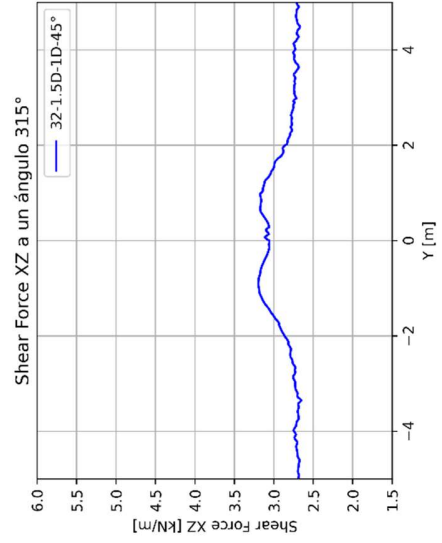
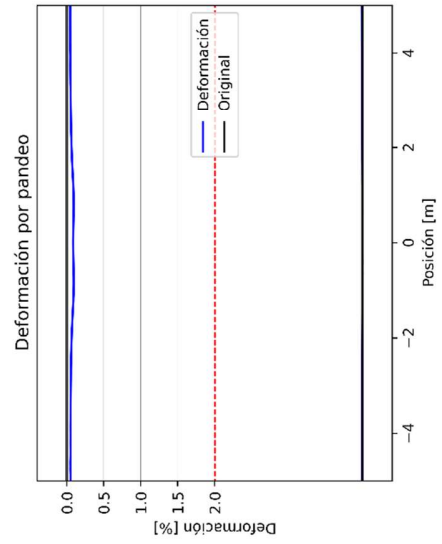
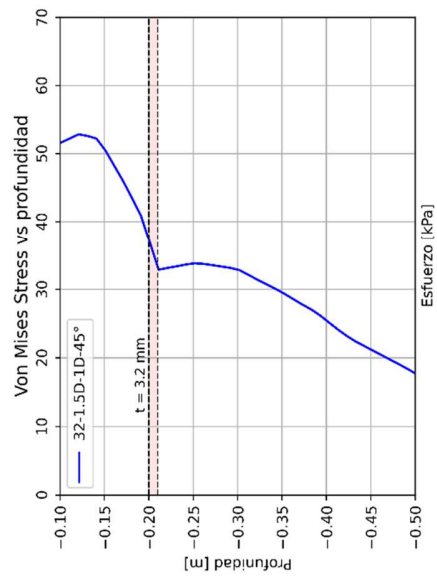
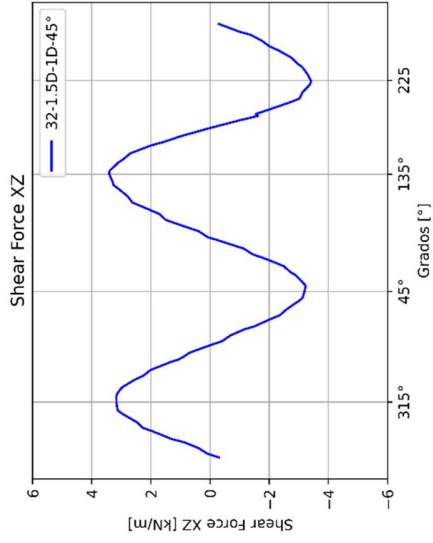
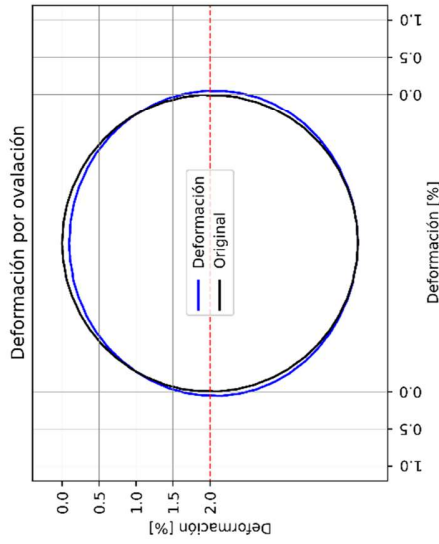
- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 3.2mm
- Ancho placa [D]: 1.5D
- Material: Arena media
- Peso unitario: 16 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa]: 20000
- Angulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa]: 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1D



MODELO: 32-1.5D-1D-45°

Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D
 Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 1D



MODELO: 32-1.5D-1.5D-28°

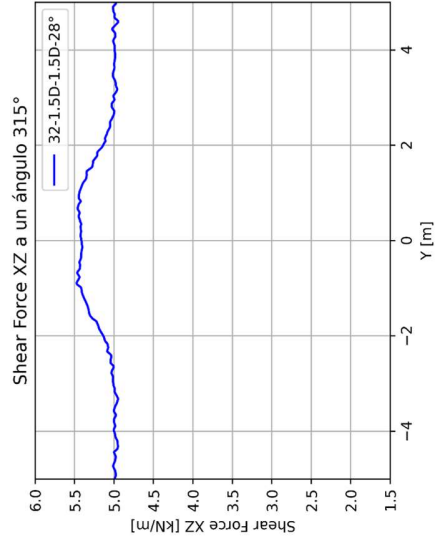
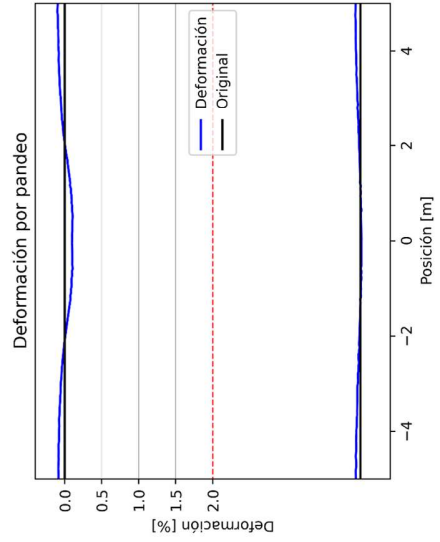
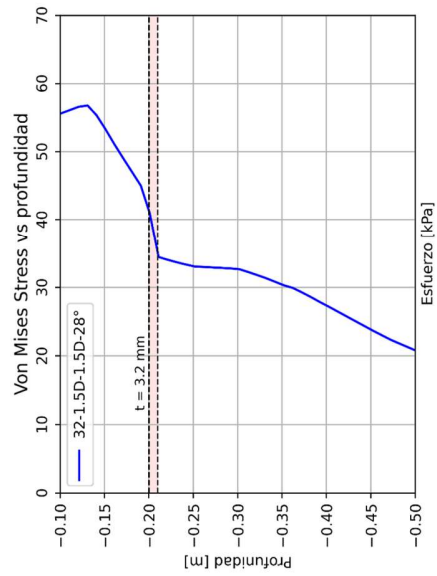
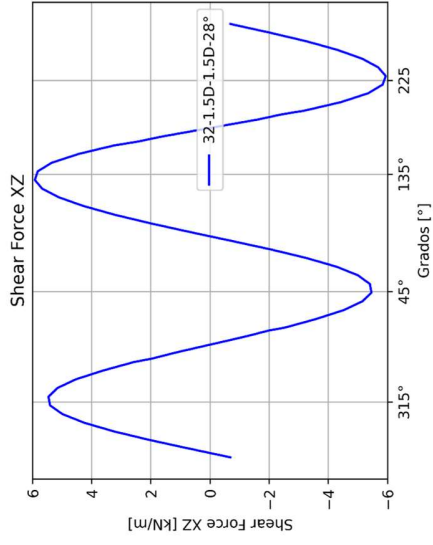
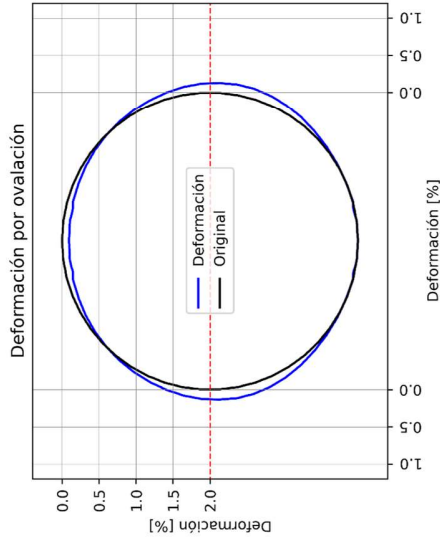
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Materia: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa] : 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa] : 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 32-1.5D-1.5D-36°

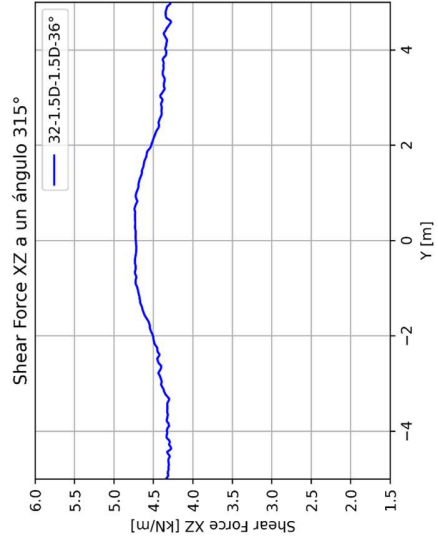
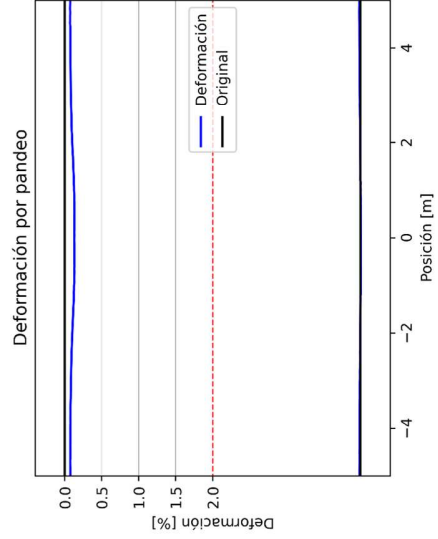
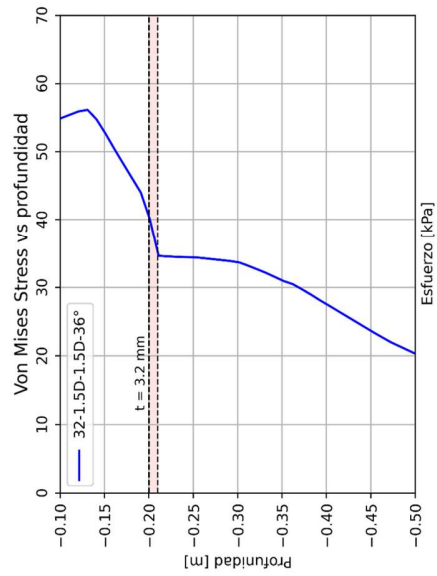
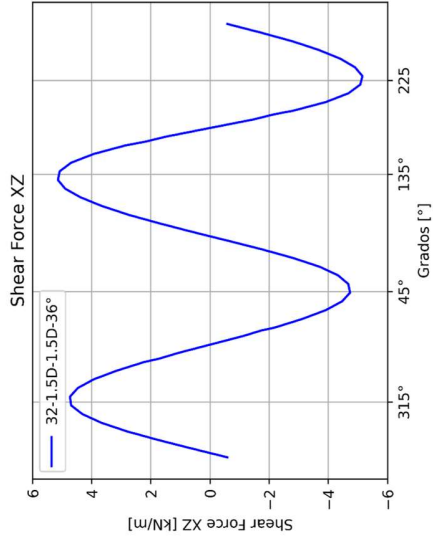
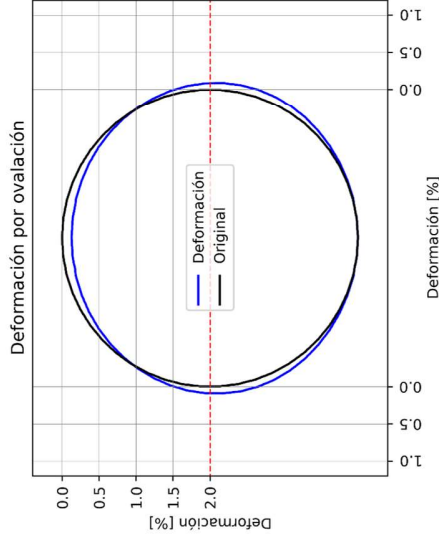
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa] : 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa] : 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 32-1.5D-1.5D-45°

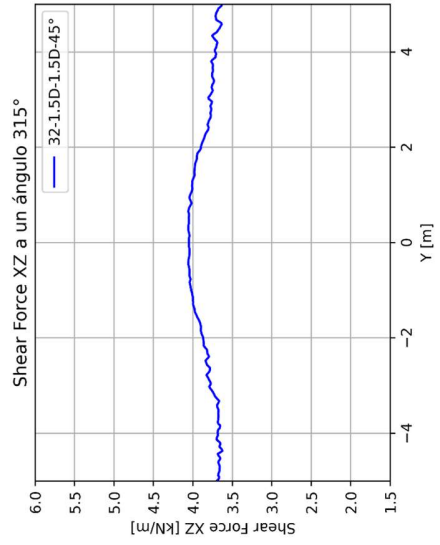
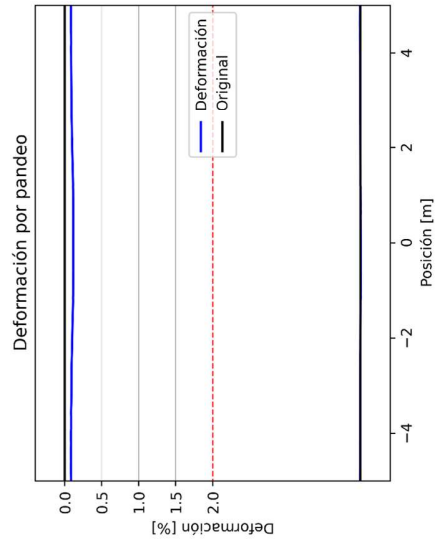
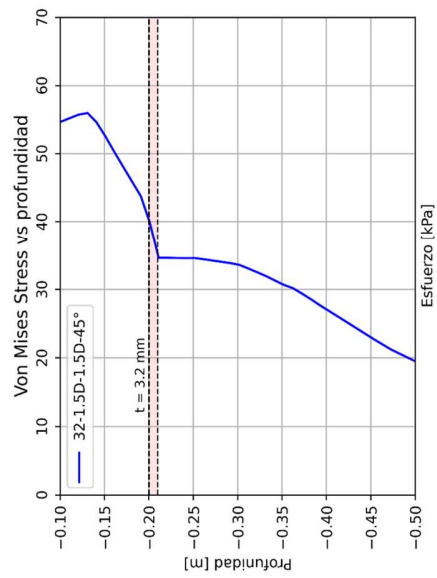
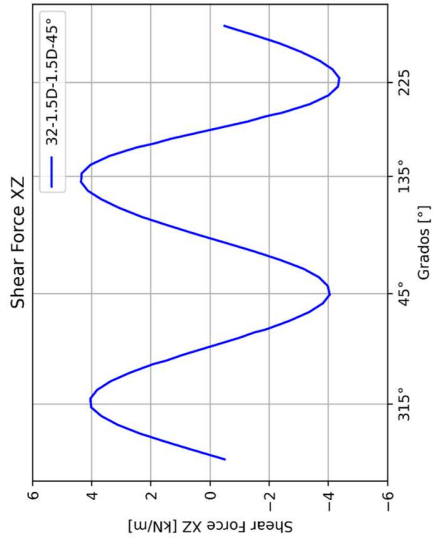
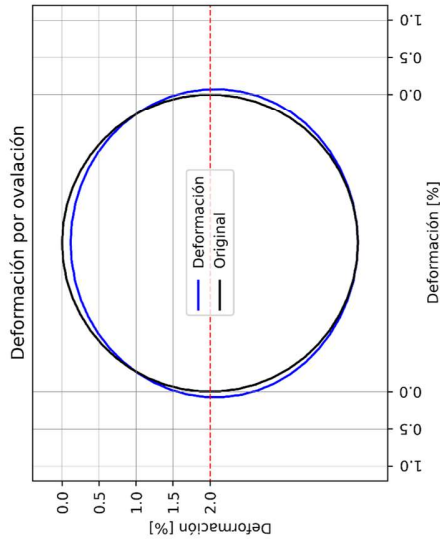
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 32-2D-0.5D-28°

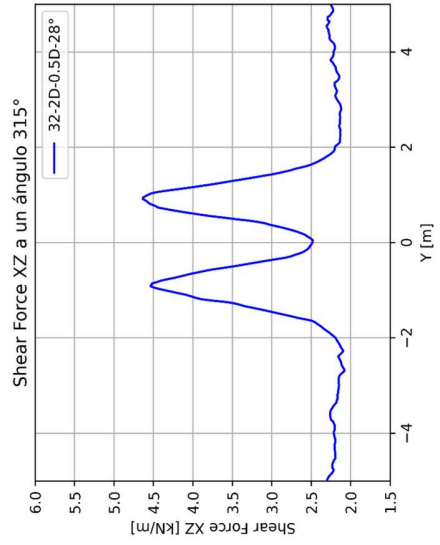
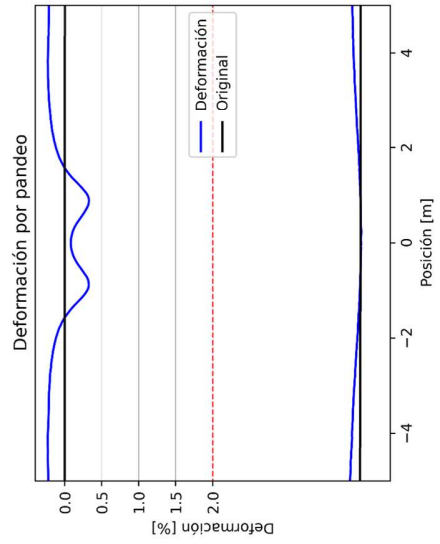
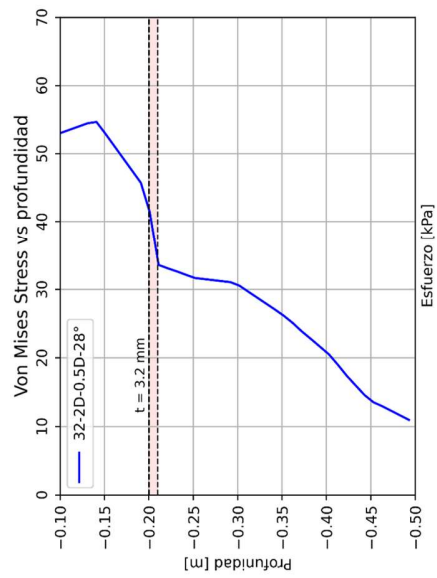
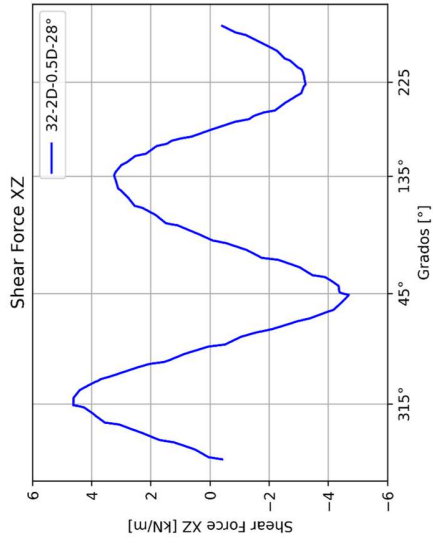
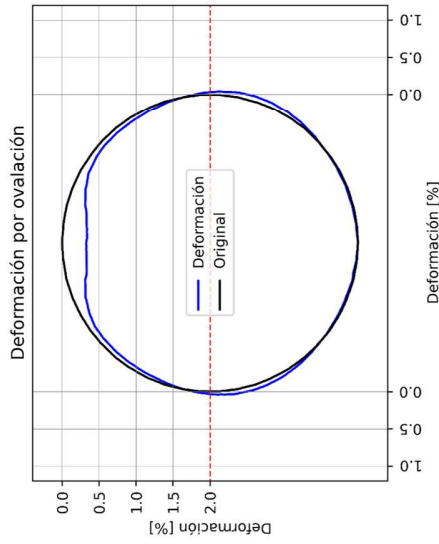
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Materia: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 32-2D-0.5D-36°

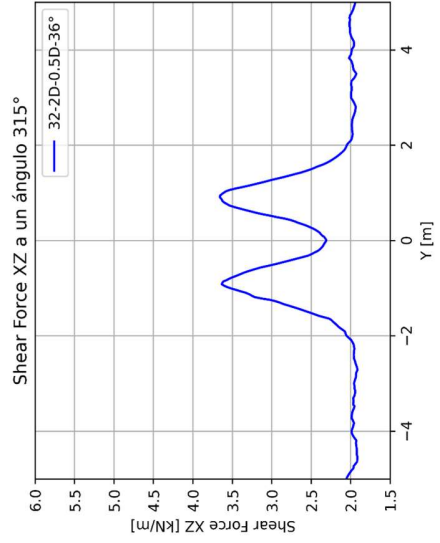
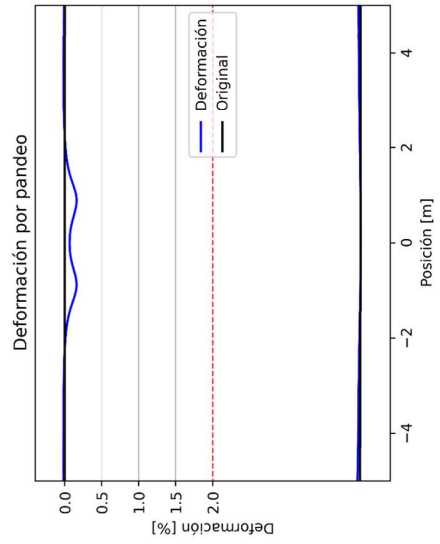
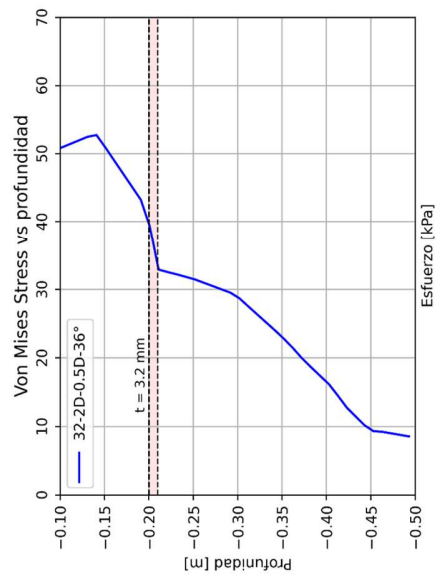
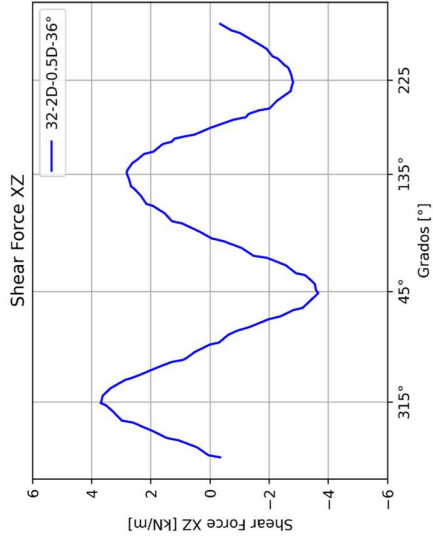
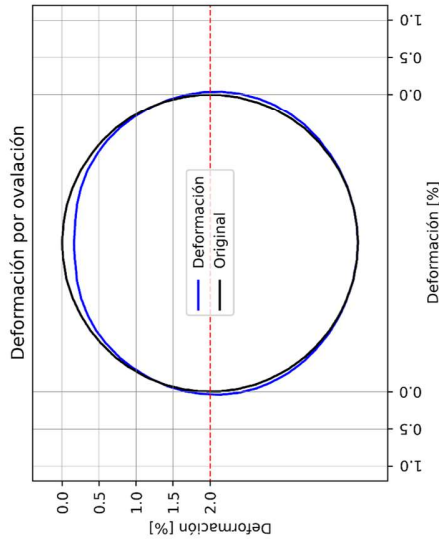
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 32-2D-0.5D-45°

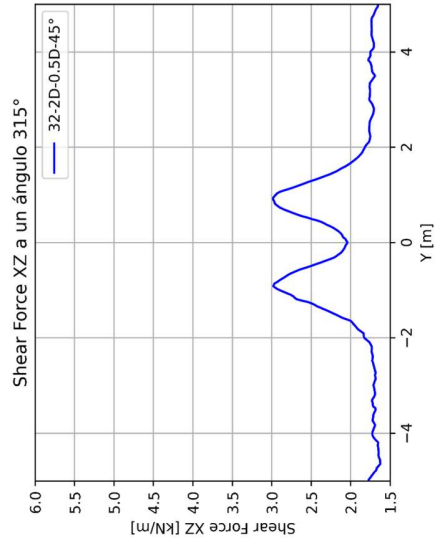
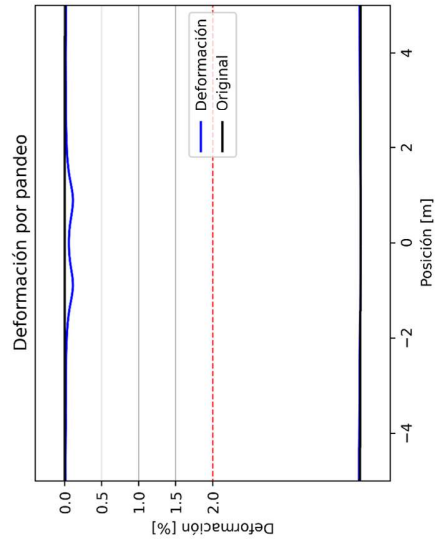
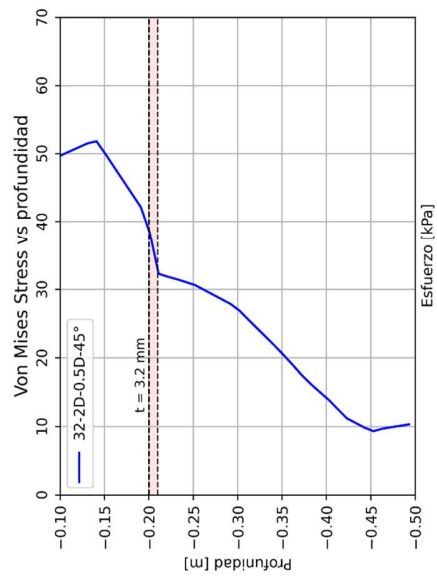
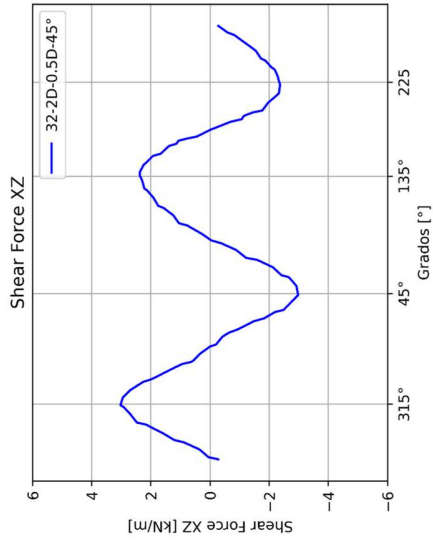
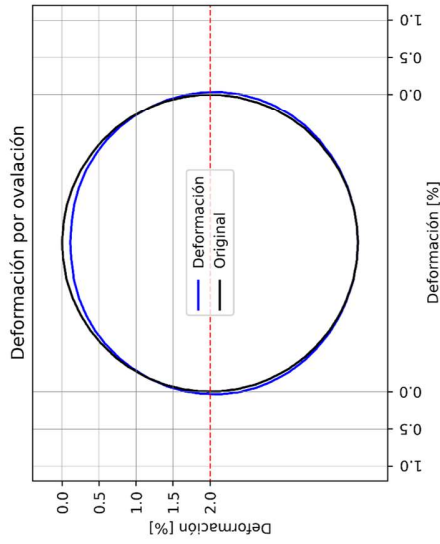
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 32-2D-1D-28°

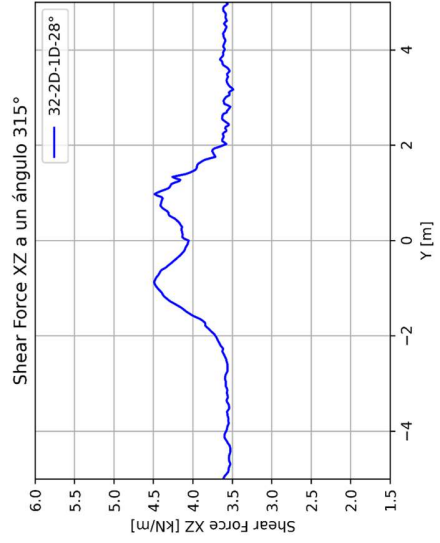
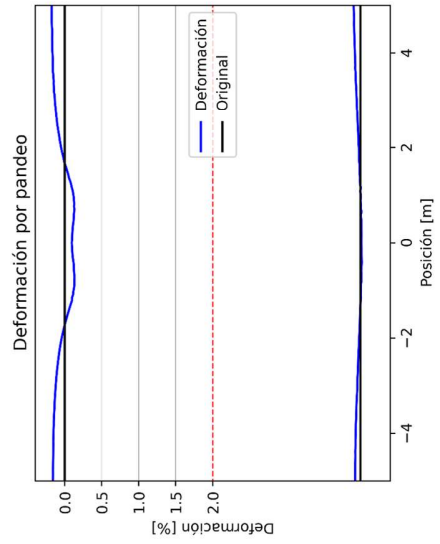
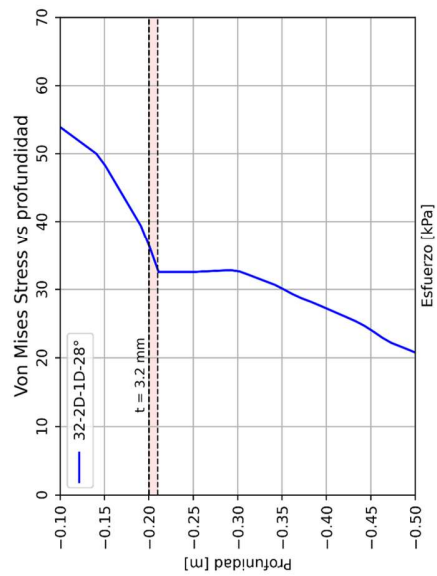
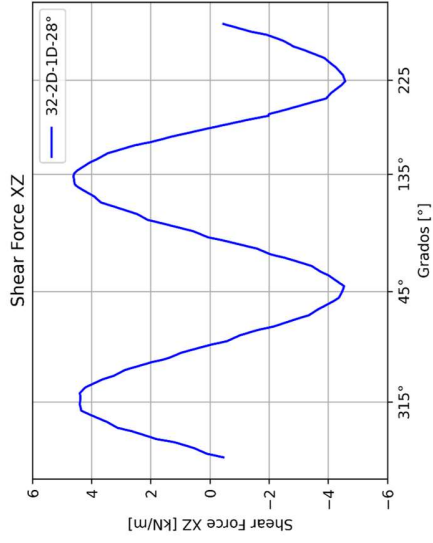
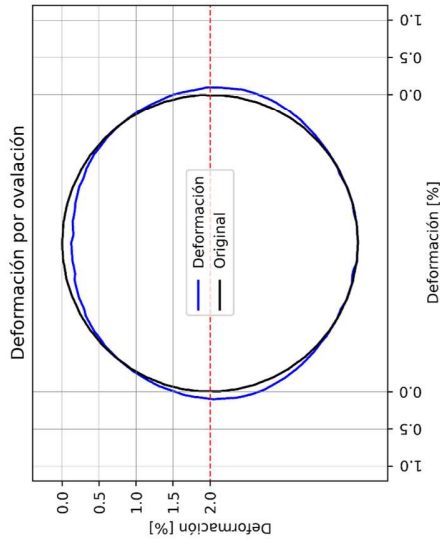
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Materia: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 32-2D-1D-36°

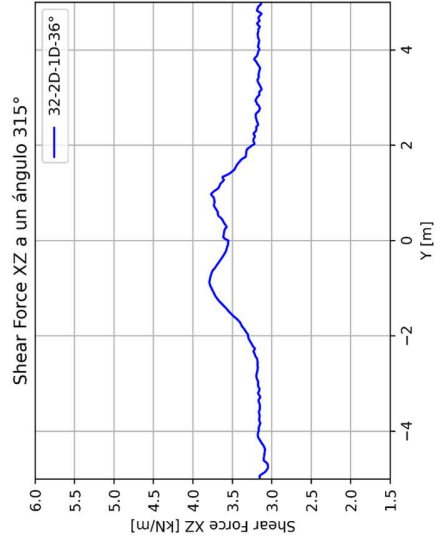
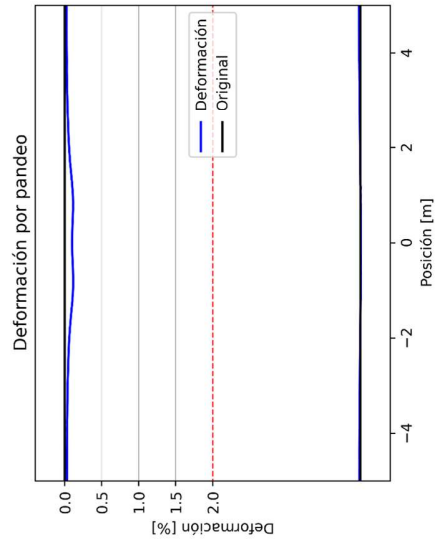
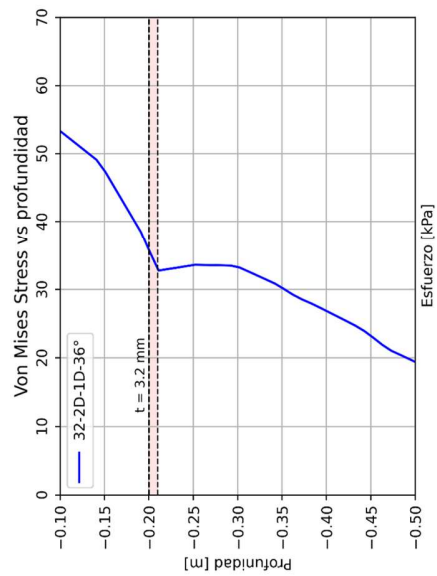
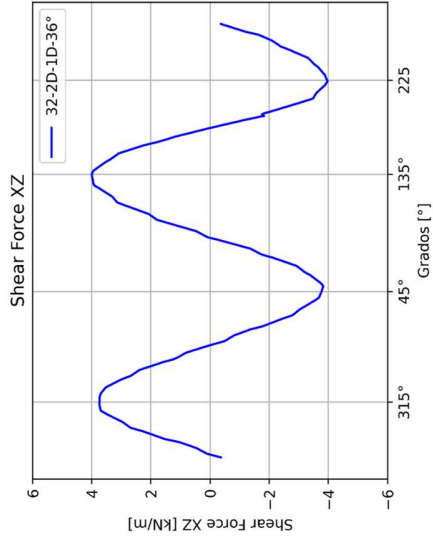
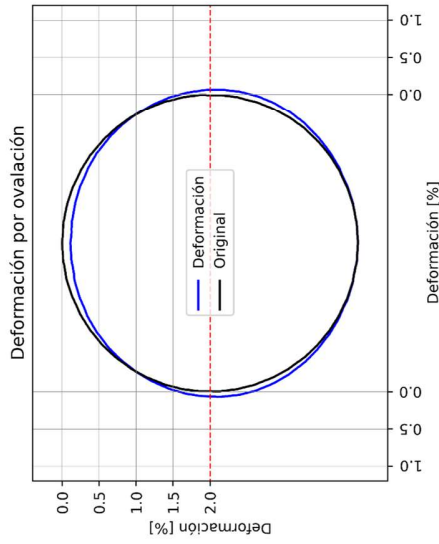
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 32-2D-1D-45°

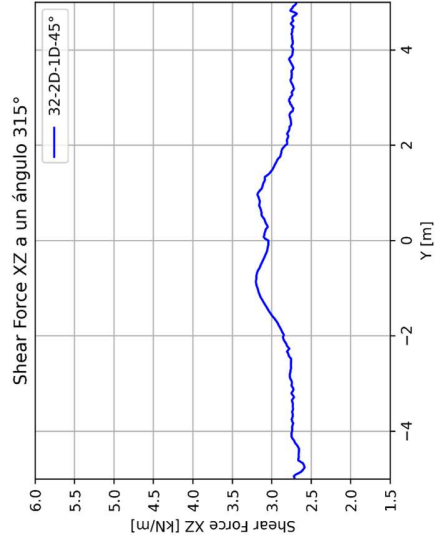
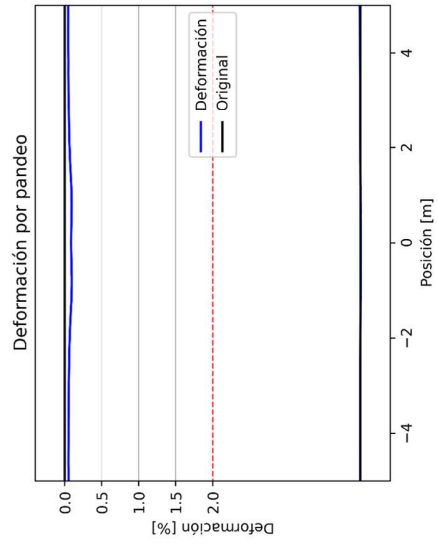
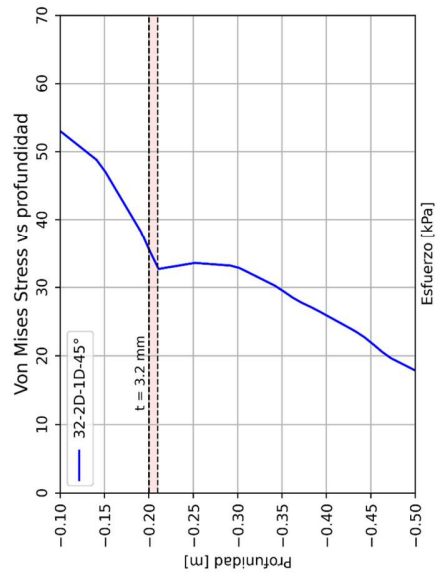
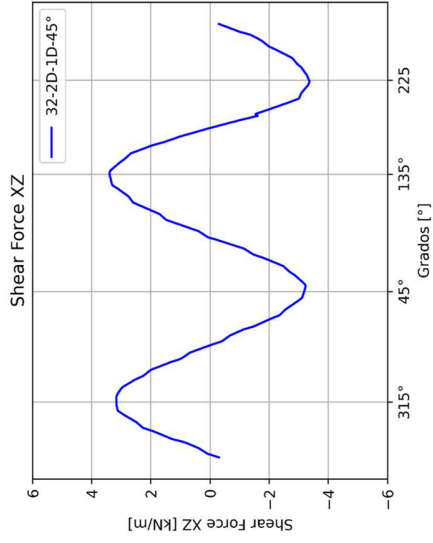
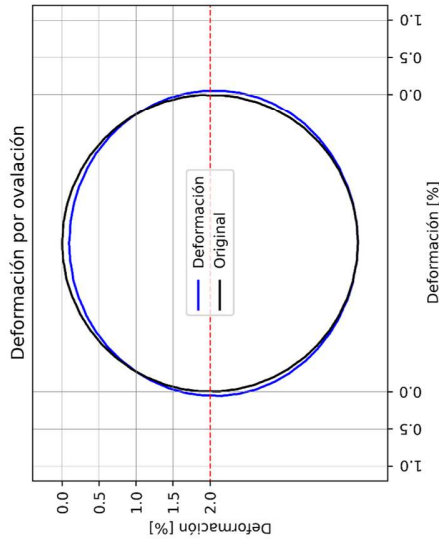
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

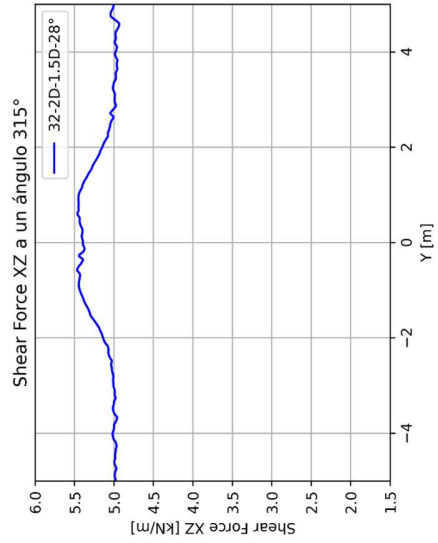
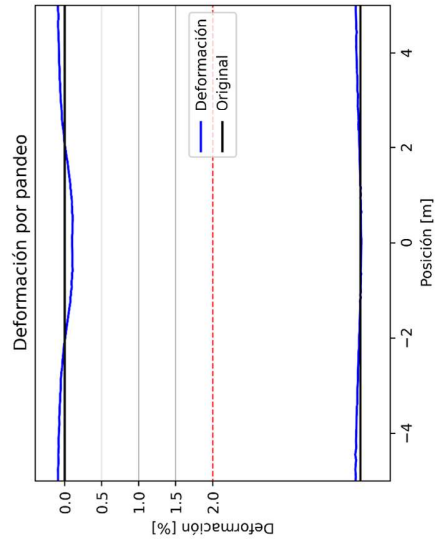
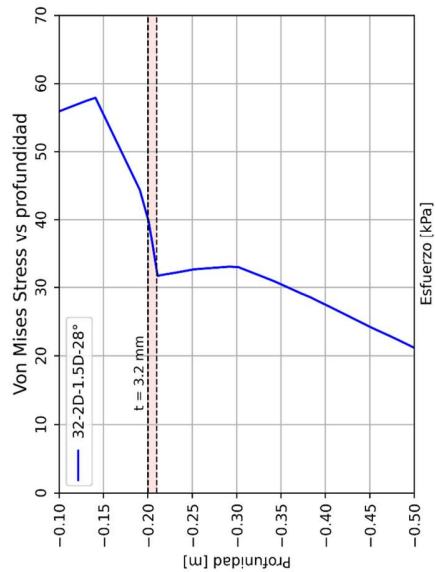
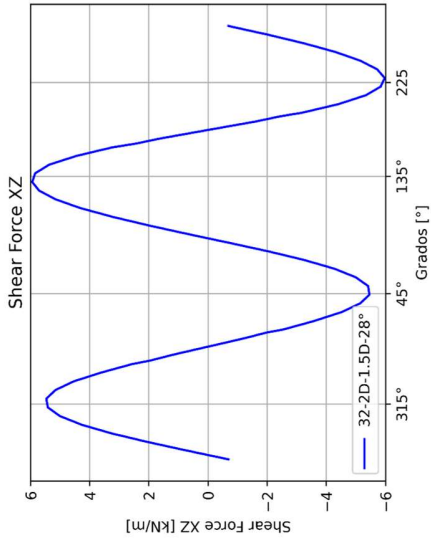
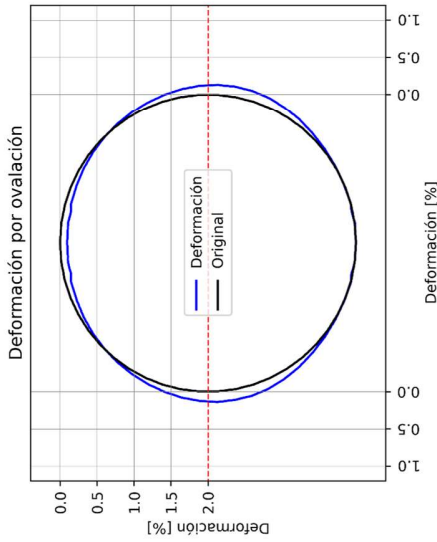
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 32-2D-1.5D-28°

Datos del modelo

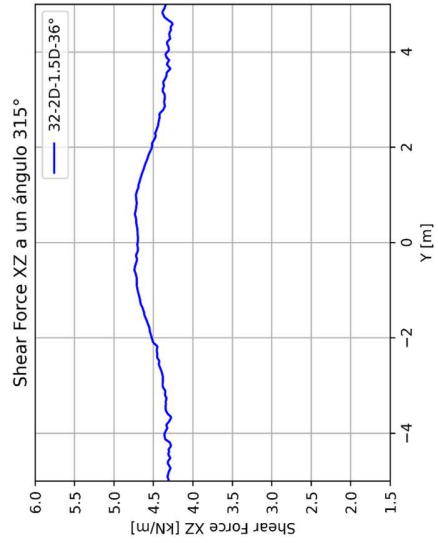
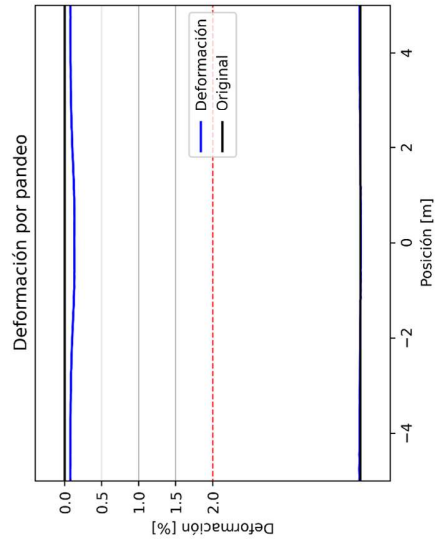
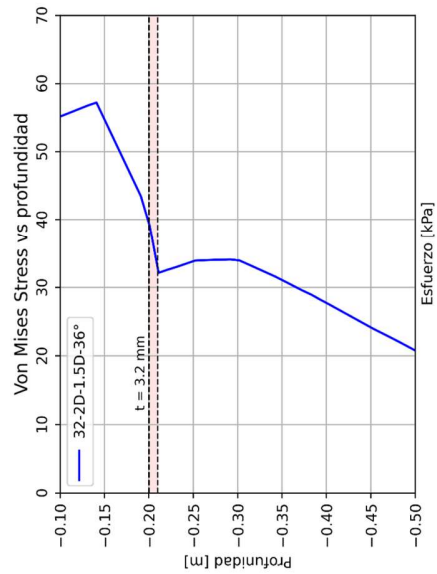
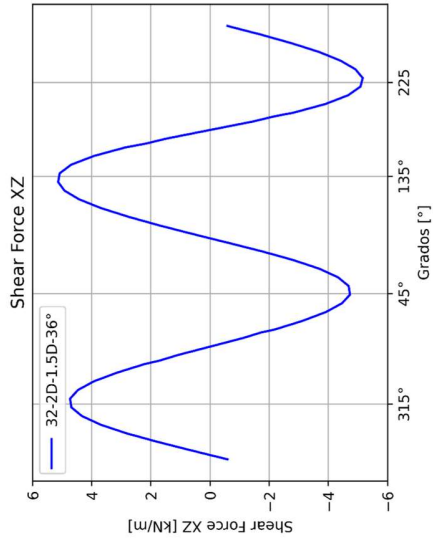
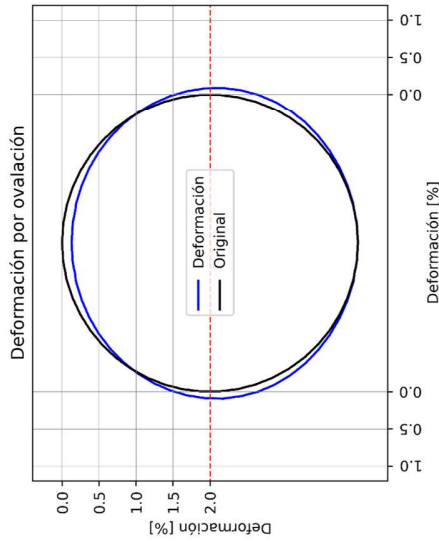
- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 3.2mm
- Ancho placa [D]: 2D
- Materia: Arena suelta
 - Peso unitario: 13 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa]: 5000
 - Angulo de fricción: 28°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa]: 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 32-2D-1.5D-36°

Datos del modelo

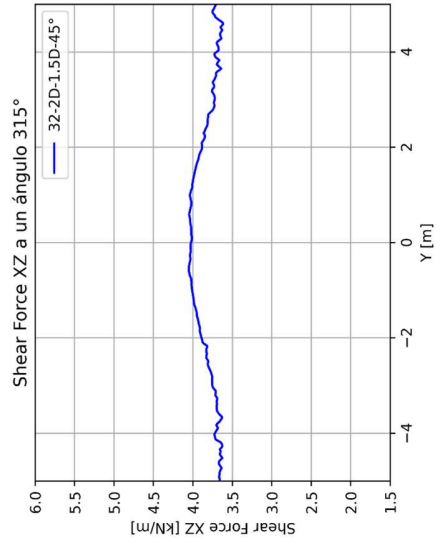
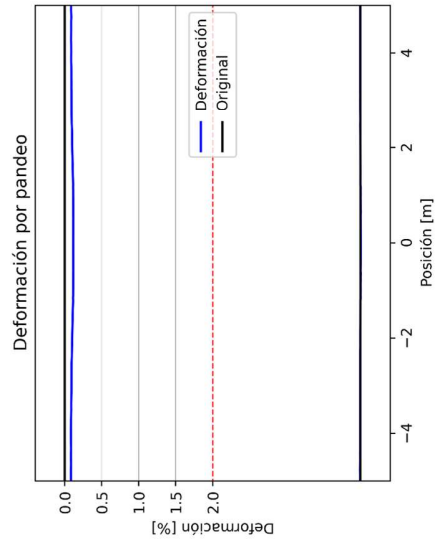
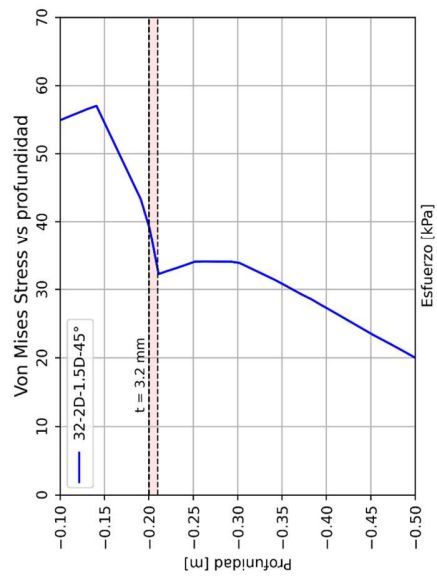
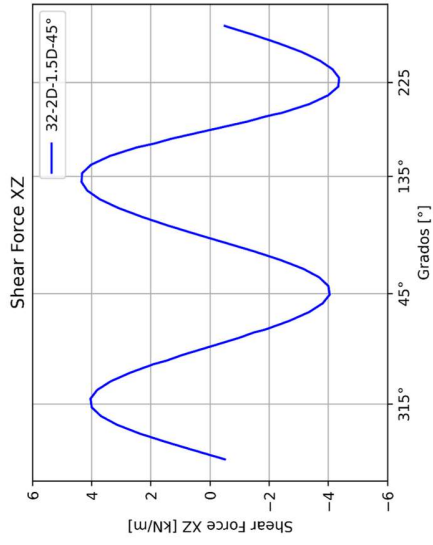
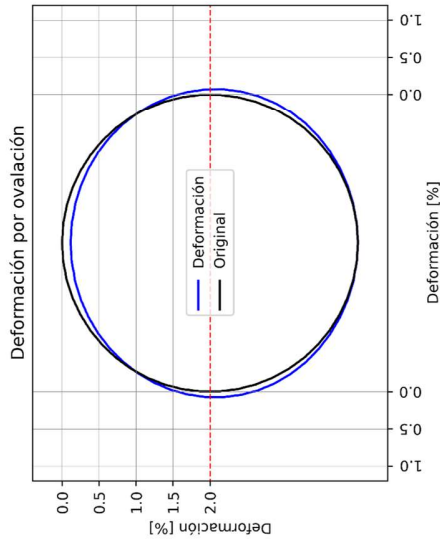
- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 3.2mm
- Ancho placa [D]: 2D
- Material: Arena media
- Peso unitario: 16 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa]: 20000
- Ángulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa]: 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 32-2D-1.5D-45°

Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 3.2mm
 Ancho placa [D]: 2D
 Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 254-1D-0.5D-28°

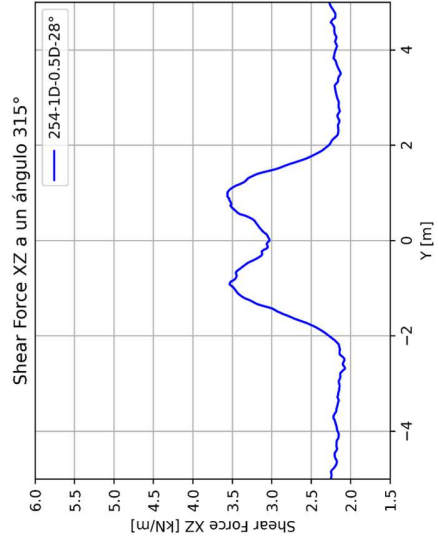
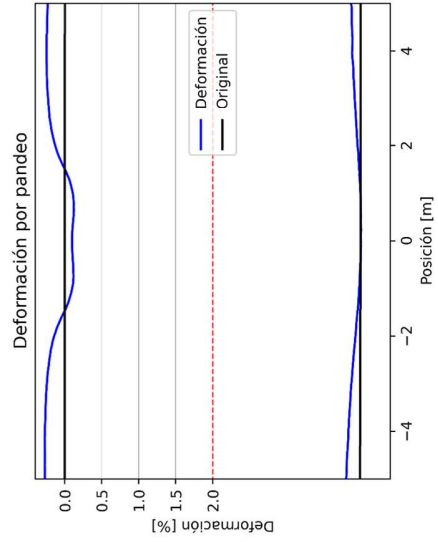
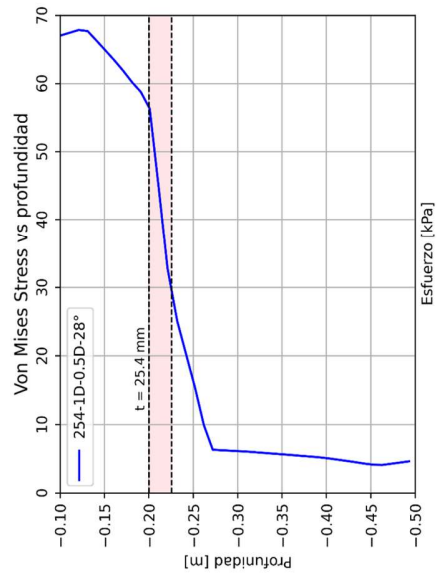
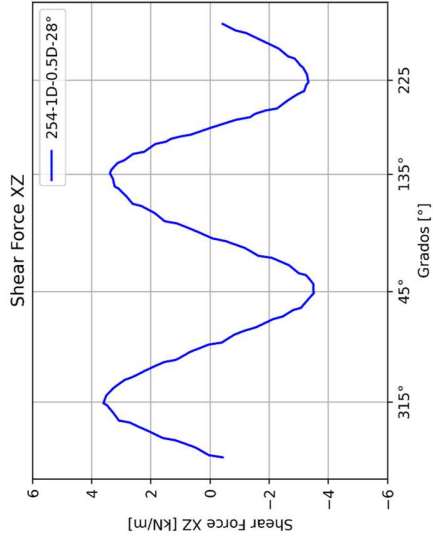
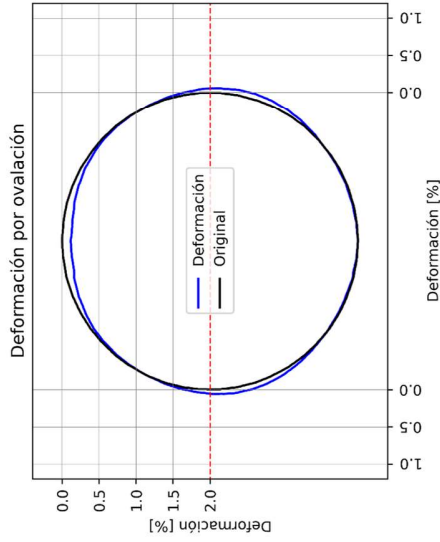
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa] : 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa] : 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

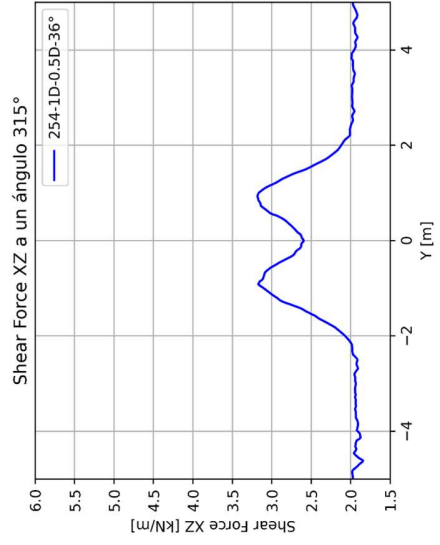
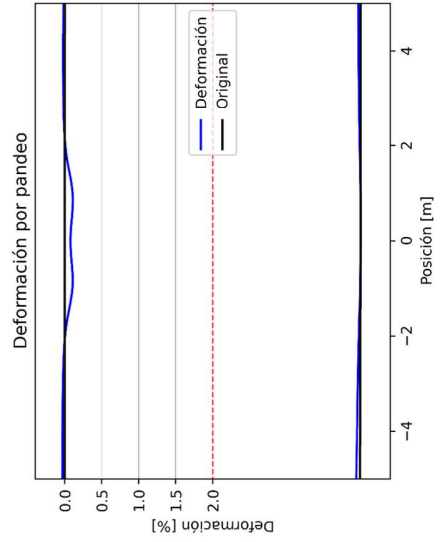
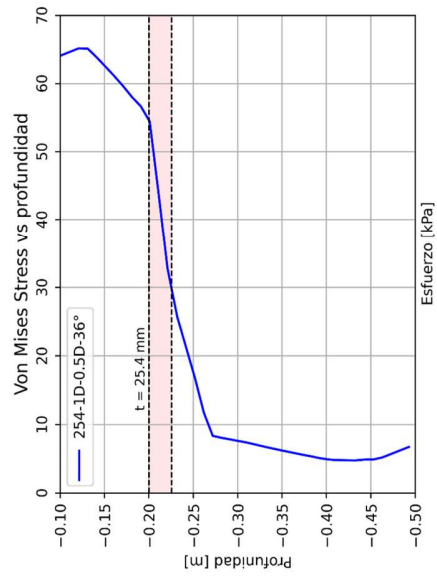
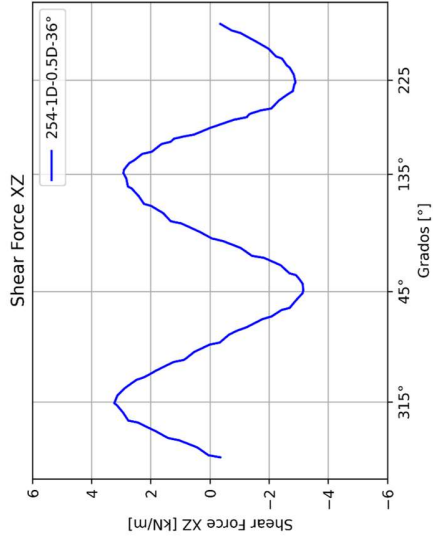
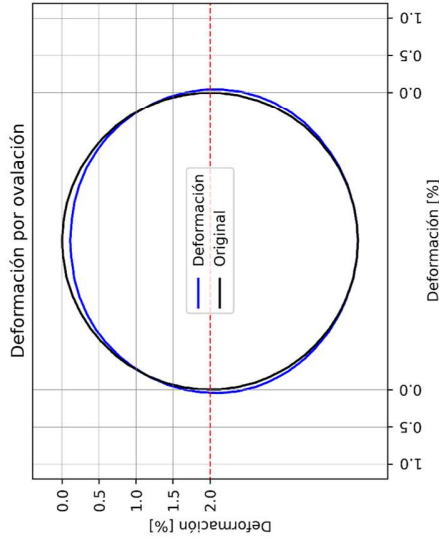
Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 254-1D-0.5D-36°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 25.4mm
- Ancho placa [D]: 1D
- Material: Arena media
- Peso unitario: 16 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa]: 20000
- Ángulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa]: 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 254-1D-0.5D-45°

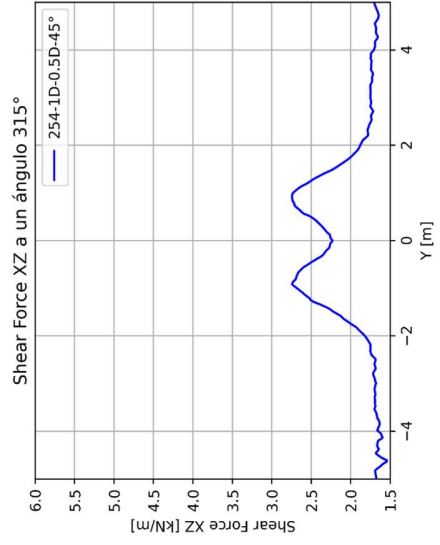
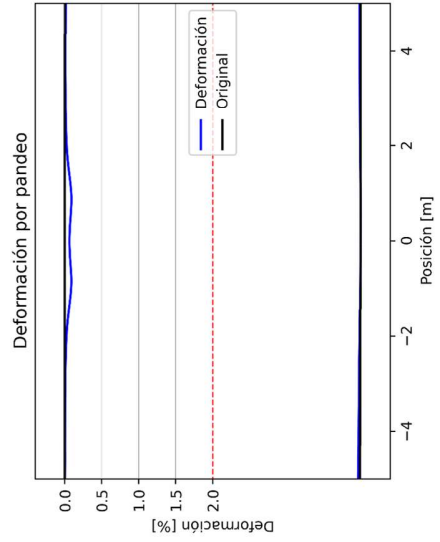
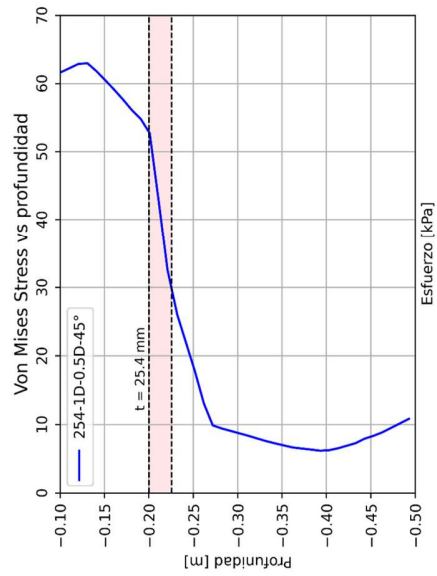
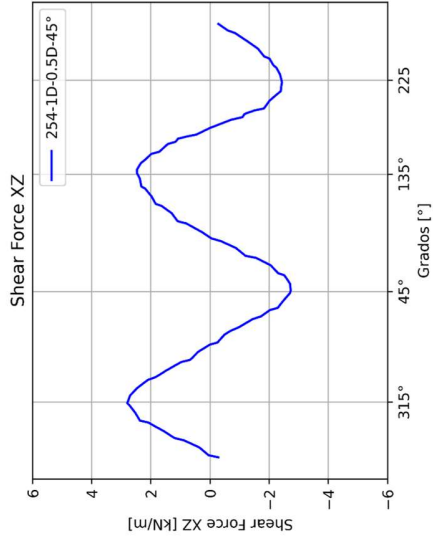
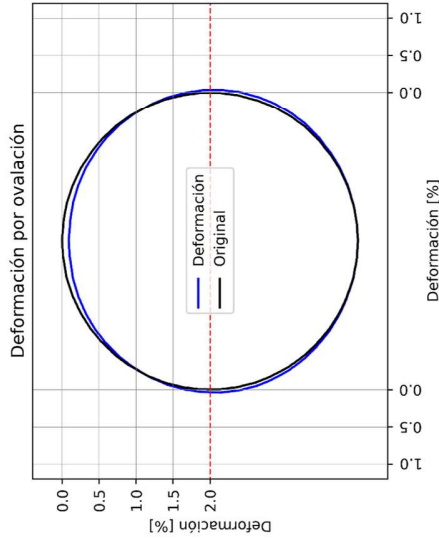
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 254-1D-1D-28°

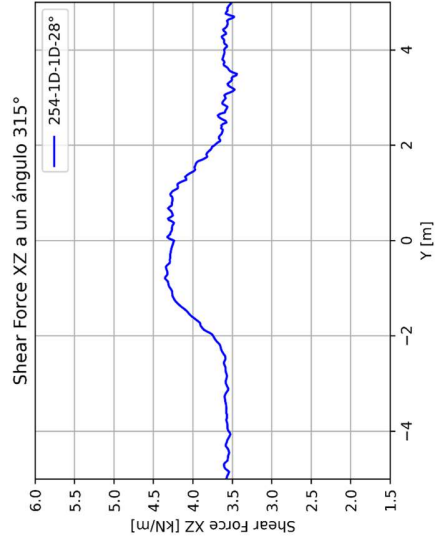
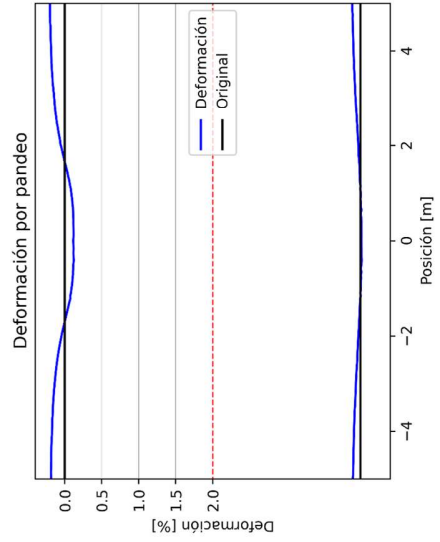
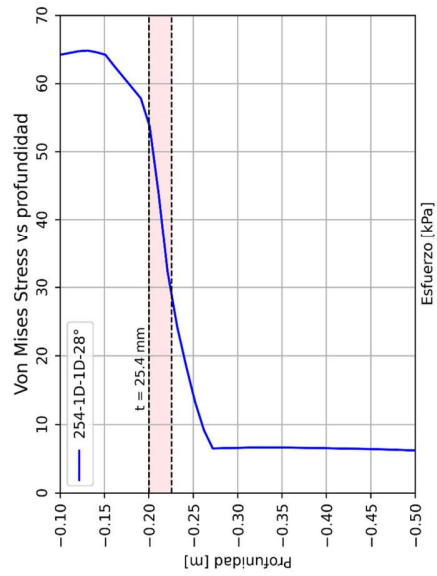
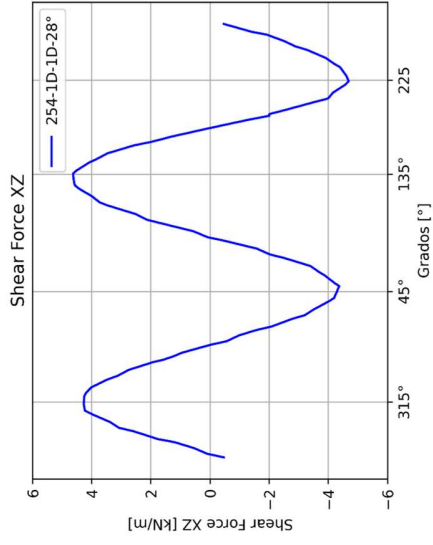
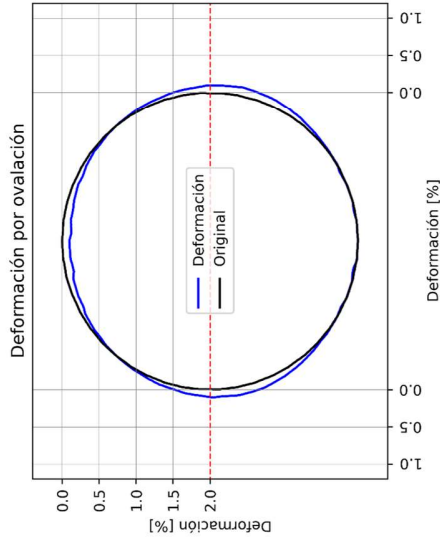
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Ángulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 254-1D-1D-36°

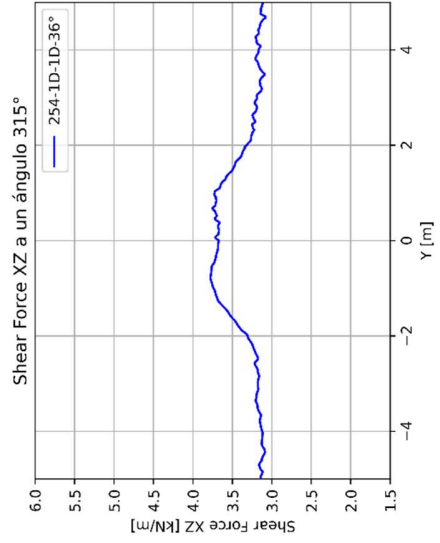
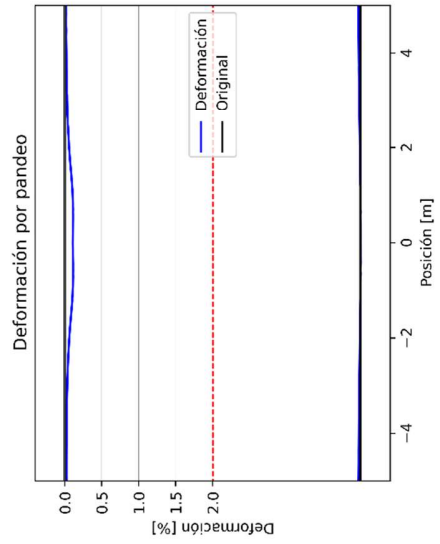
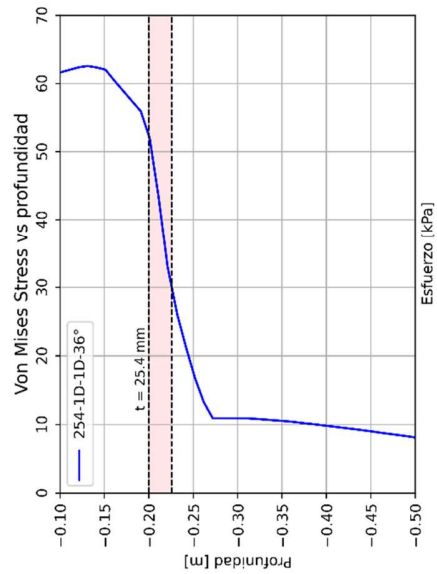
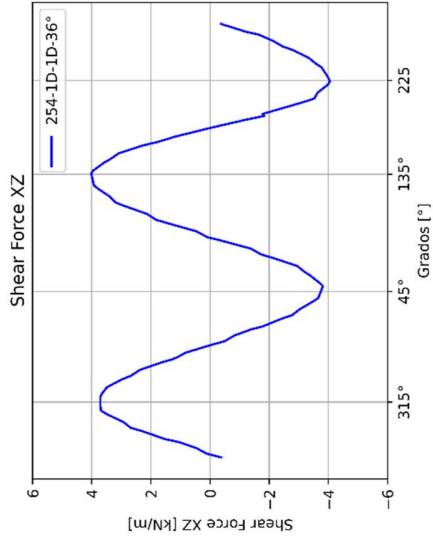
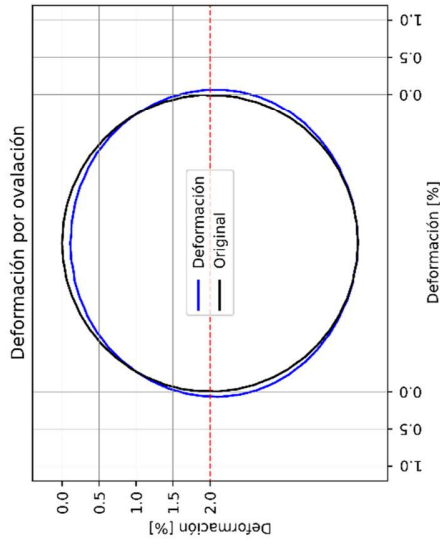
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

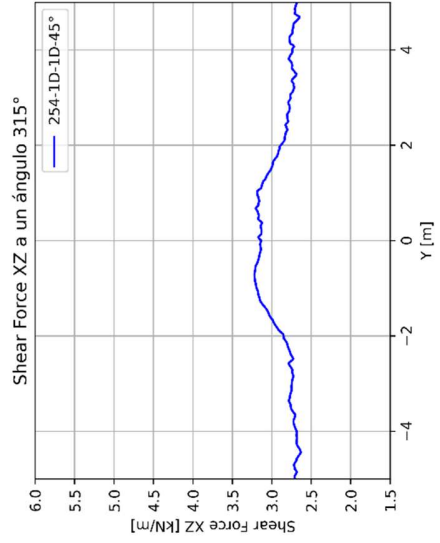
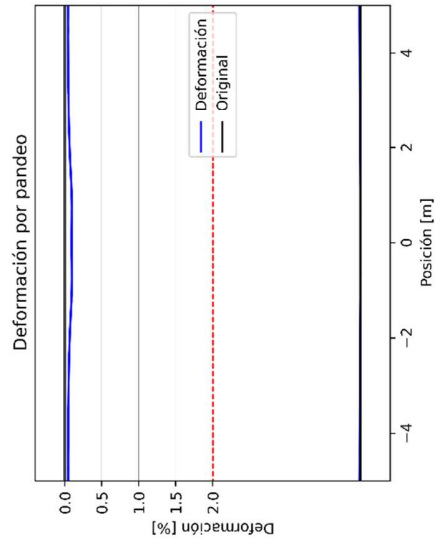
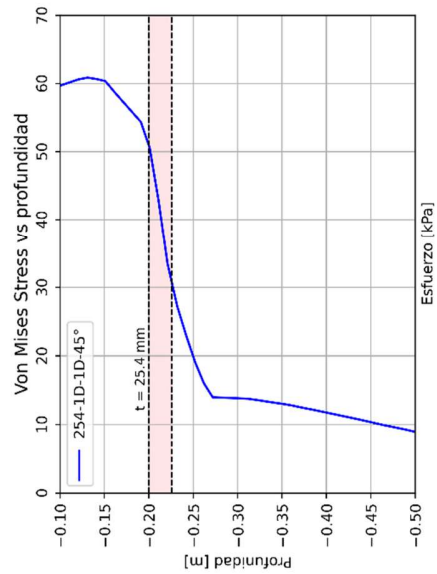
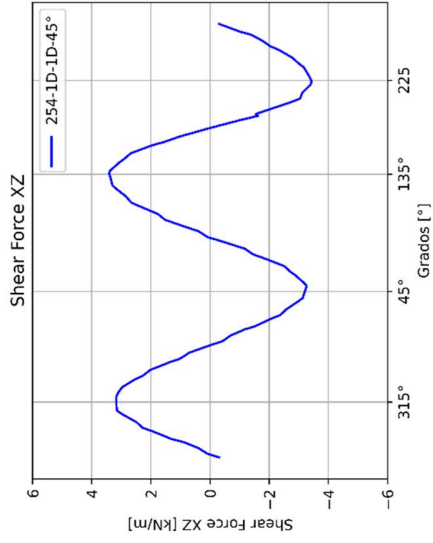
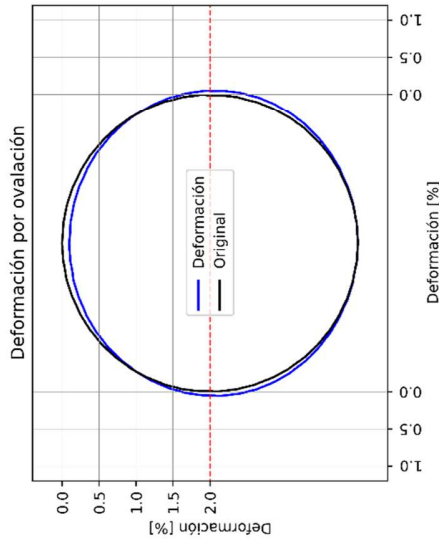
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 254-1D-1D-45°

Datos del modelo

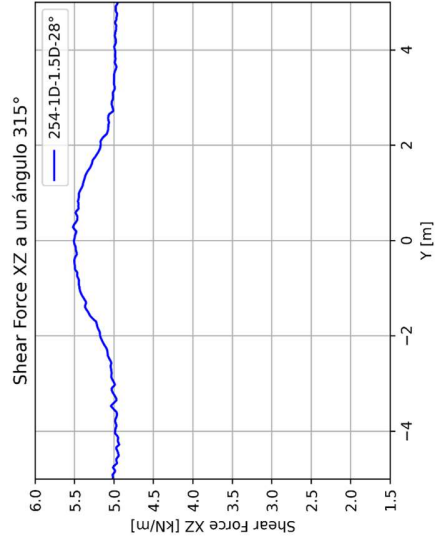
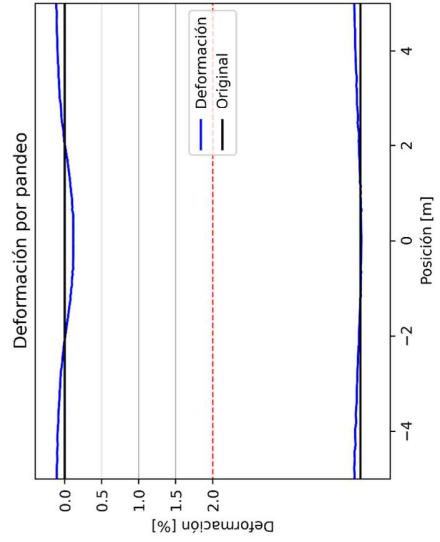
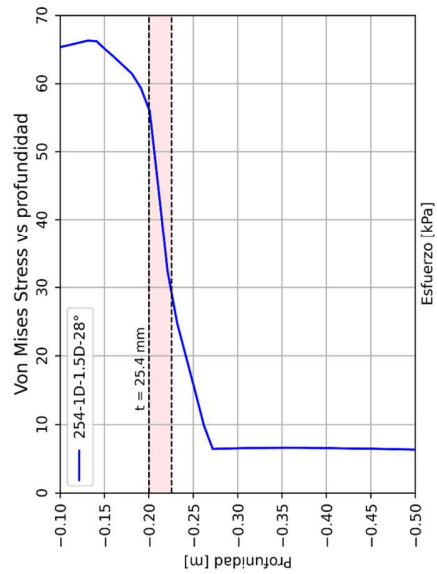
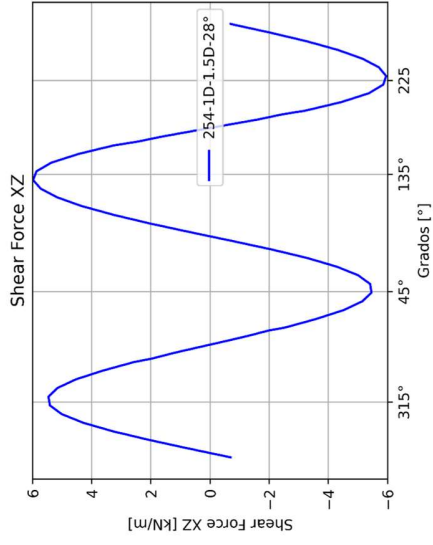
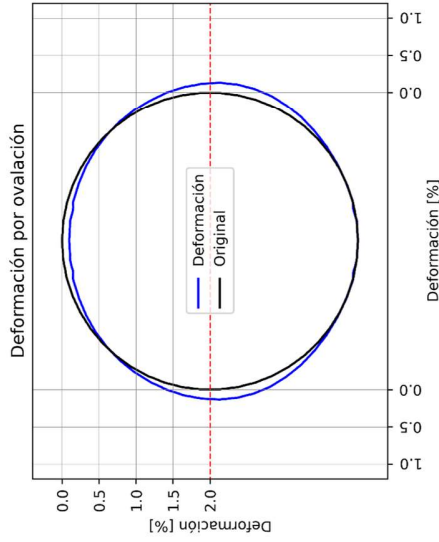
Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1D
 Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Ángulo de fricción: 45°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 1D



MODELO: 254-1D-1.5D-28°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 25.4mm
- Ancho placa [D]: 1D
- Material: Arena suelta
 - Peso unitario: 13 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa] : 5000
 - Angulo de fricción: 28°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa] : 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 254-1D-1.5D-36°

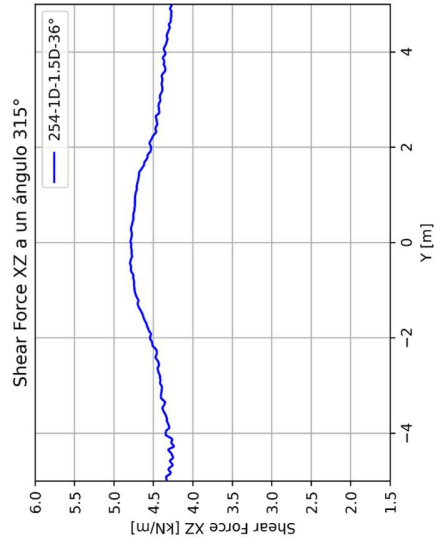
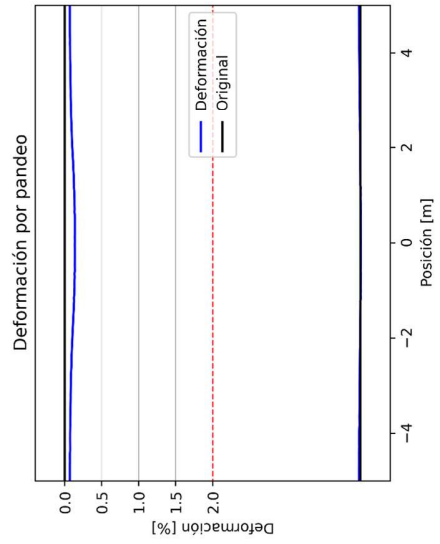
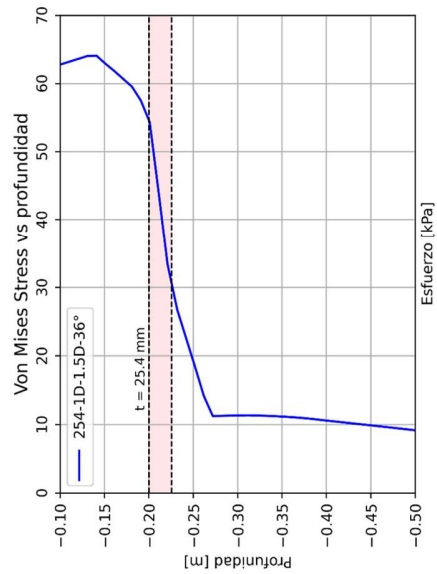
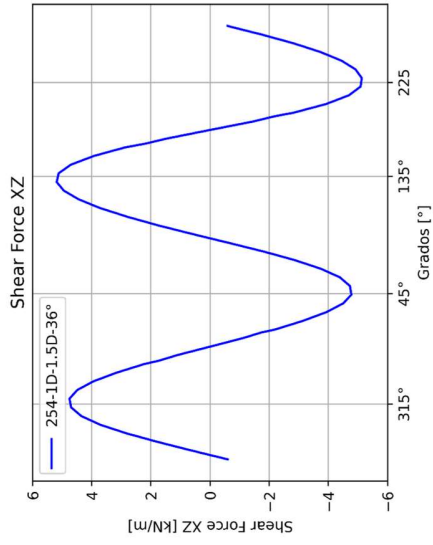
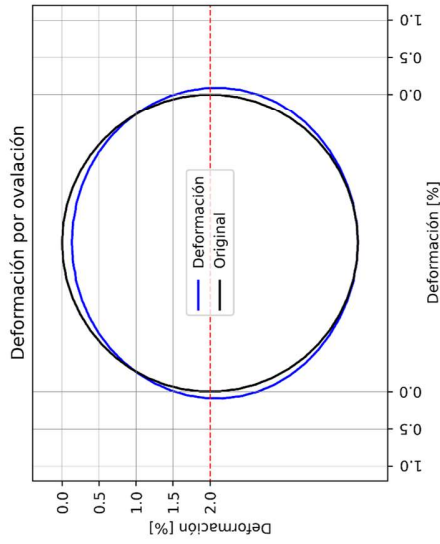
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa] : 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa] : 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 254-1D-1.5D-45°

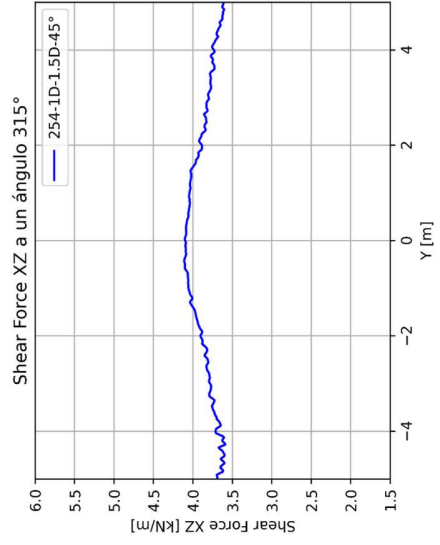
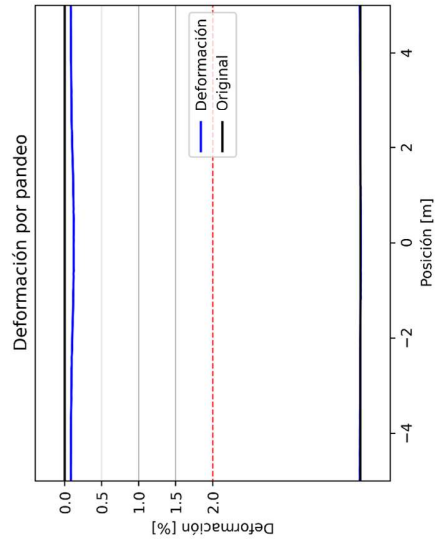
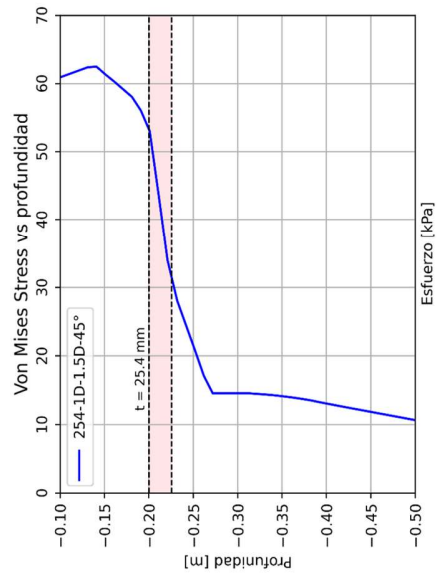
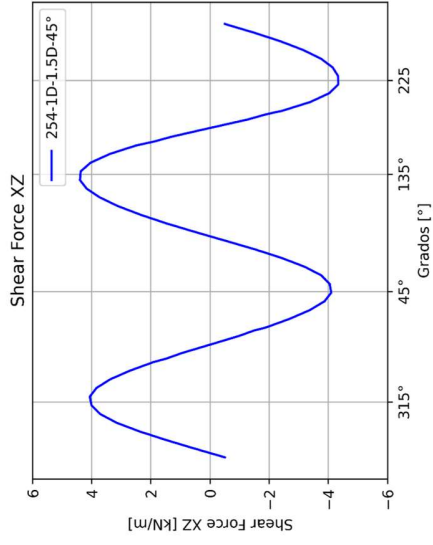
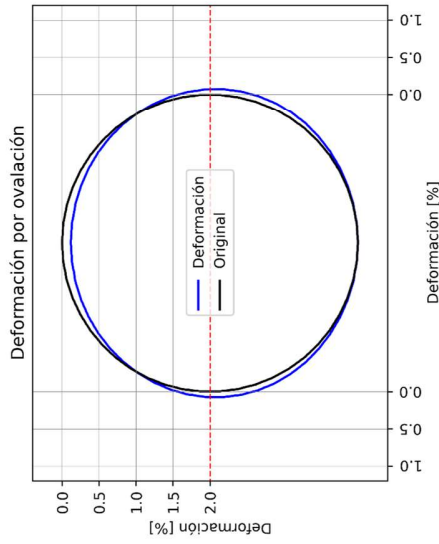
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

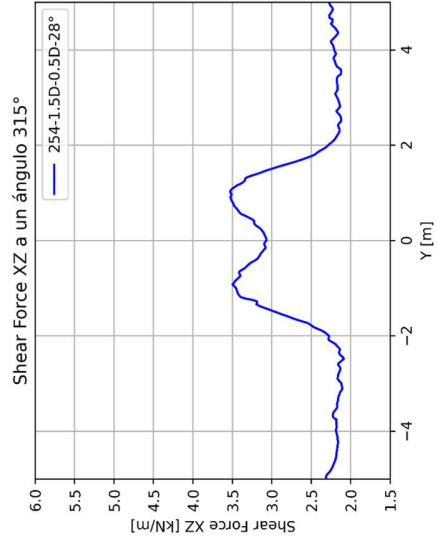
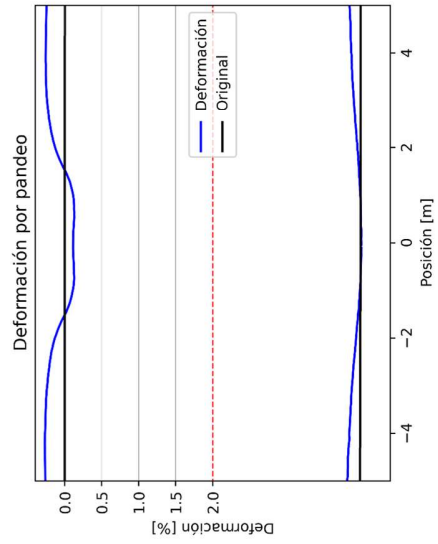
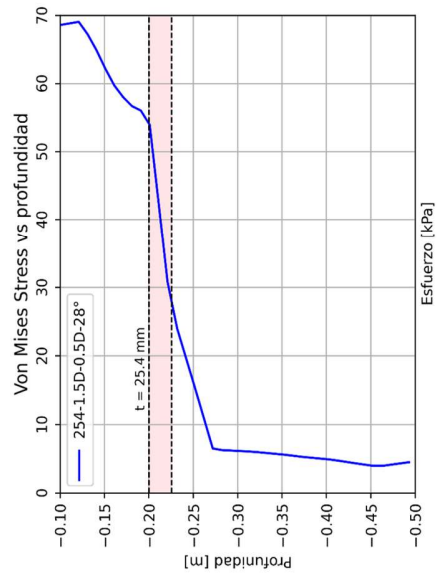
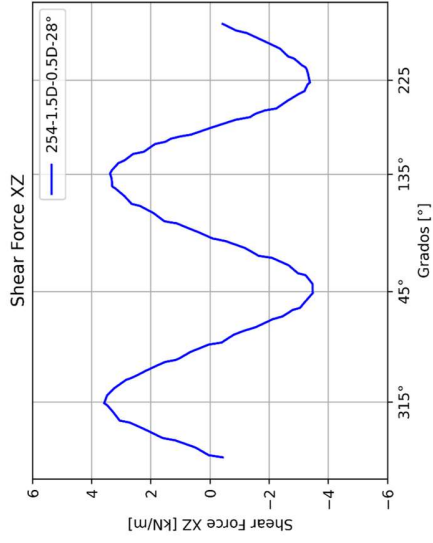
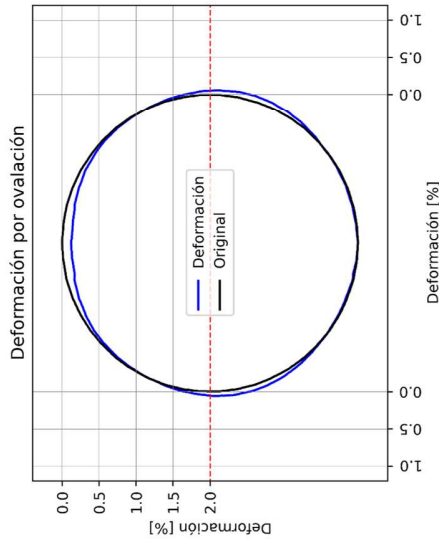
Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 254-1.5D-0.5D-28°

Datos del modelo

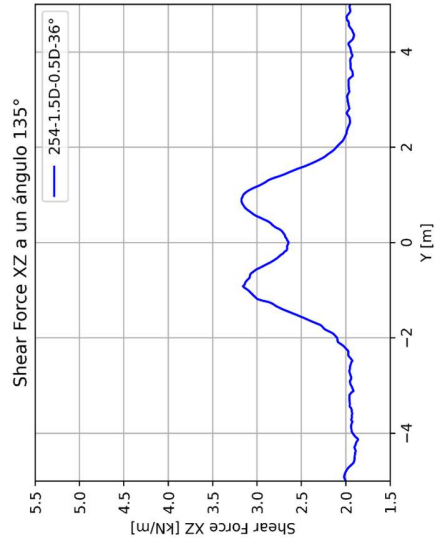
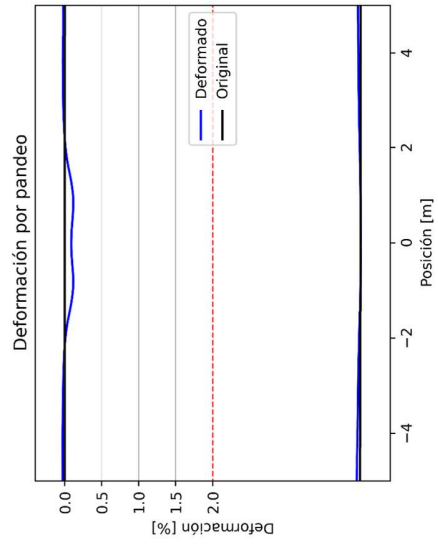
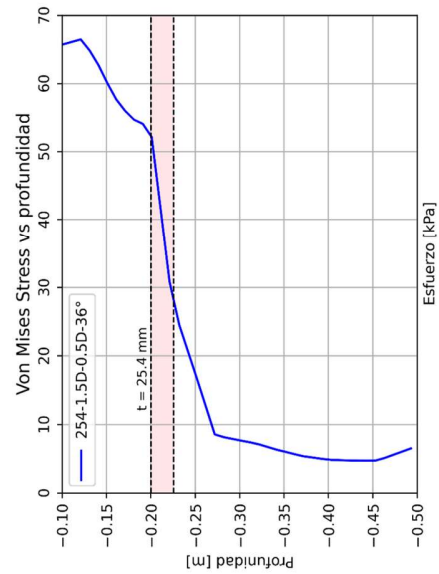
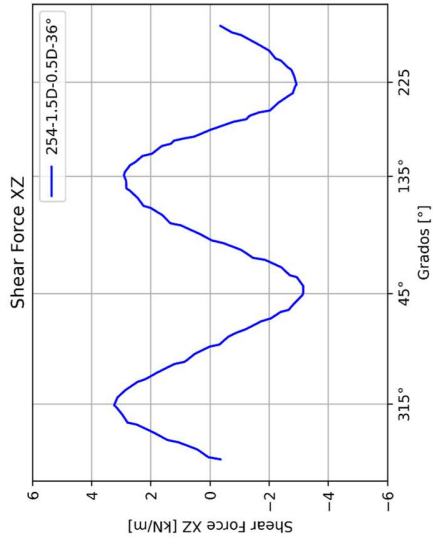
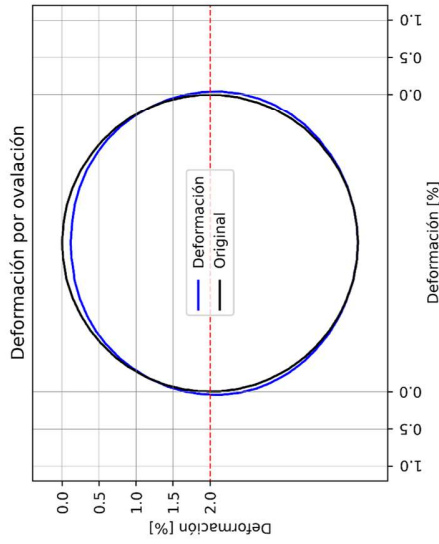
Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1.5D
 Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 254-1.5D-0.5D-36°

Datos del modelo

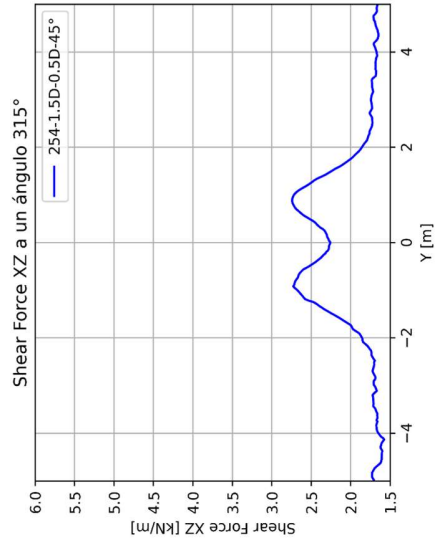
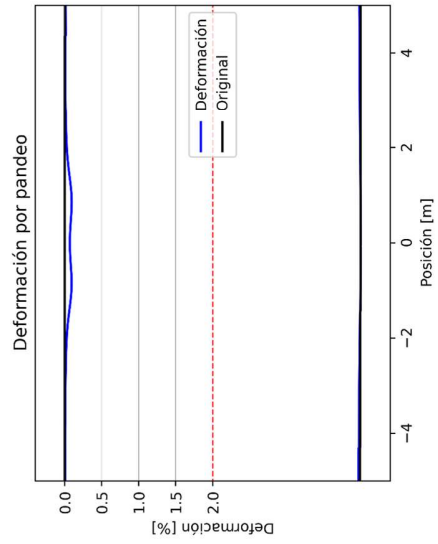
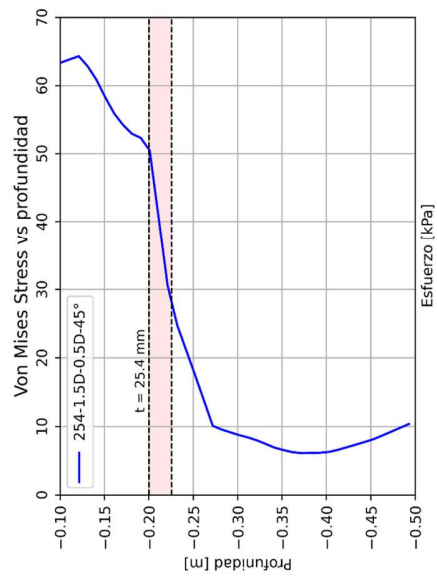
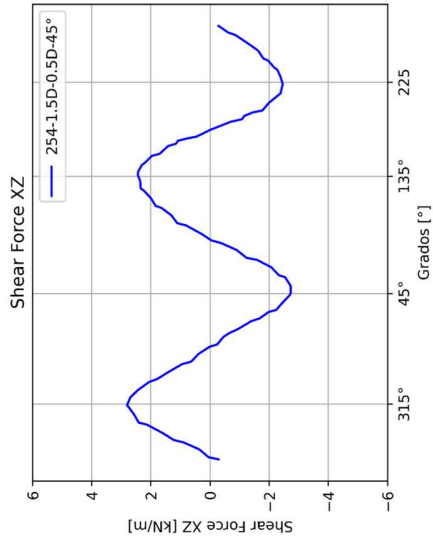
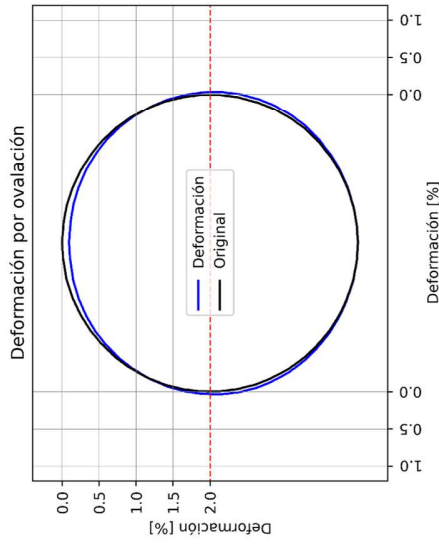
Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1.5D
 Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa] : 20000
 Angulo de fricción: 36°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa] : 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 254-1.5D-0.5D-45°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 25.4mm
- Ancho placa [D]: 1.5D
- Material: Arena densa
- Peso unitario: 19 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa]: 40000
- Ángulo de fricción: 45°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa]: 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 254-1.5D-1D-28°

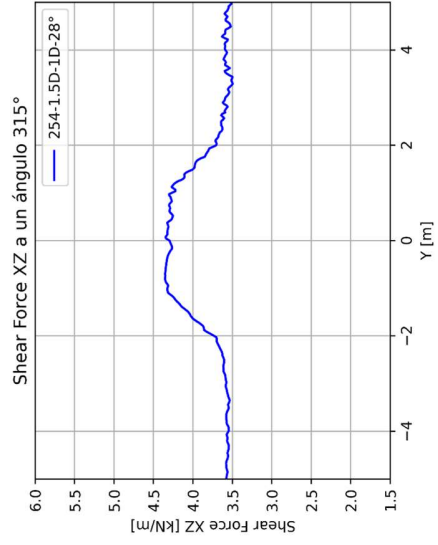
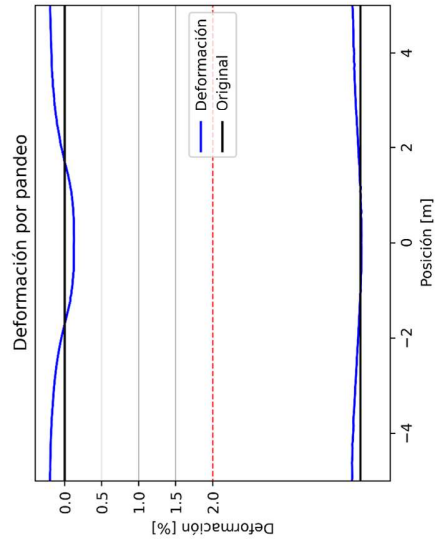
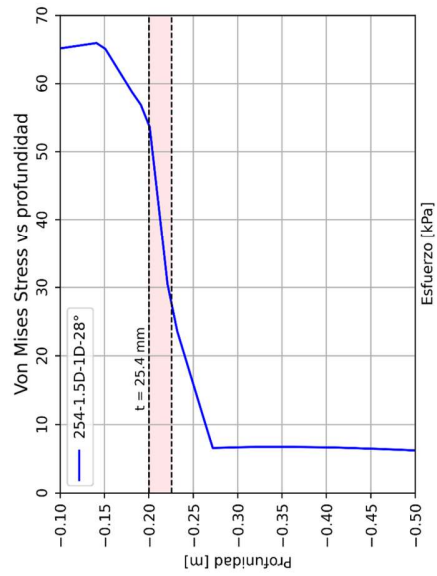
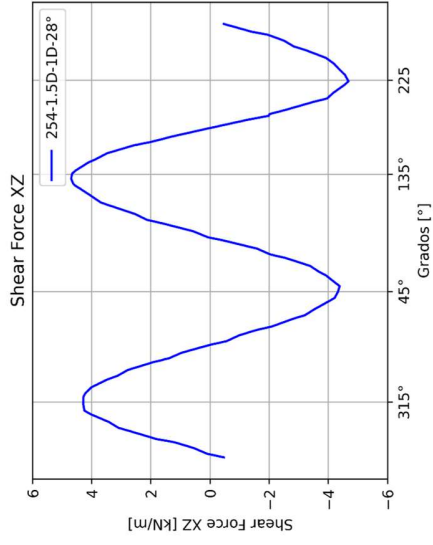
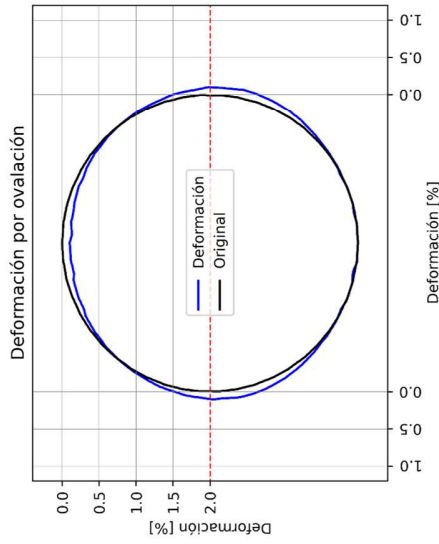
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Materia: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa] : 5000
 Ángulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa] : 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

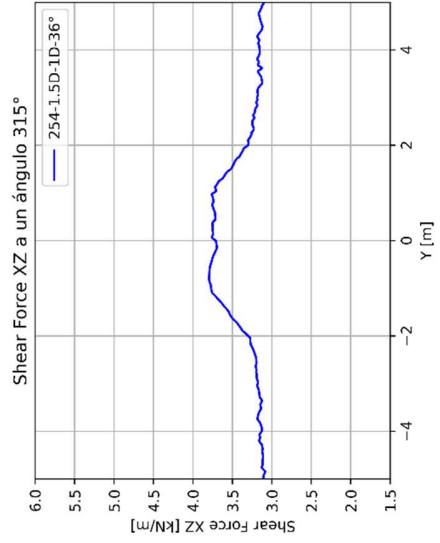
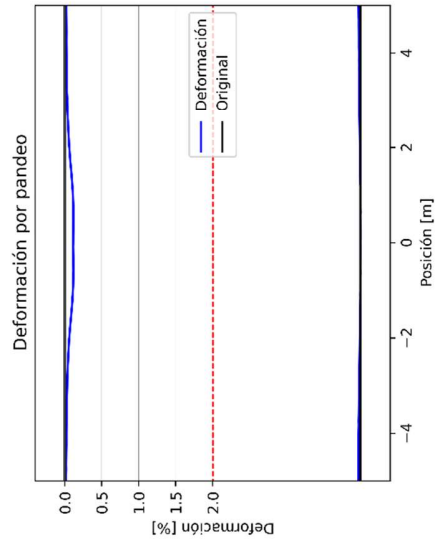
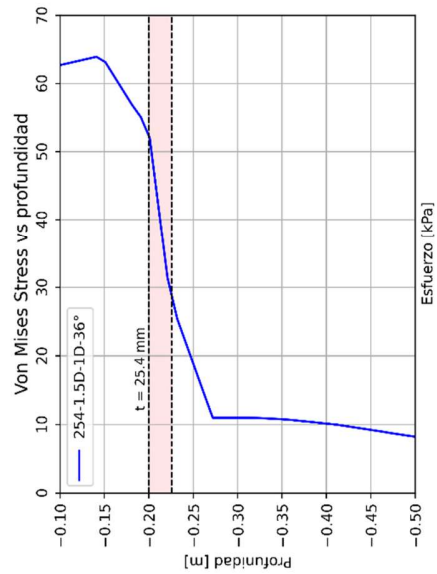
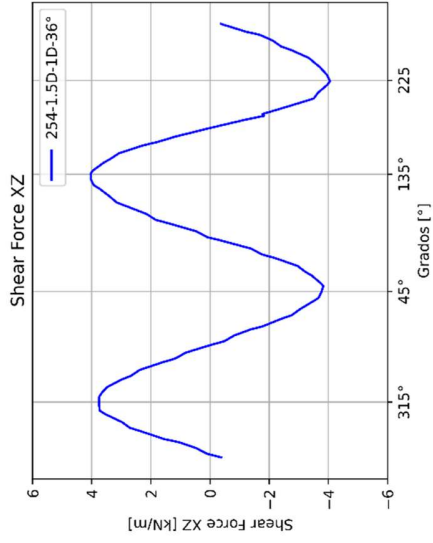
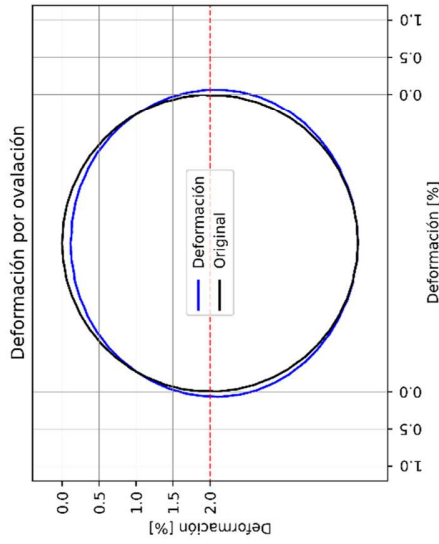
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 254-1.5D-1D-36°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 25.4mm
- Ancho placa [D]: 1.5D
- Material: Arena media
- Peso unitario: 16 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa]: 20000
- Angulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa]: 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1D



MODELO: 254-1.5D-1D-45°

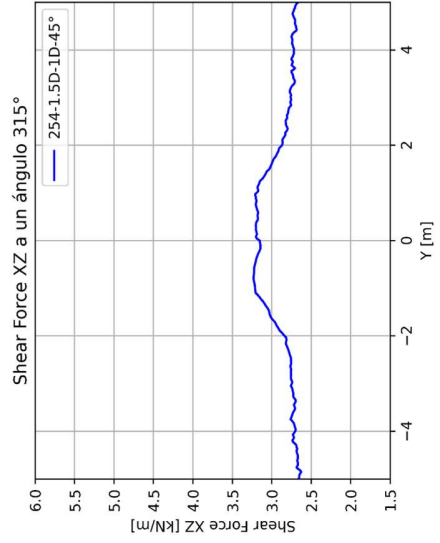
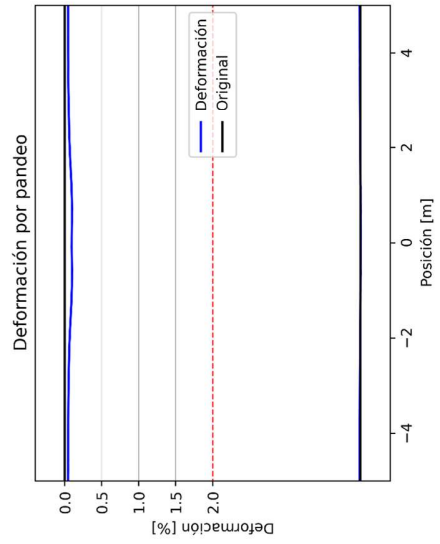
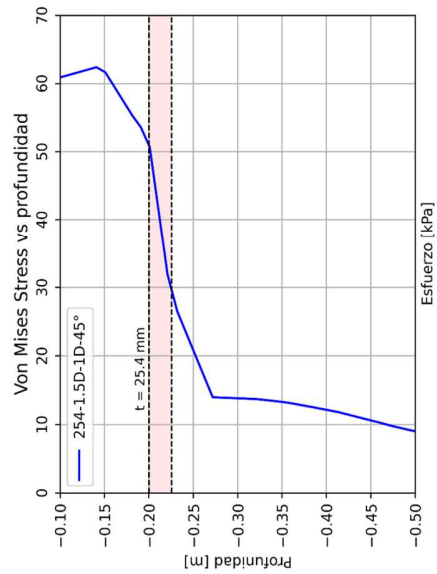
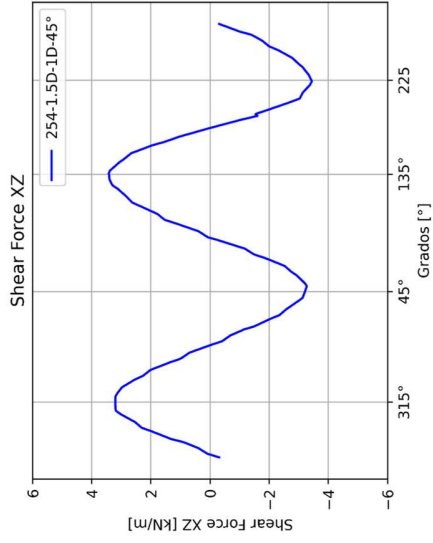
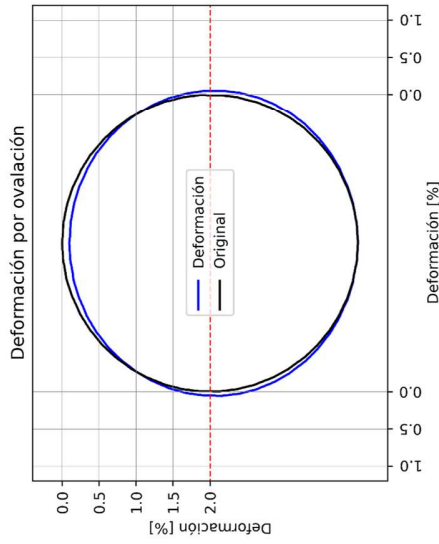
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

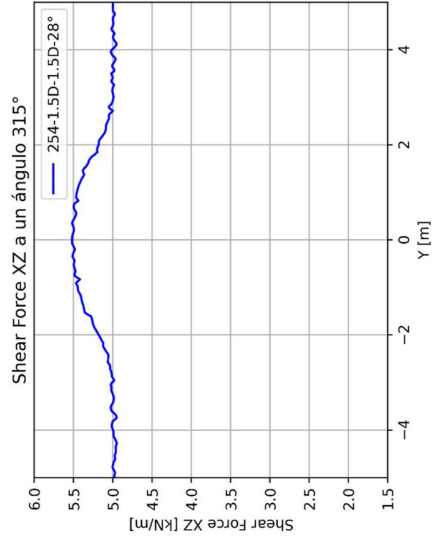
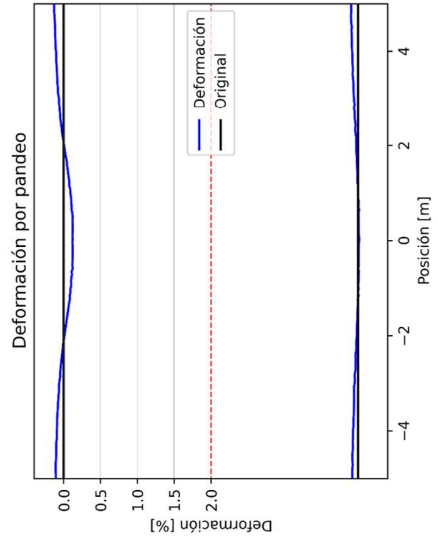
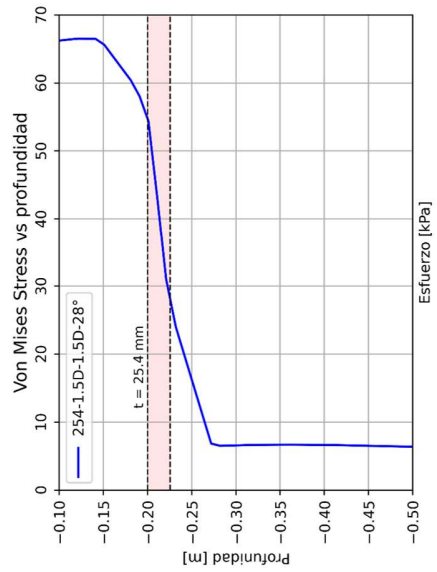
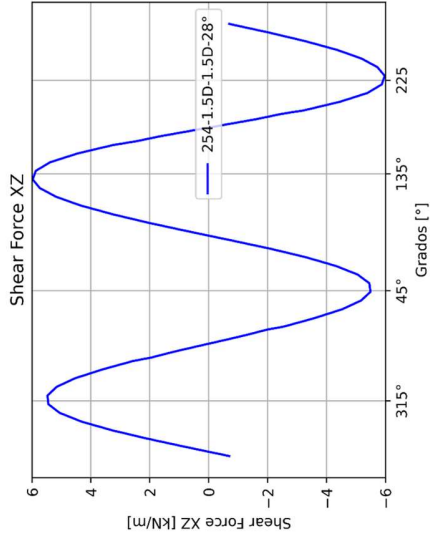
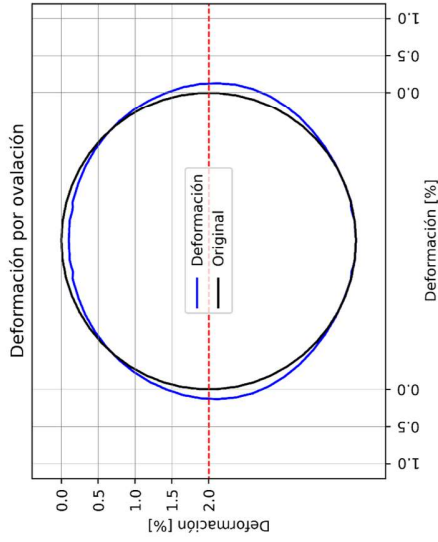
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 254-1.5D-1.5D-28°

Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1.5D
 Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Ángulo de fricción: 28°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 254-1.5D-1.5D-36°

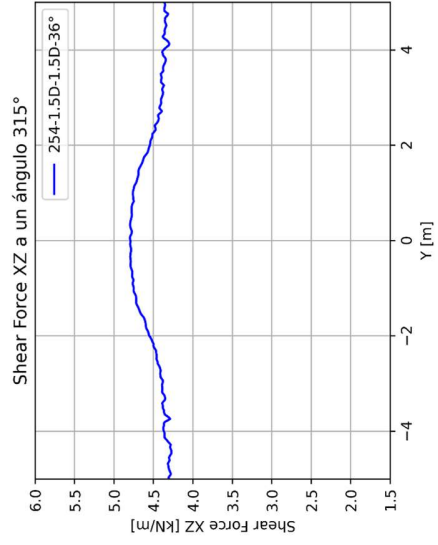
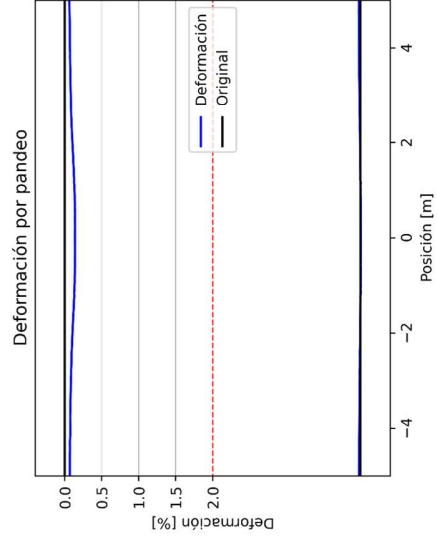
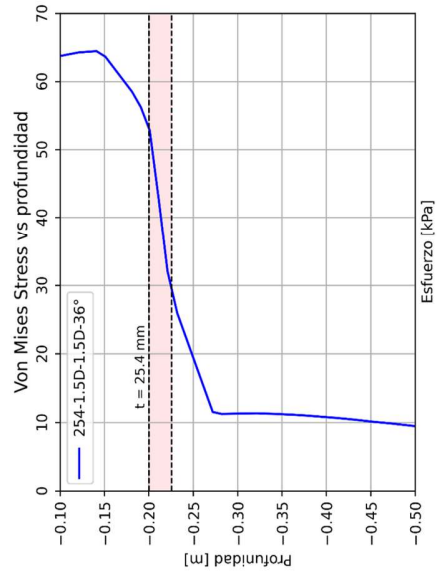
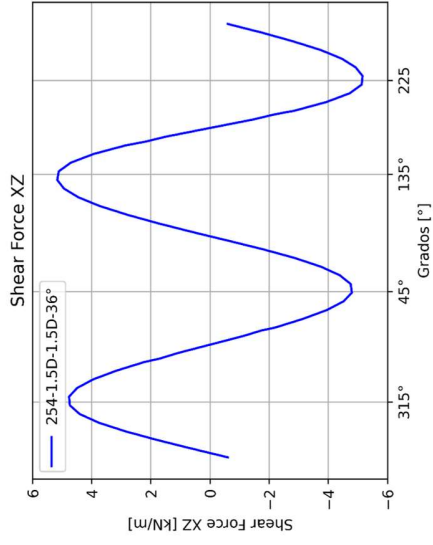
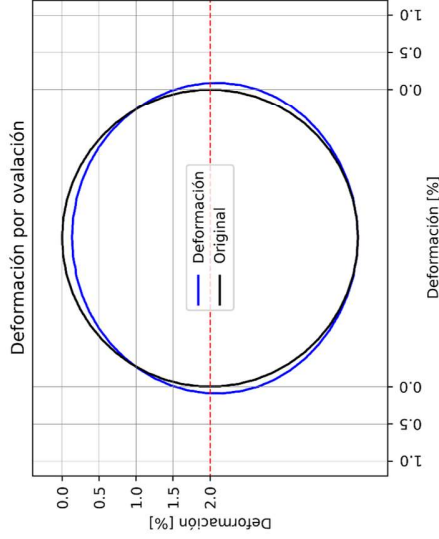
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 254-1.5D-1.5D-45°

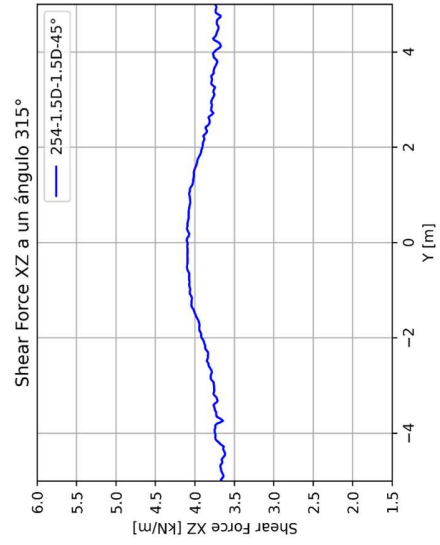
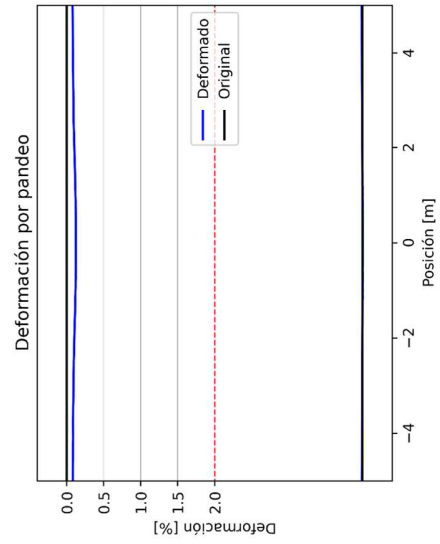
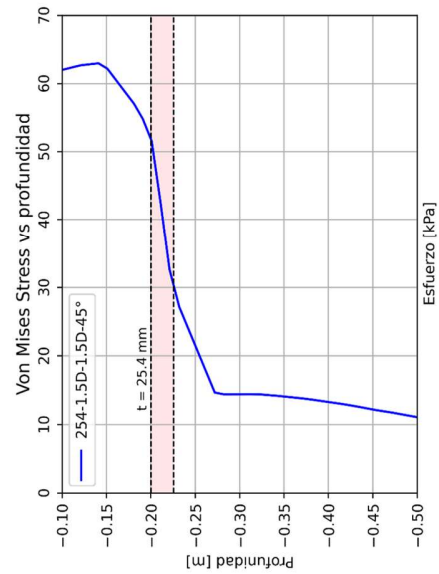
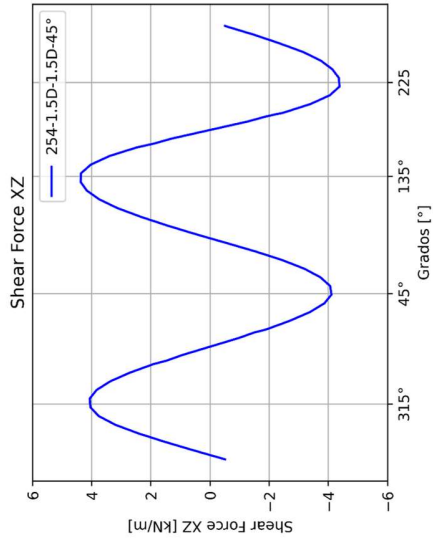
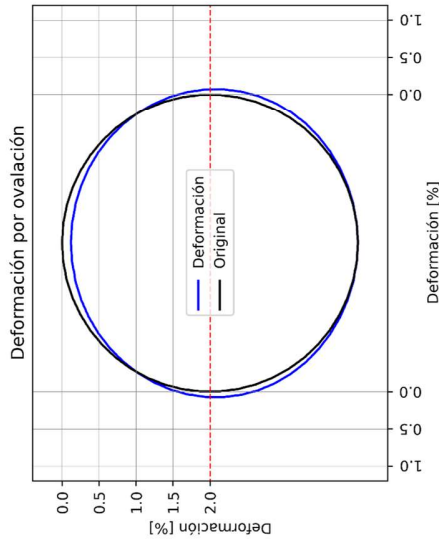
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

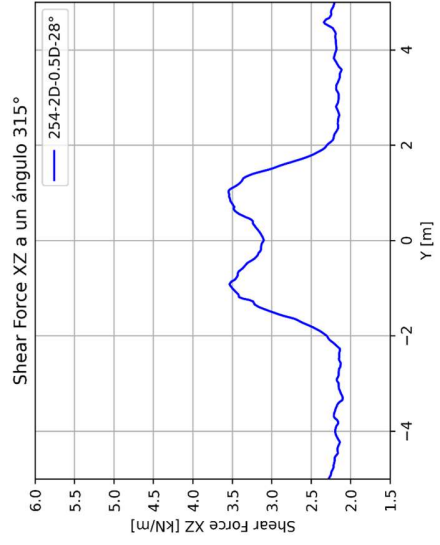
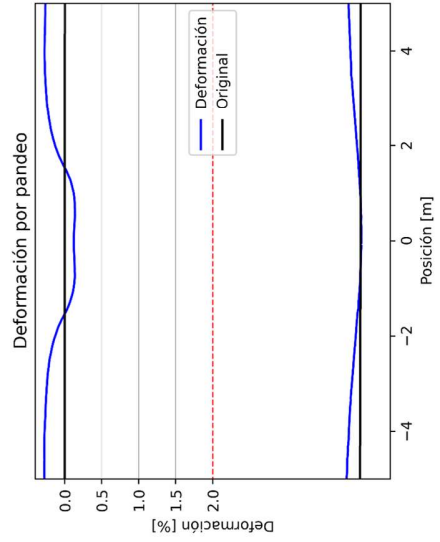
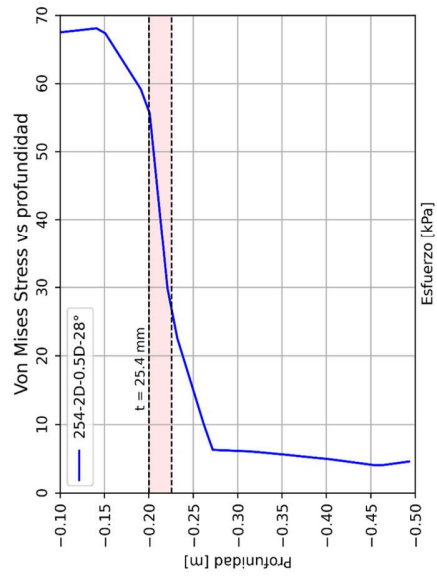
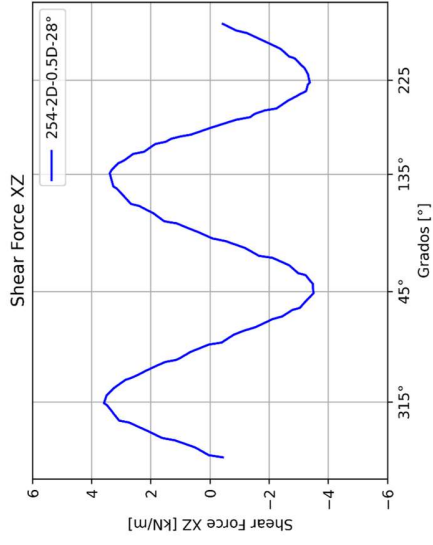
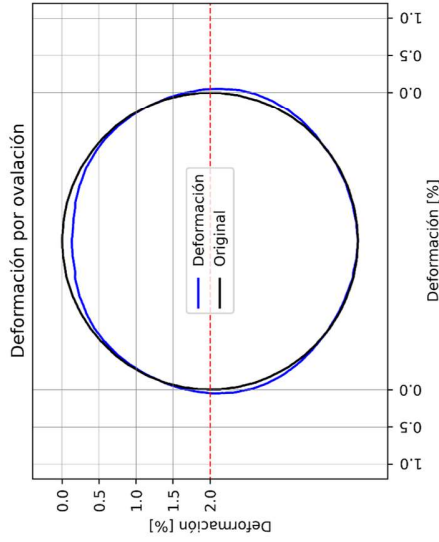
Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 254-2D-0.5D-28°

Datos del modelo

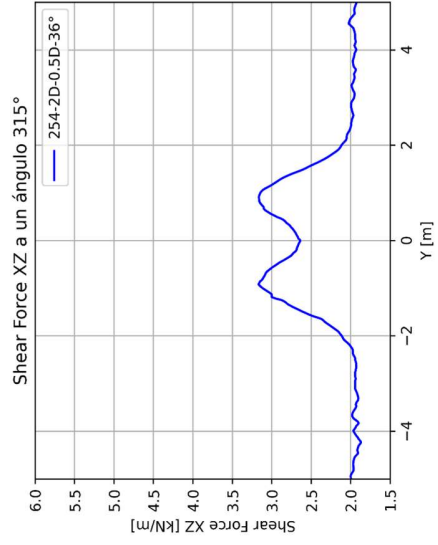
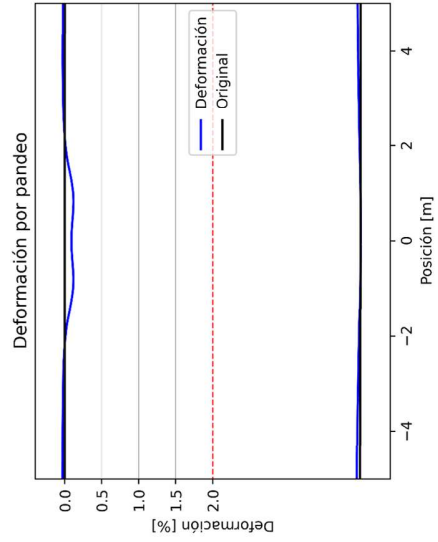
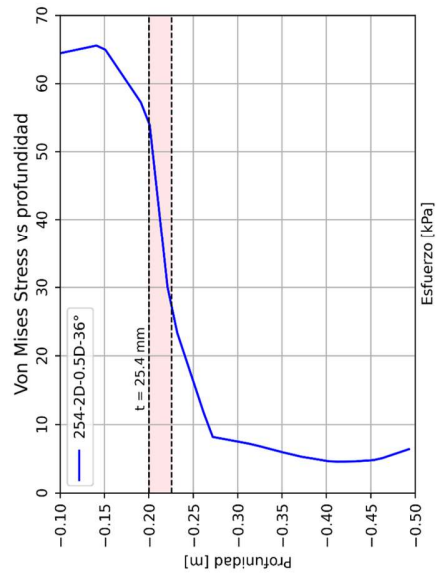
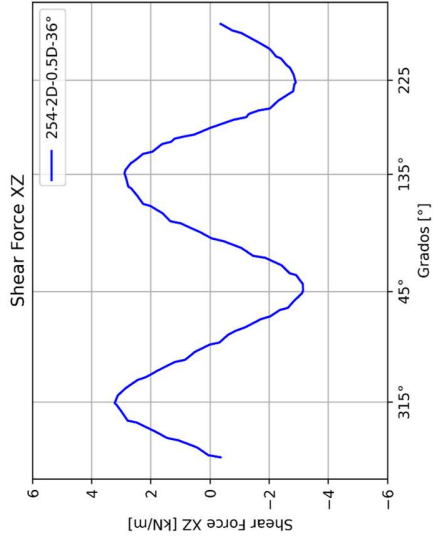
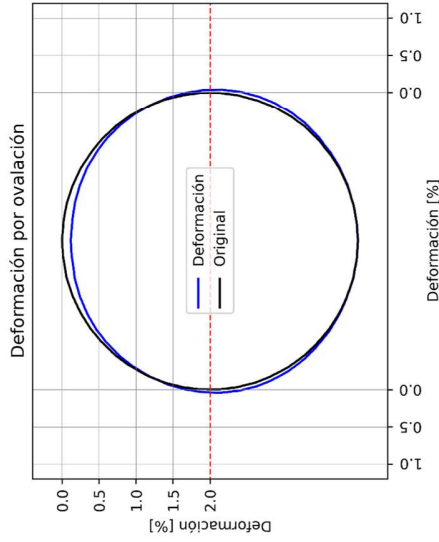
- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
 - Espesor placa [t]: 25.4mm
 - Ancho placa [D]: 2D
- Materia: Arena suelta
 - Peso unitario: 13 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa] : 5000
 - Angulo de fricción: 28°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa] : 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 254-2D-0.5D-36°

Datos del modelo

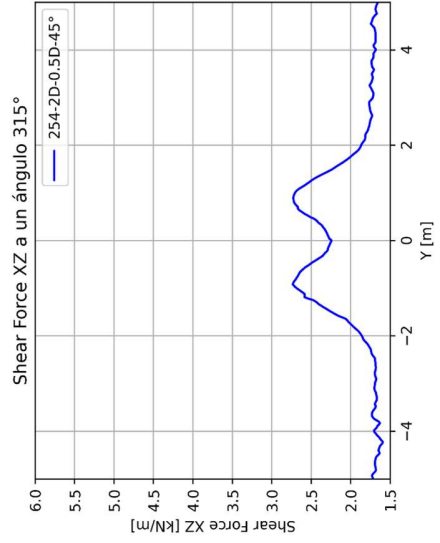
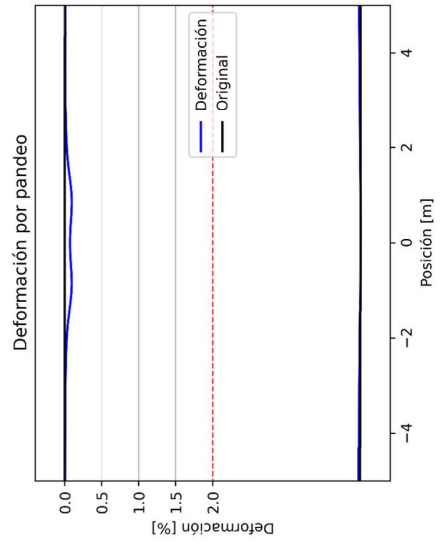
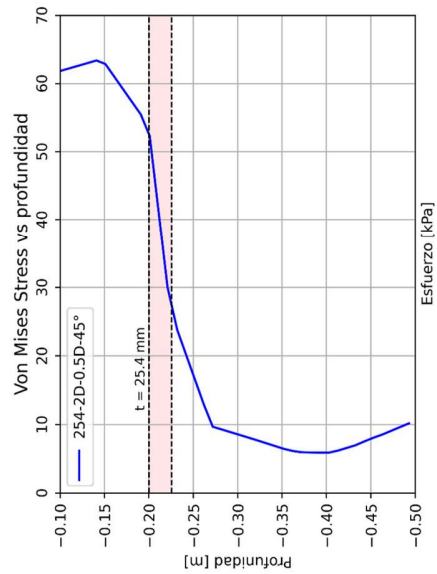
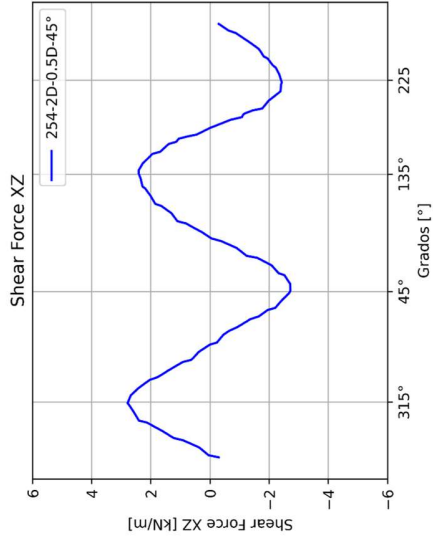
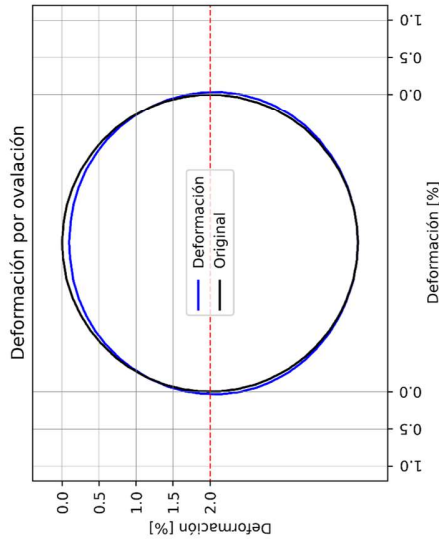
- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 25.4mm
- Ancho placa [D]: 2D
- Material: Arena media
- Peso unitario: 16 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa]: 20000
- Ángulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa]: 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 254-2D-0.5D-45°

Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 2D
 Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 254-2D-1D-28°

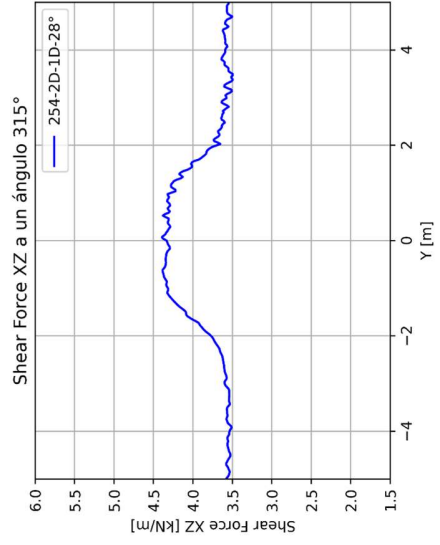
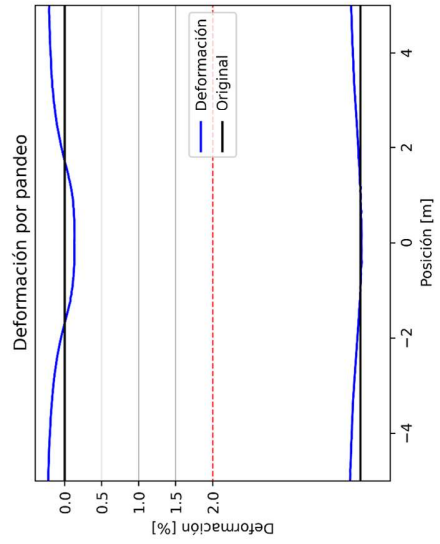
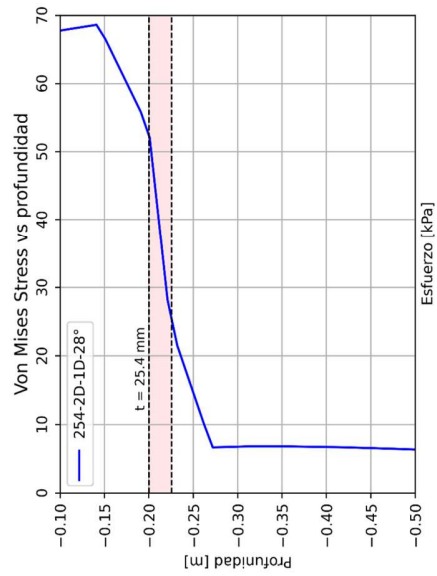
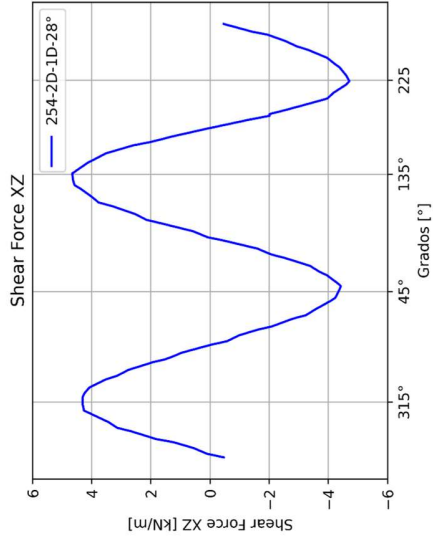
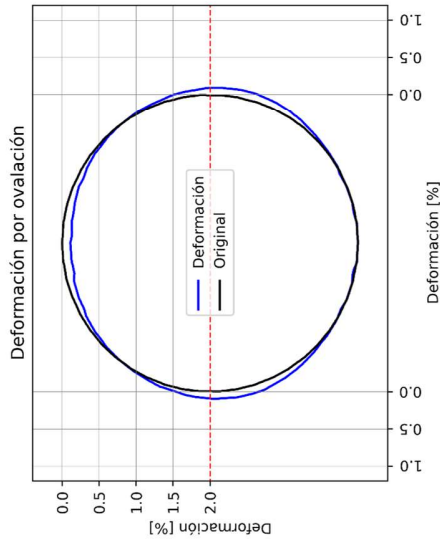
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 2D

Materia: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 254-2D-1D-36°

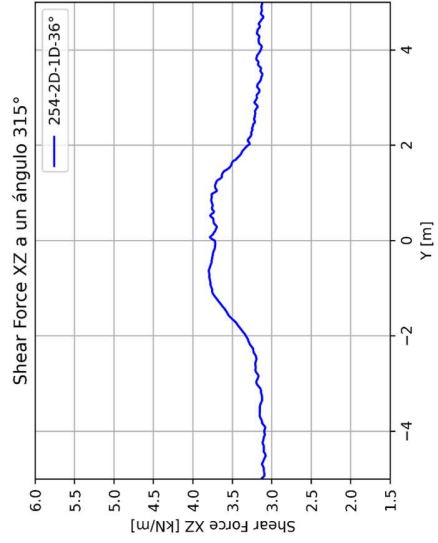
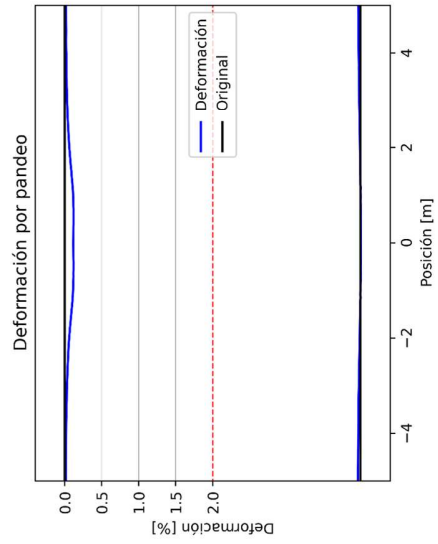
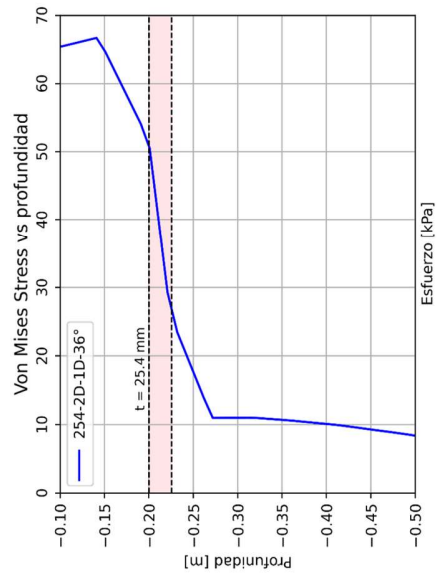
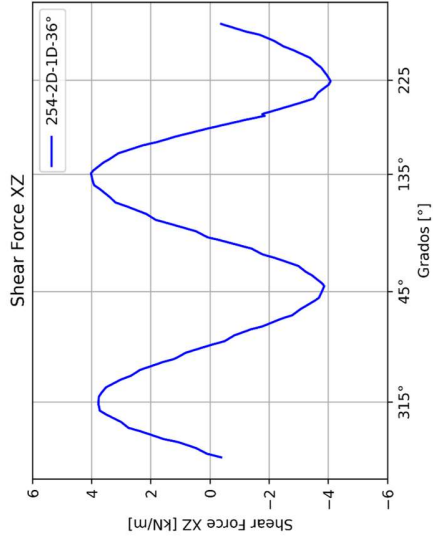
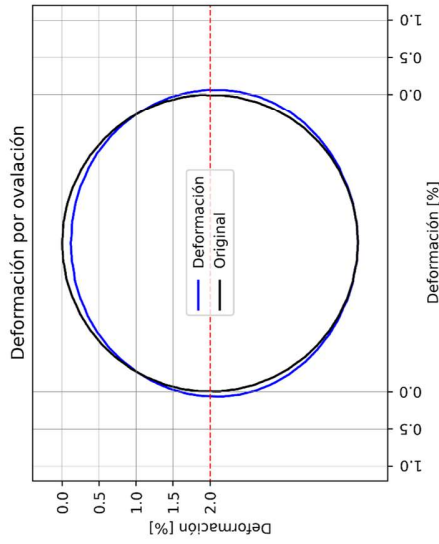
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa] : 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa] : 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 254-2D-1D-45°

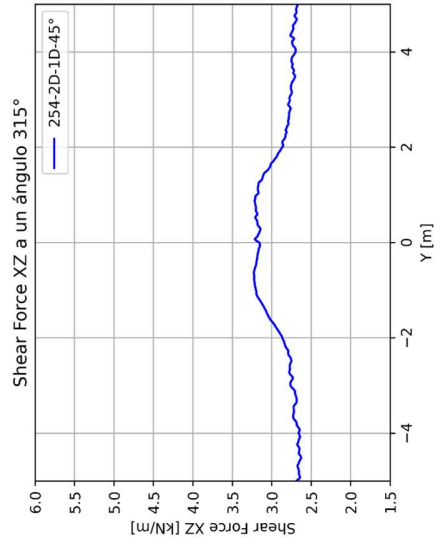
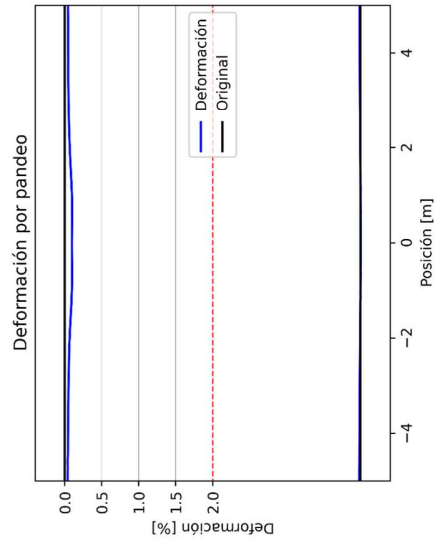
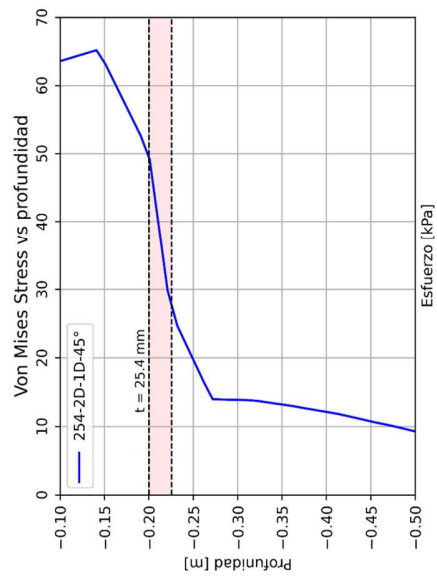
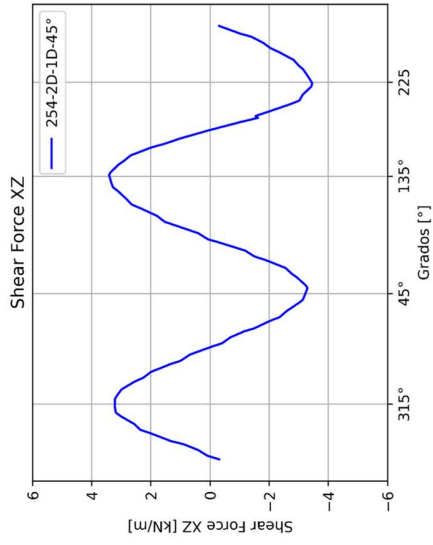
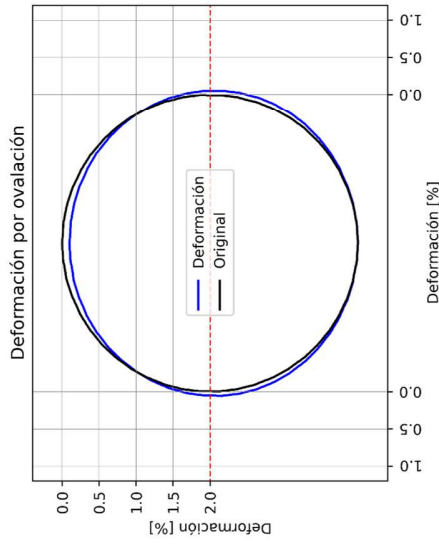
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

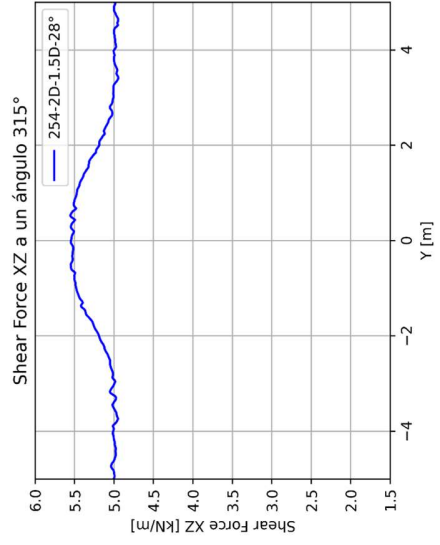
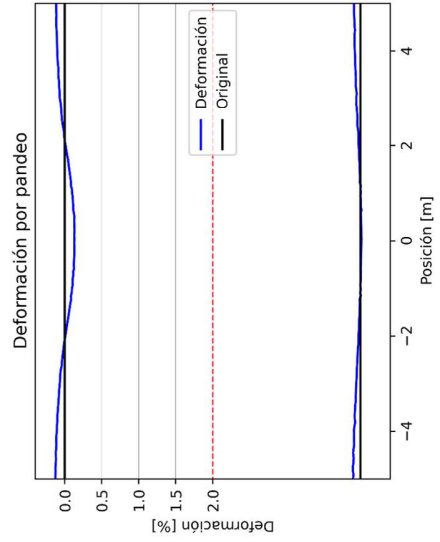
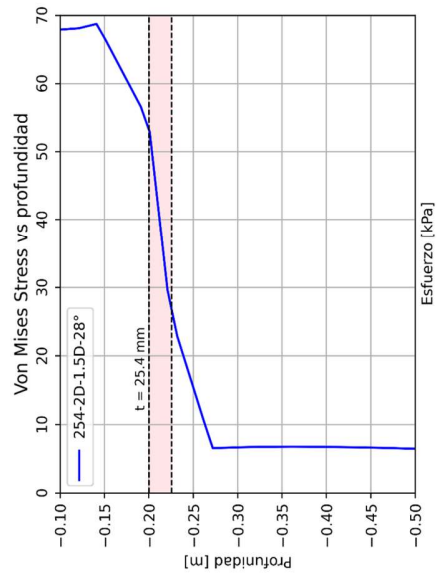
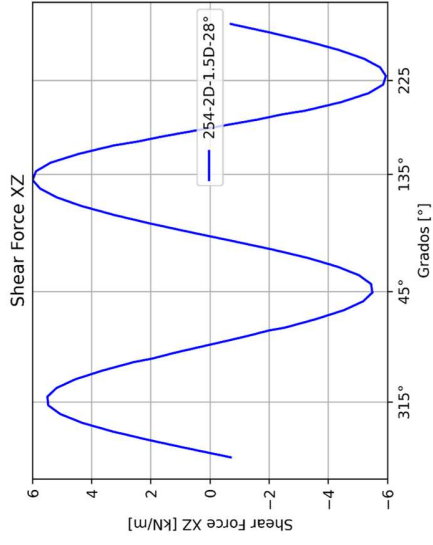
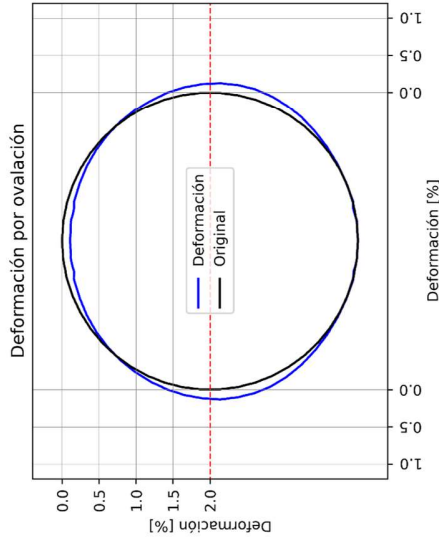
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 254-2D-1.5D-28°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 25.4mm
- Ancho placa [D]: 2D
- Material: Arena suelta
 - Peso unitario: 13 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa] : 5000
 - Angulo de fricción: 28°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa] : 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 254-2D-1.5D-36°

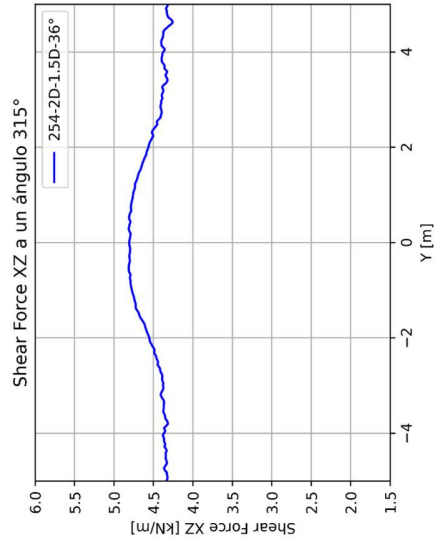
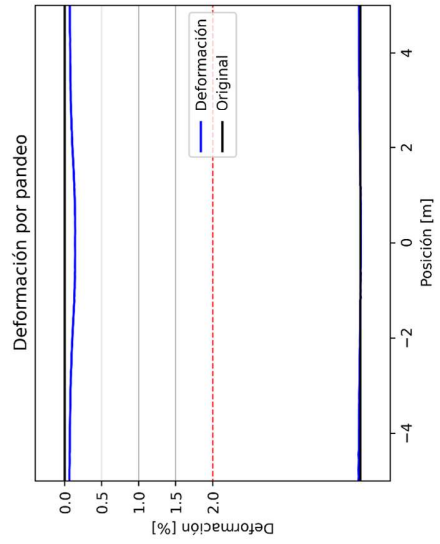
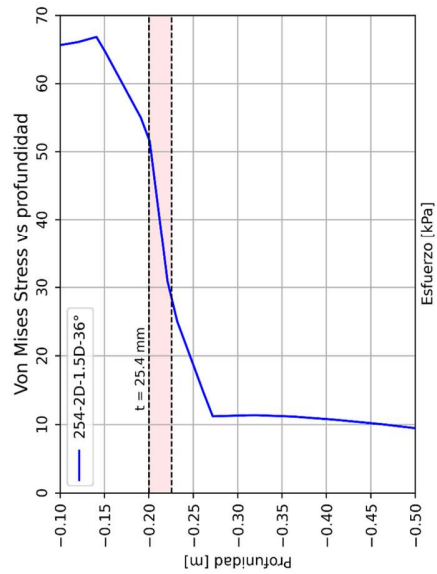
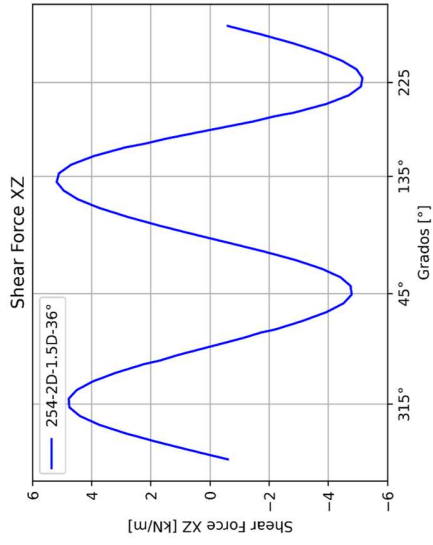
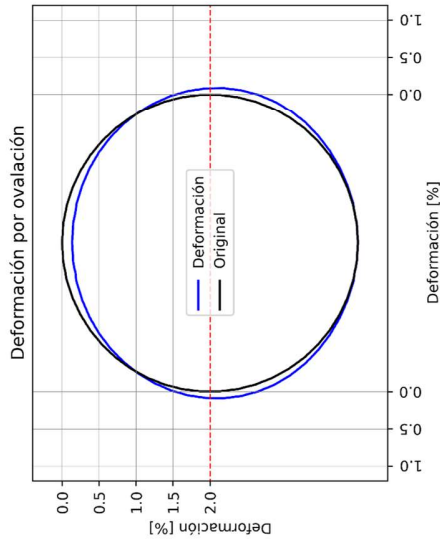
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa] : 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa] : 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

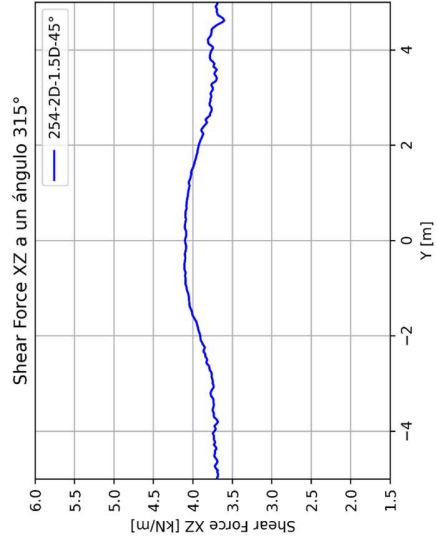
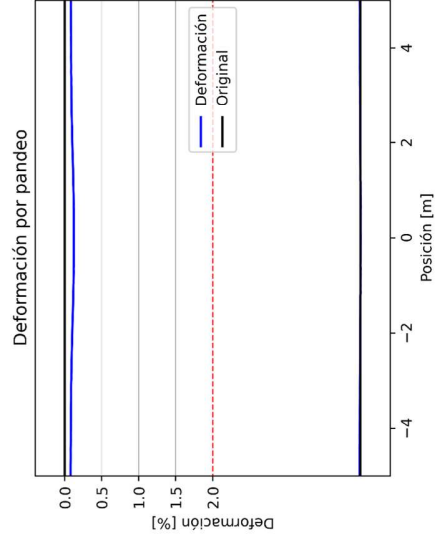
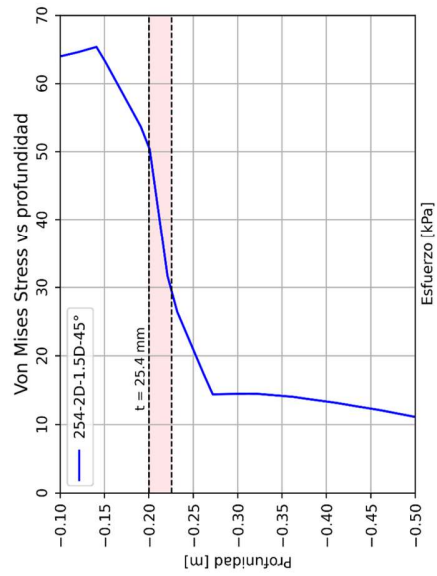
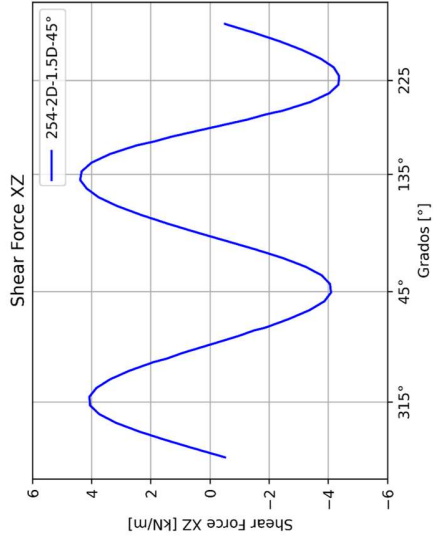
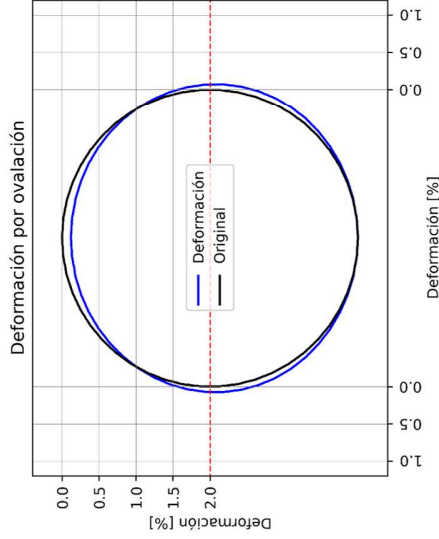
Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 254-2D-1.5D-45°

Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 25.4mm
 Ancho placa [D]: 2D
 Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 762-1D-0.5D-28°

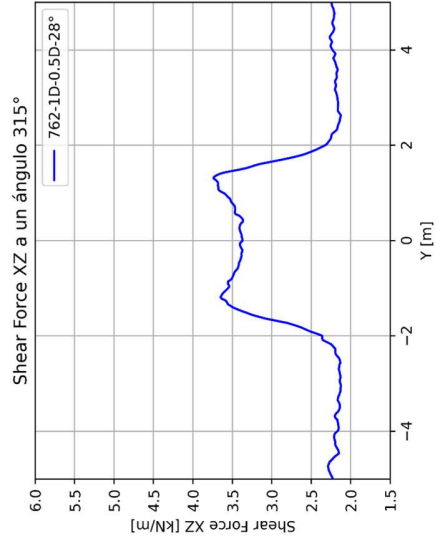
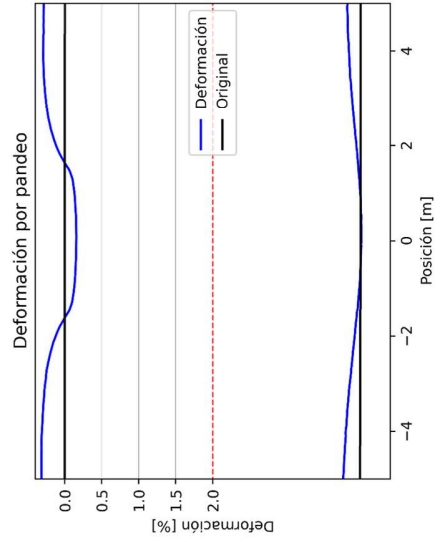
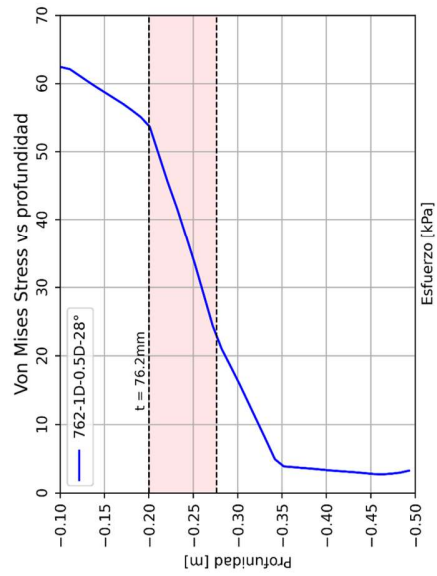
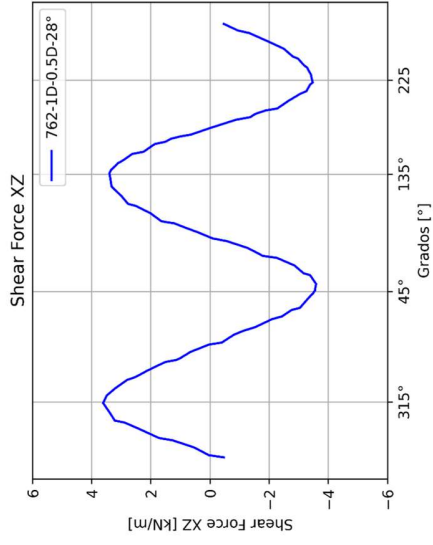
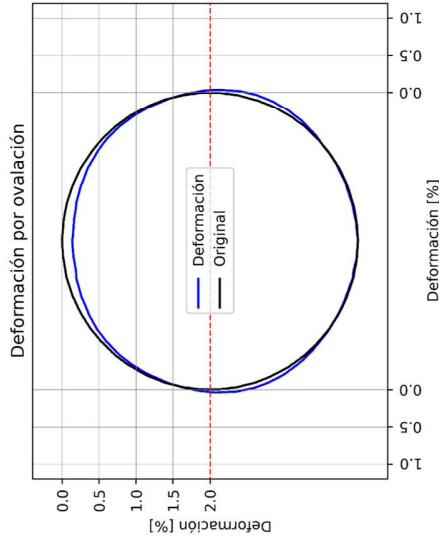
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

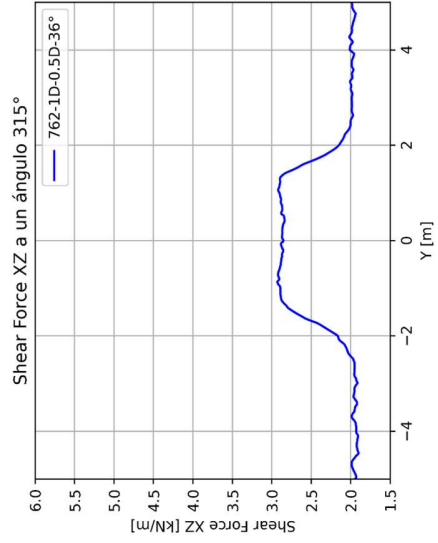
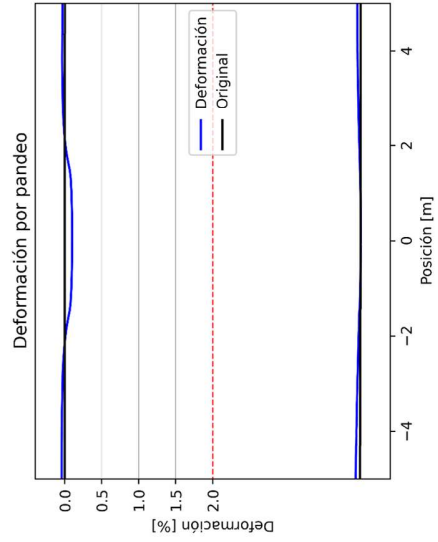
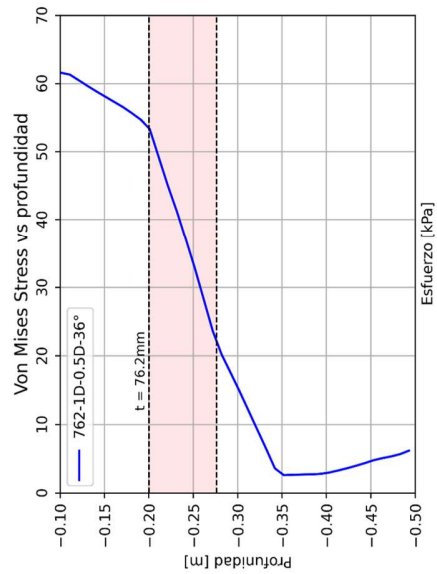
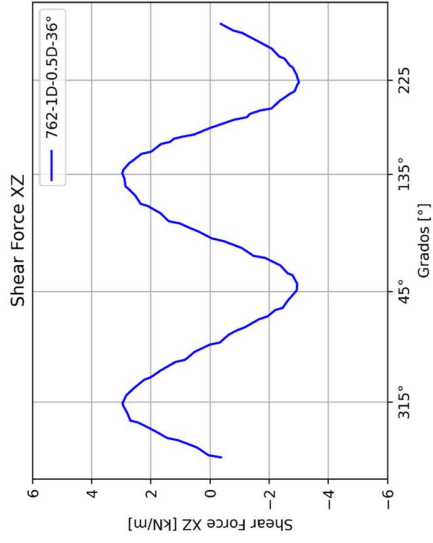
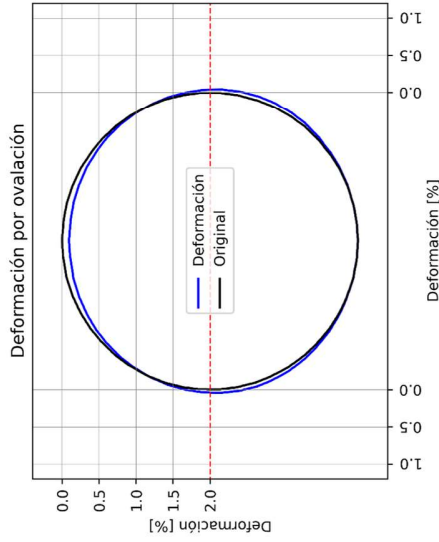
Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-1D-0.5D-36°

Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1D
 Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa] : 20000
 Angulo de fricción: 36°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa] : 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-1D-0.5D-45°

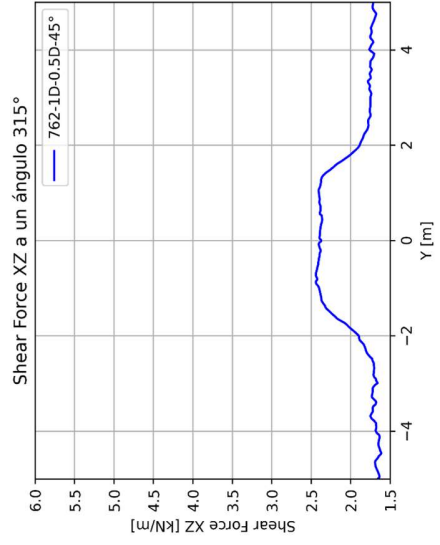
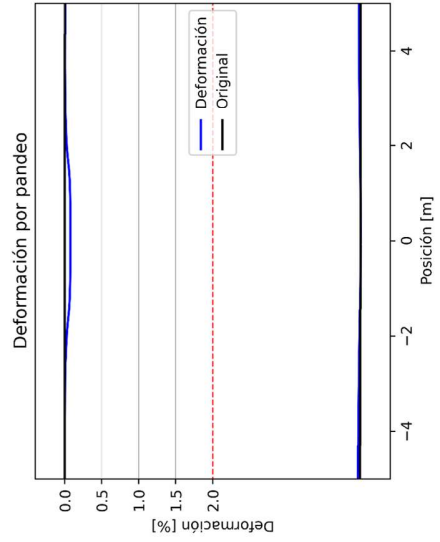
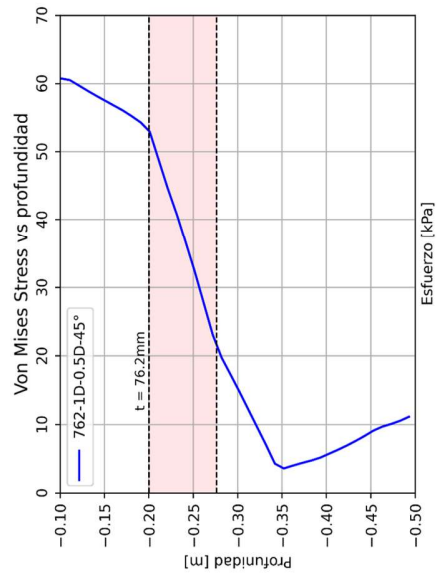
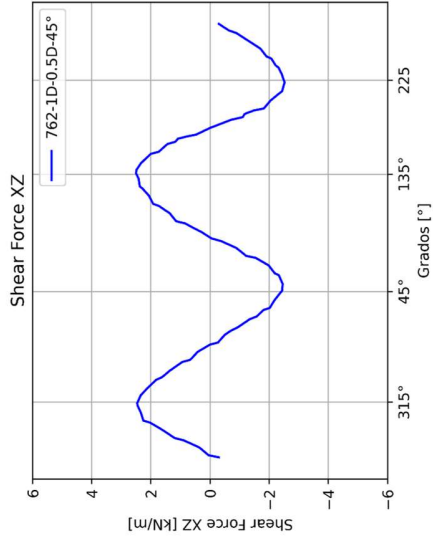
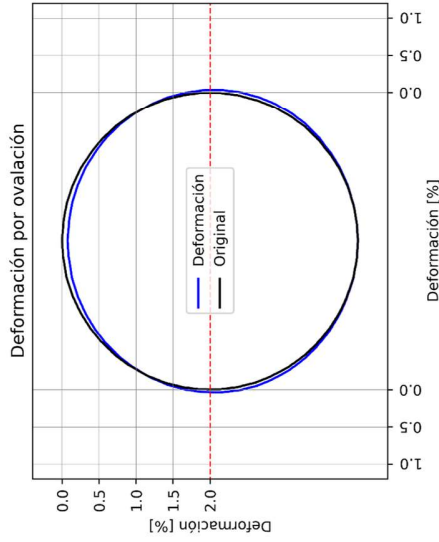
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-1D-1D-28°

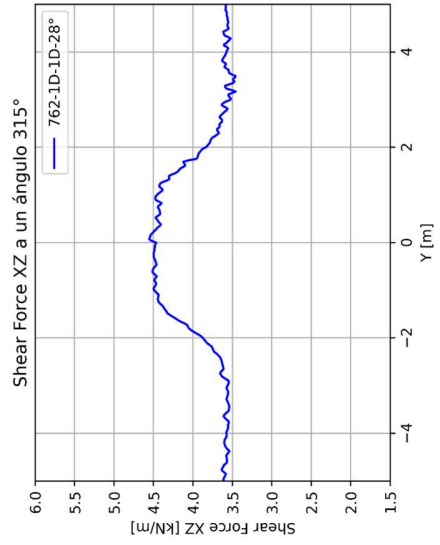
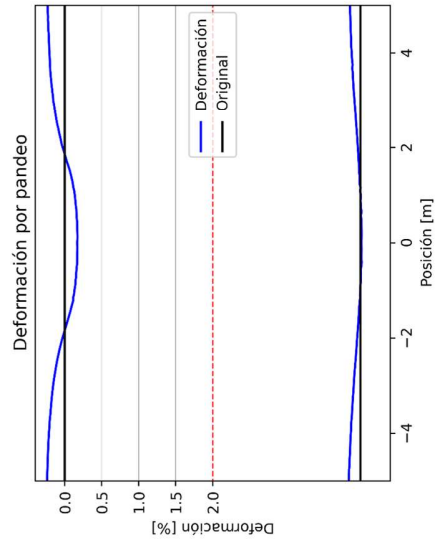
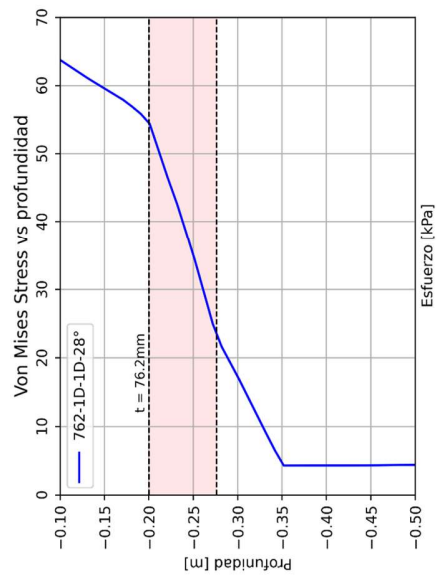
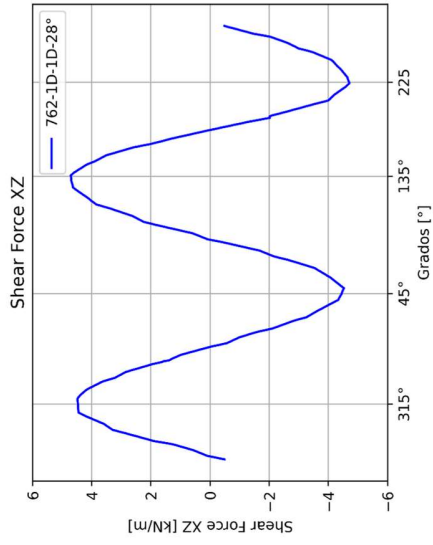
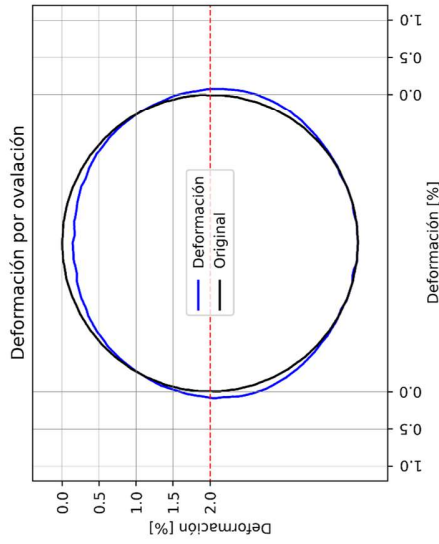
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 762-1D-1D-36°

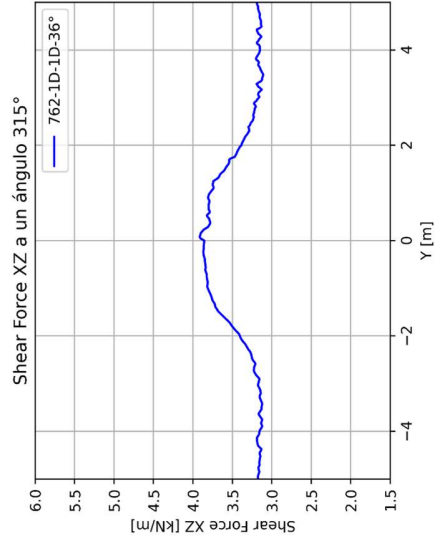
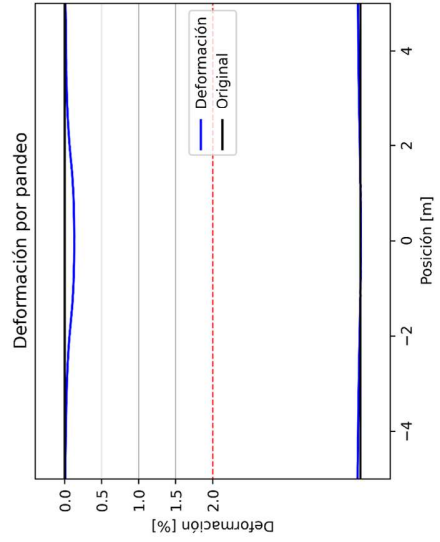
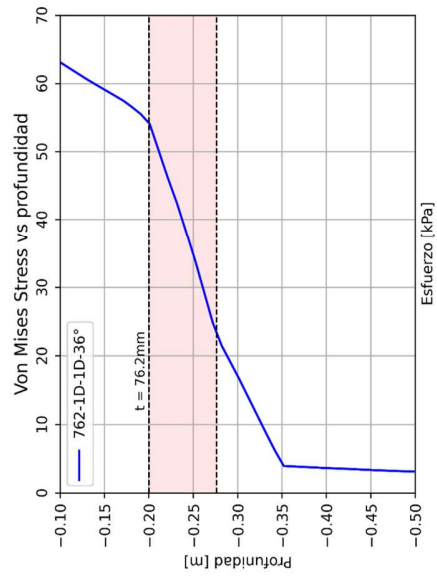
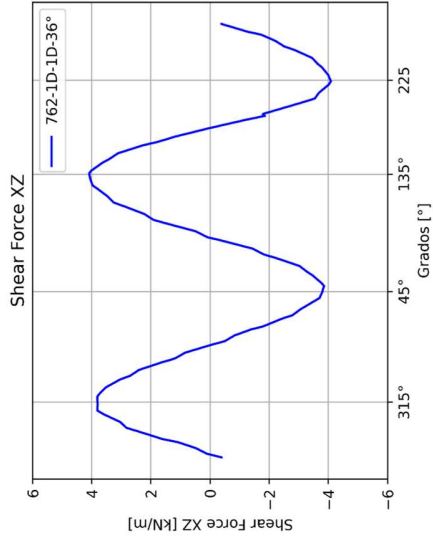
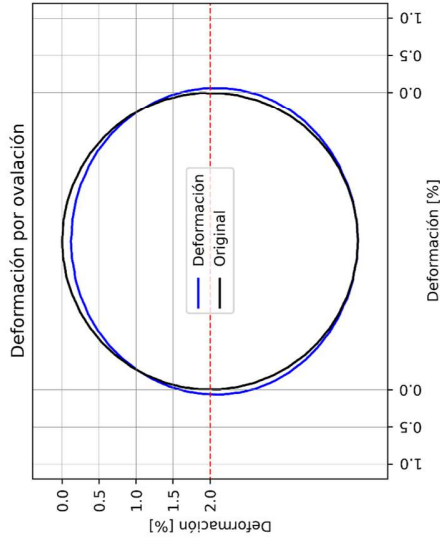
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 762-1D-1D-45°

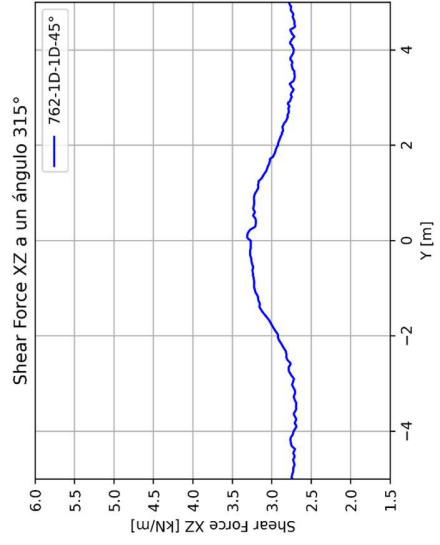
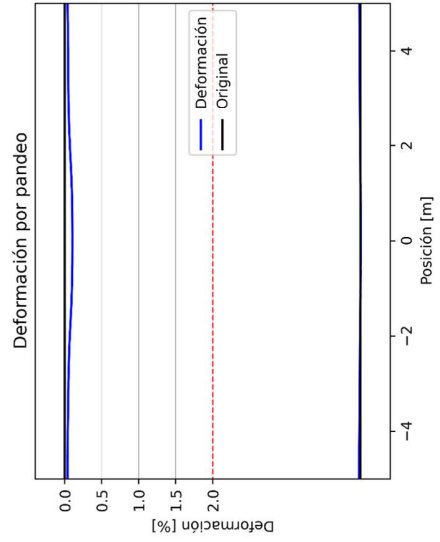
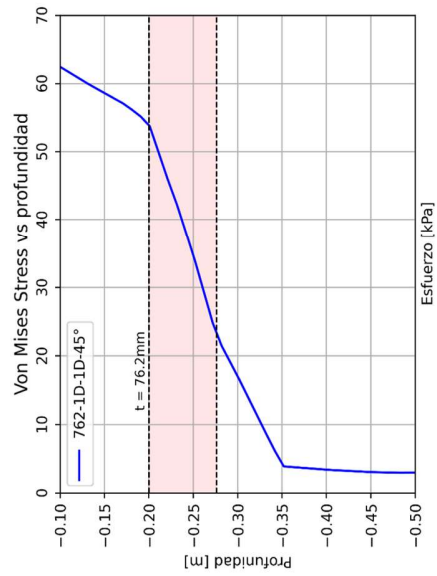
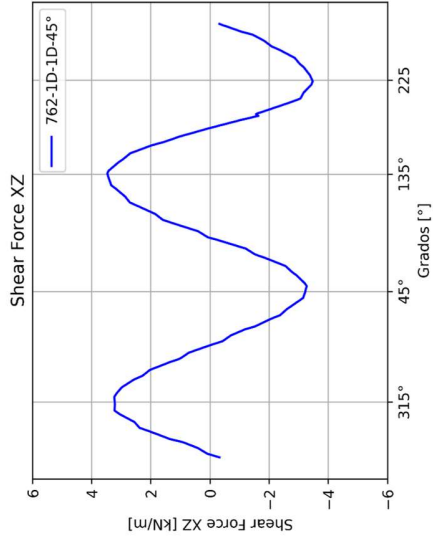
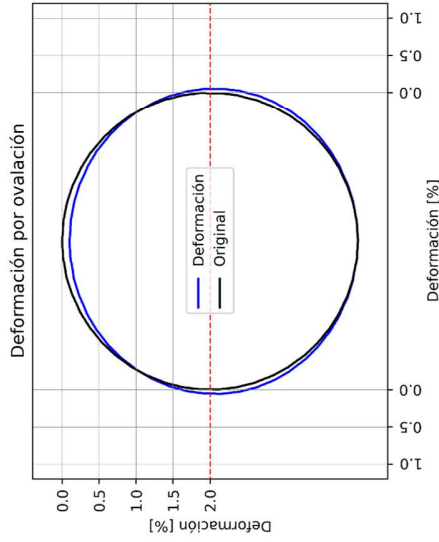
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

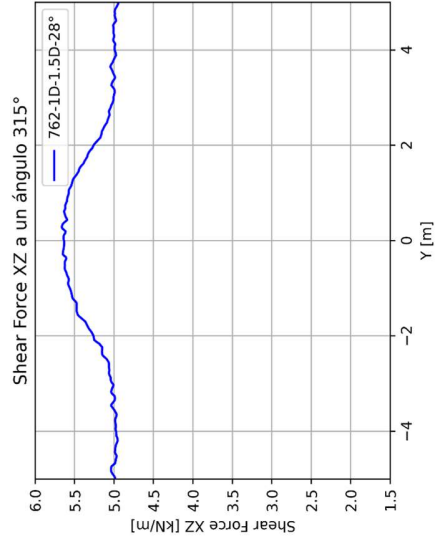
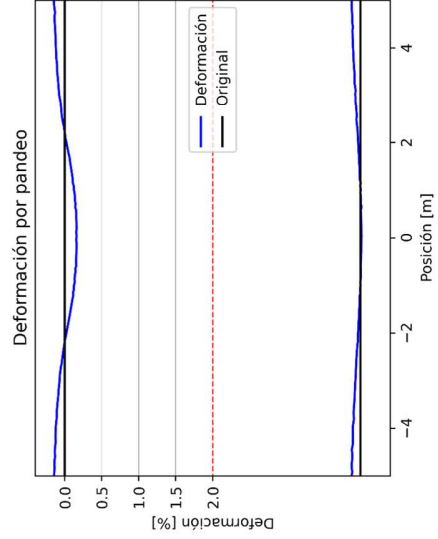
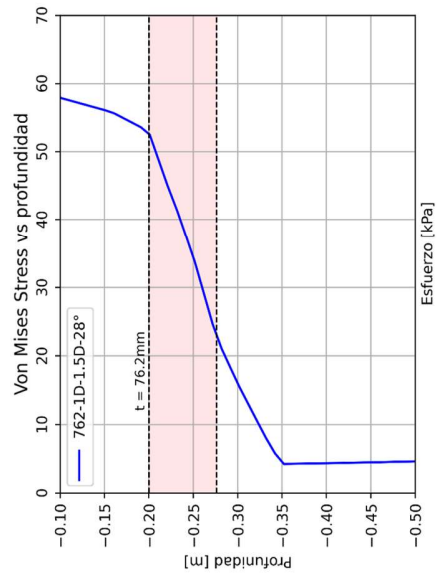
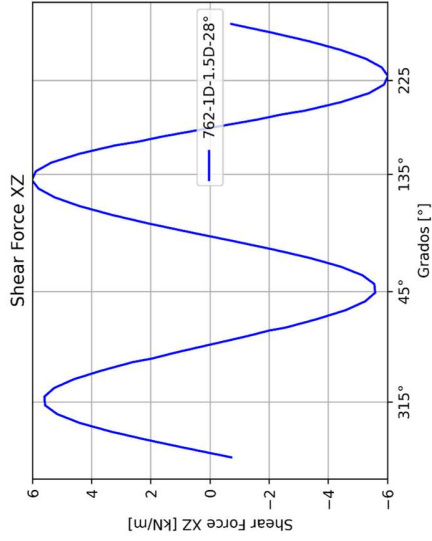
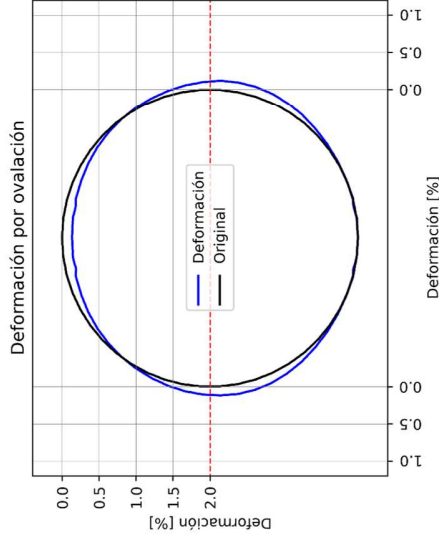
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 762-1D-1.5D-28°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 76.2mm
- Ancho placa [D]: 1D
- Material: Arena suelta
 - Peso unitario: 13 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa]: 5000
 - Angulo de fricción: 28°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa]: 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 762-1D-1.5D-36°

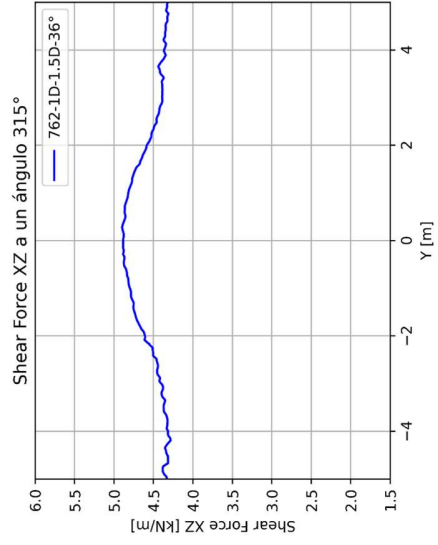
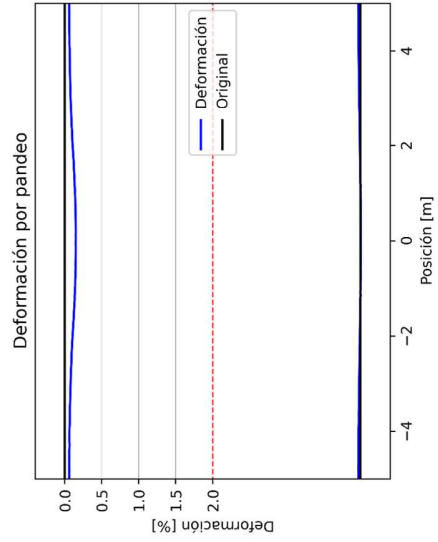
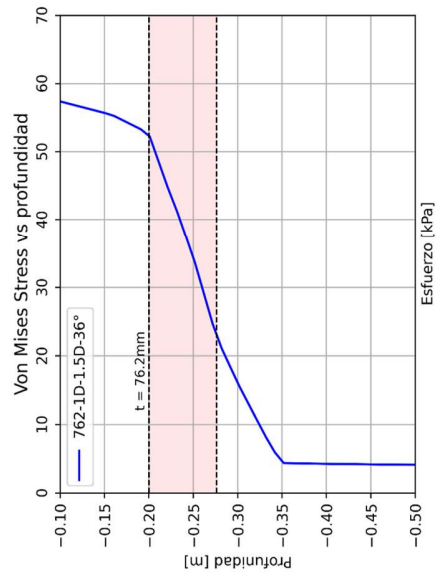
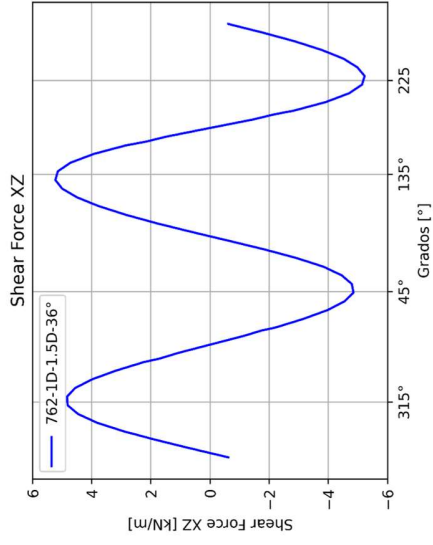
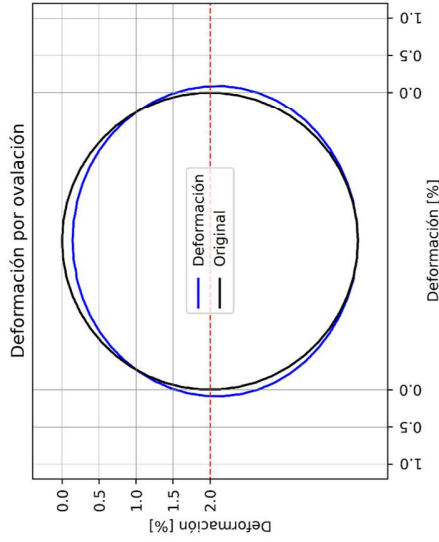
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

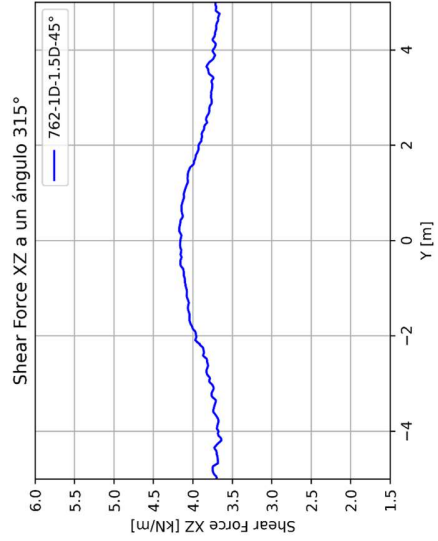
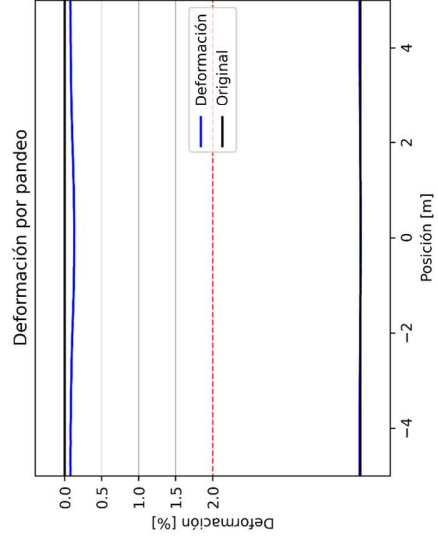
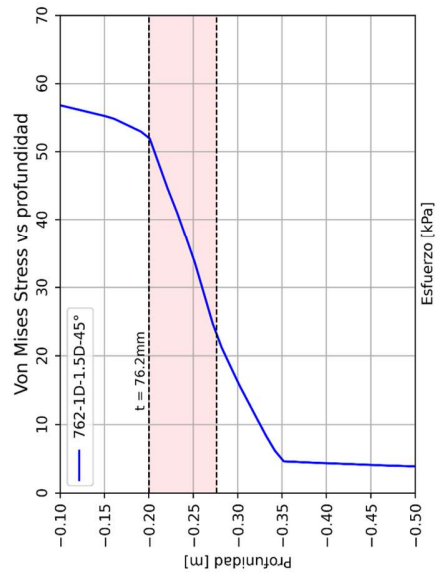
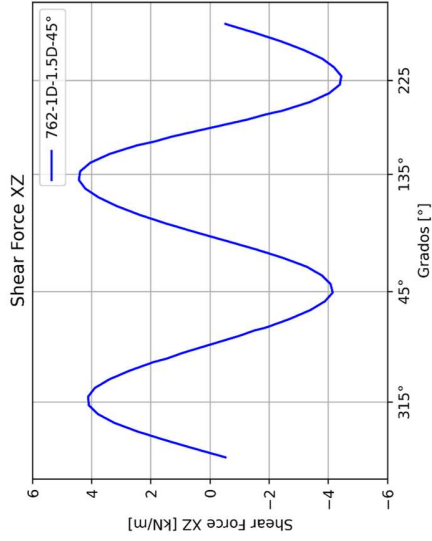
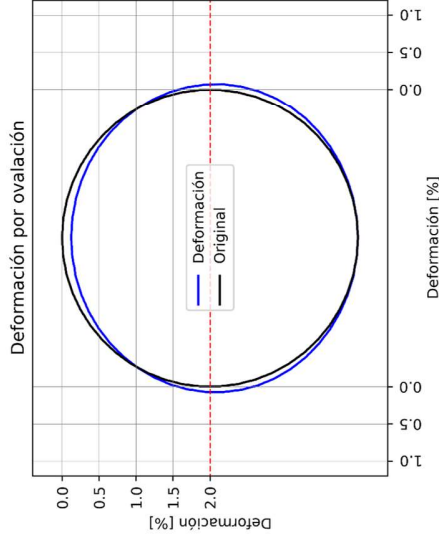
Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-1D-1.5D-45°

Datos del modelo

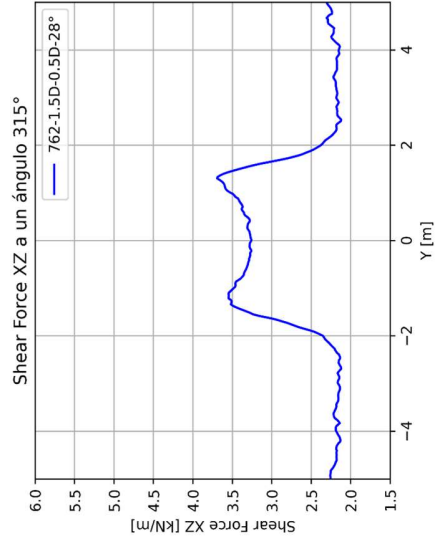
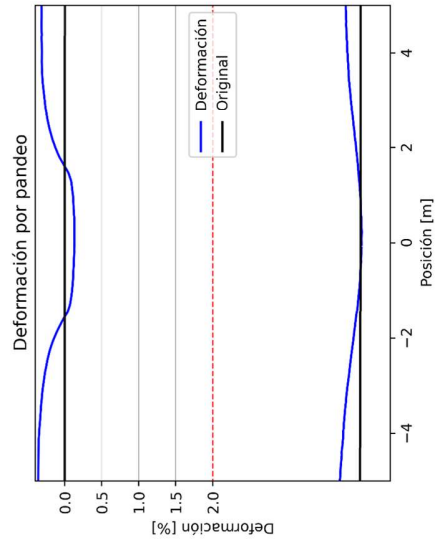
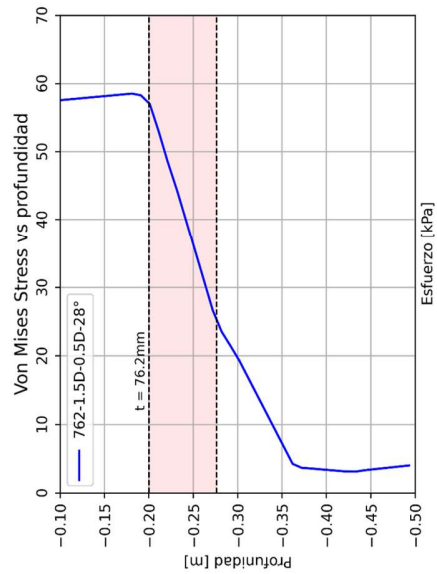
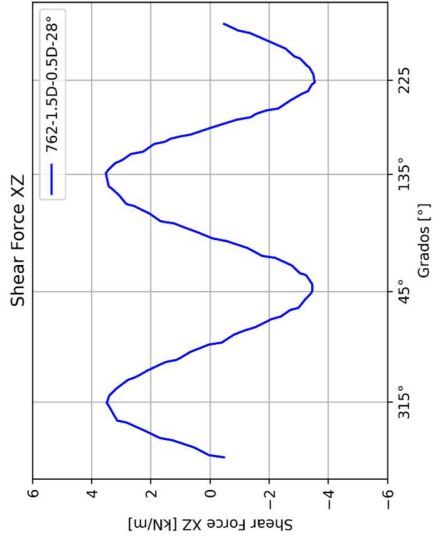
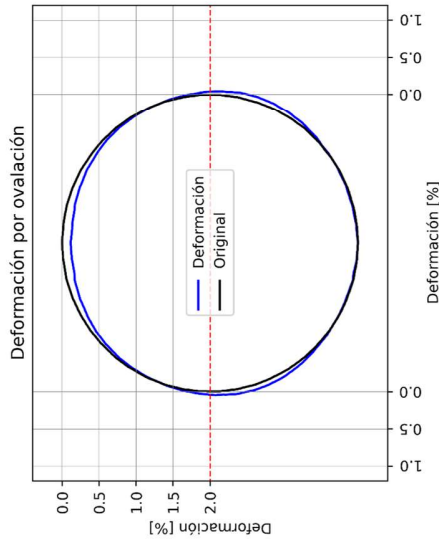
Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1D
 Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 762-1.5D-0.5D-28°

Datos del modelo

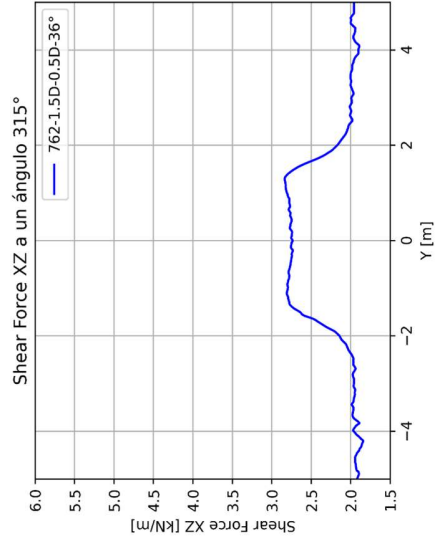
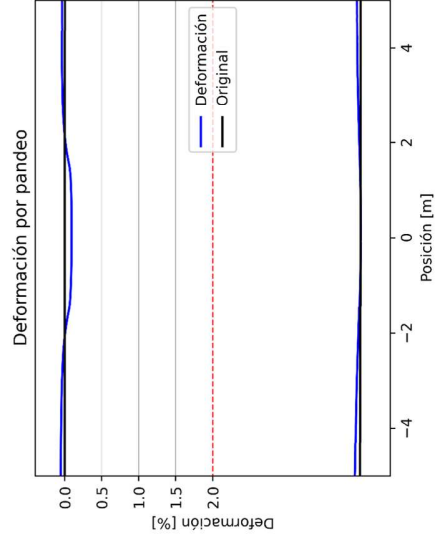
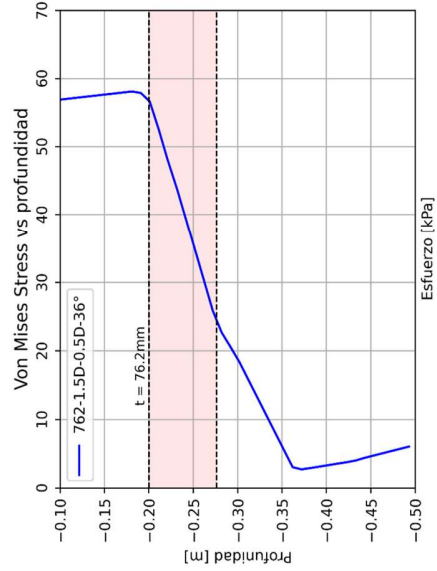
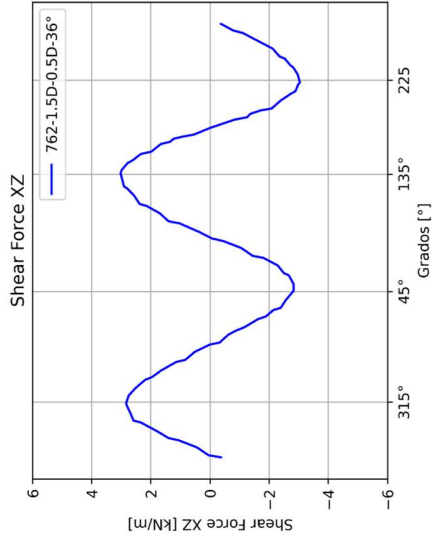
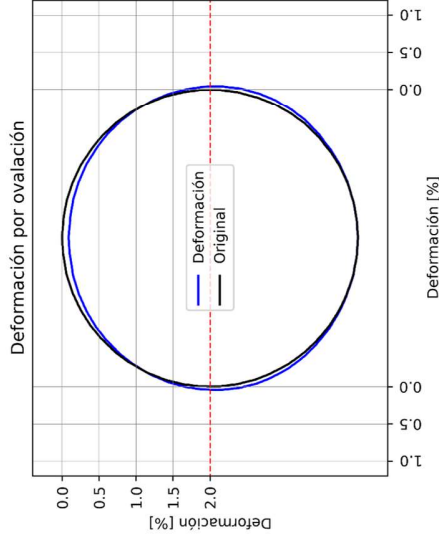
- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 76.2mm
- Ancho placa [D]: 1.5D
- Materia: Arena suelta
 - Peso unitario: 13 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa]: 5000
 - Angulo de fricción: 28°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa]: 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-1.5D-0.5D-36°

Datos del modelo

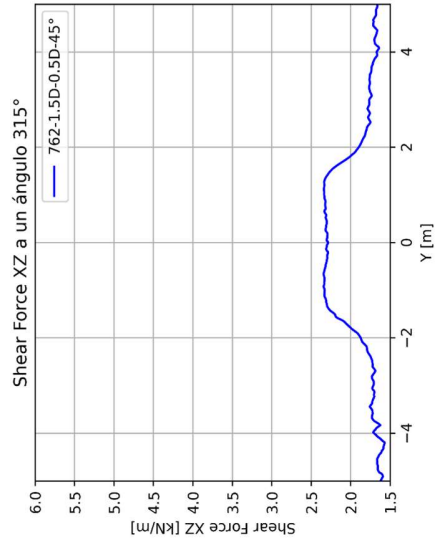
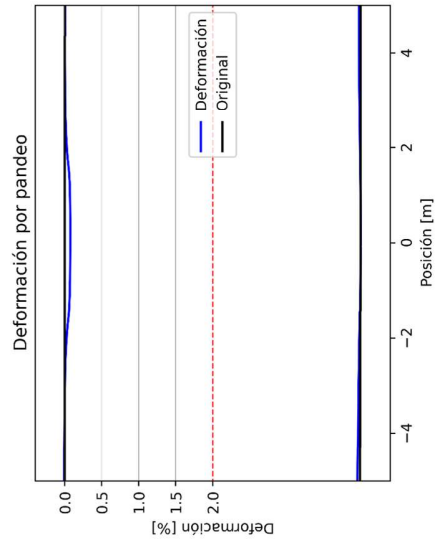
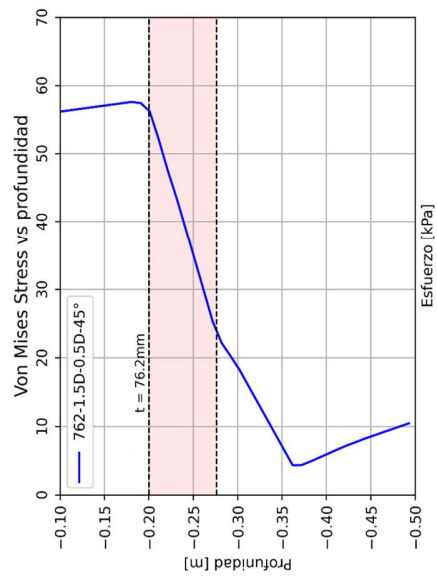
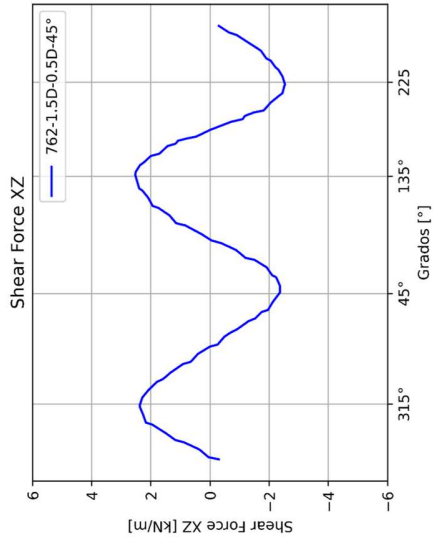
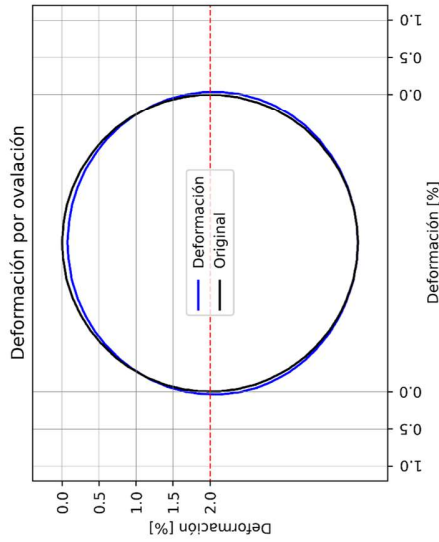
- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 76.2mm
- Ancho placa [D]: 1.5D
- Materia: Arena media
 - Peso unitario: 16 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa] : 20000
 - Angulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa] : 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-1.5D-0.5D-45°

Datos del modelo

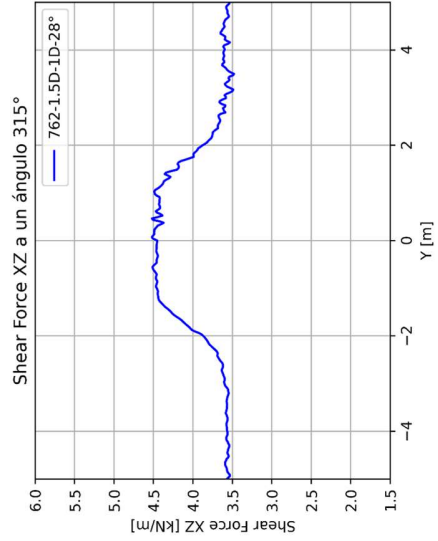
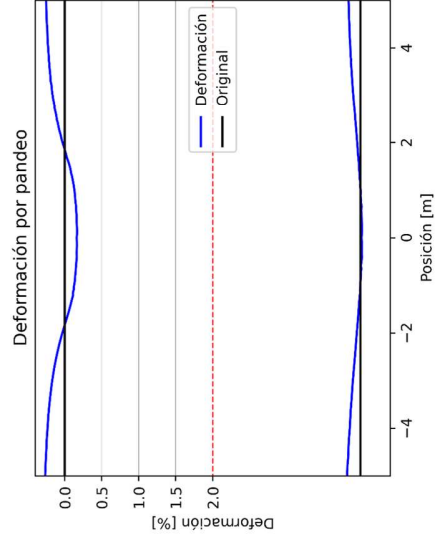
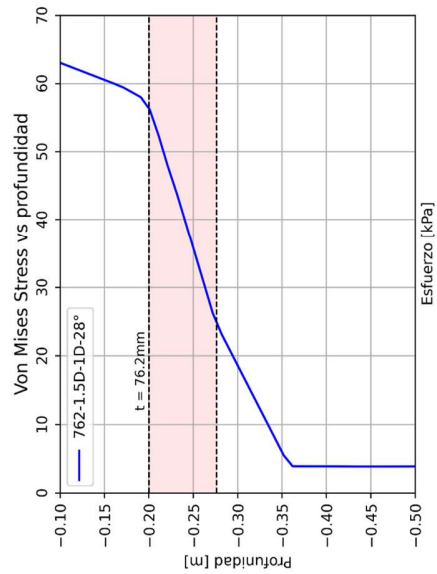
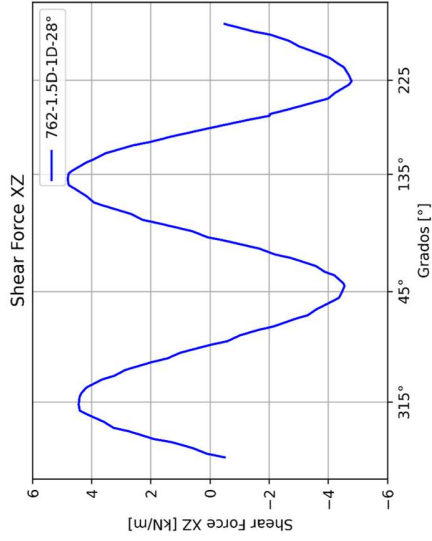
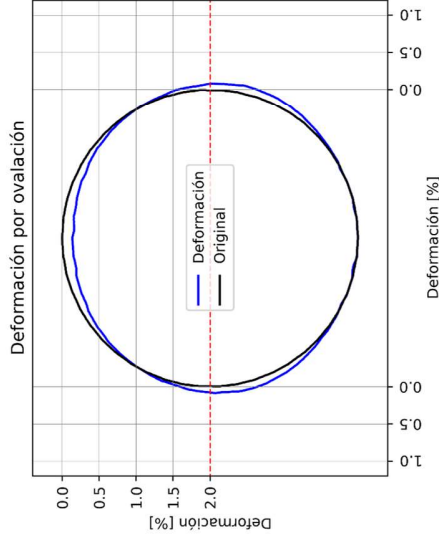
Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D
 Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-1.5D-1D-28°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 76.2mm
- Ancho placa [D]: 1.5D
- Material: Arena suelta
- Peso unitario: 13 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa]: 5000
- Ángulo de fricción: 28°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa]: 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1D



MODELO: 762-1.5D-1D-36°

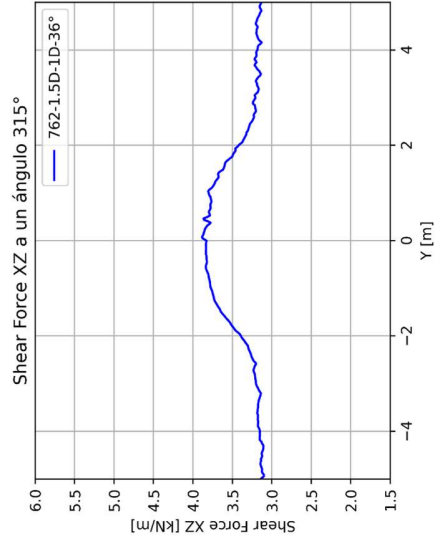
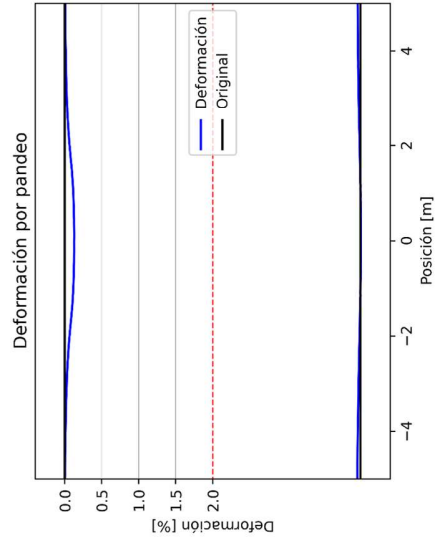
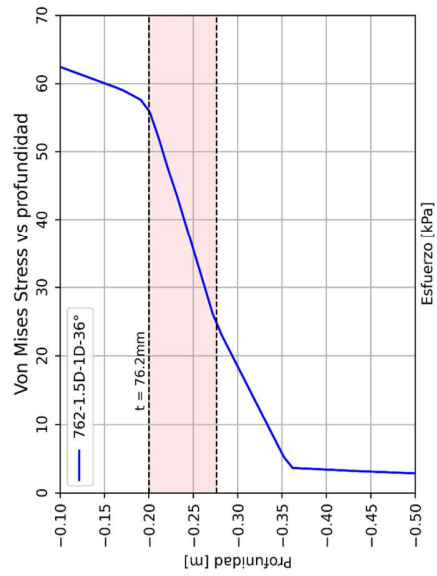
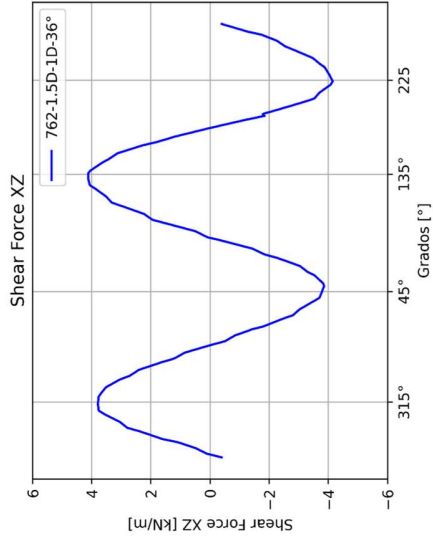
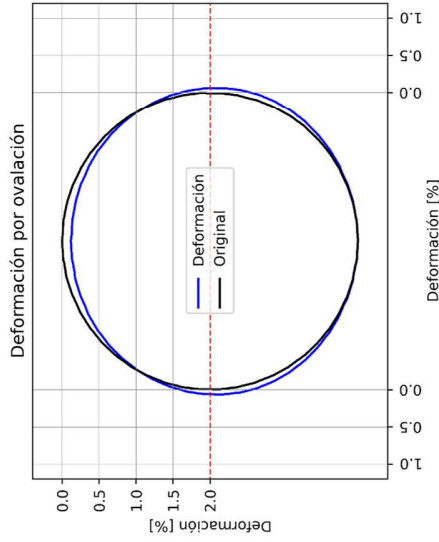
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 762-1.5D-1D-45°

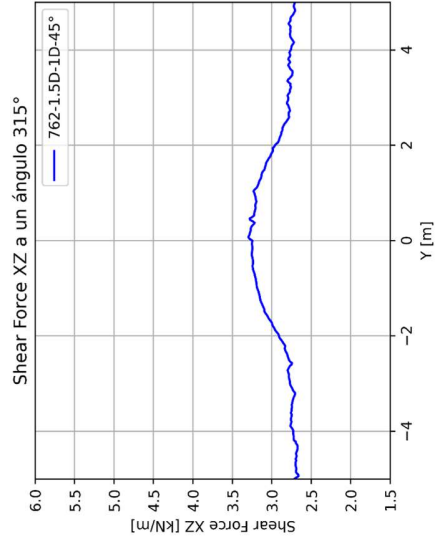
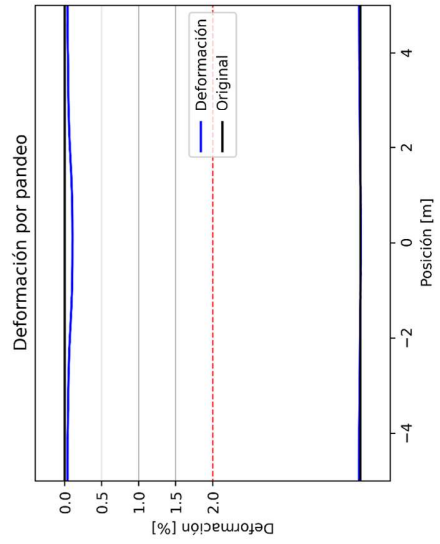
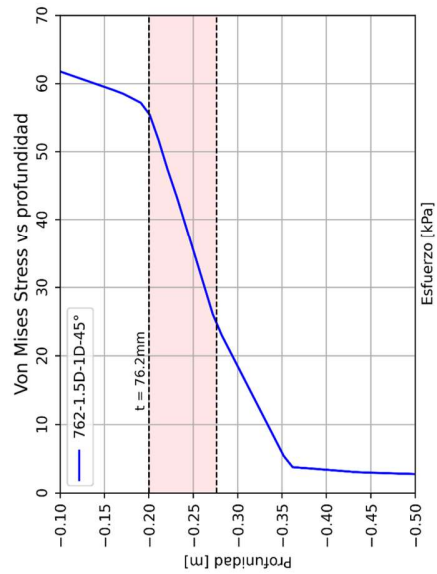
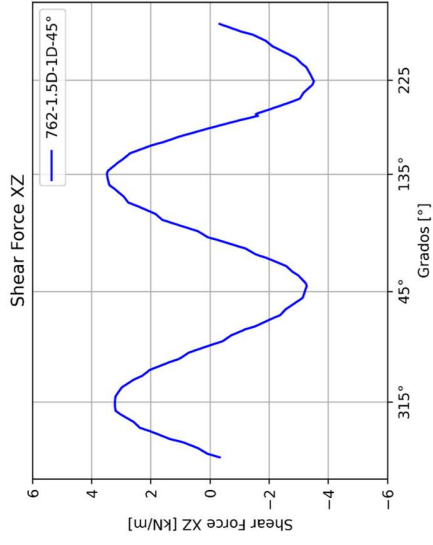
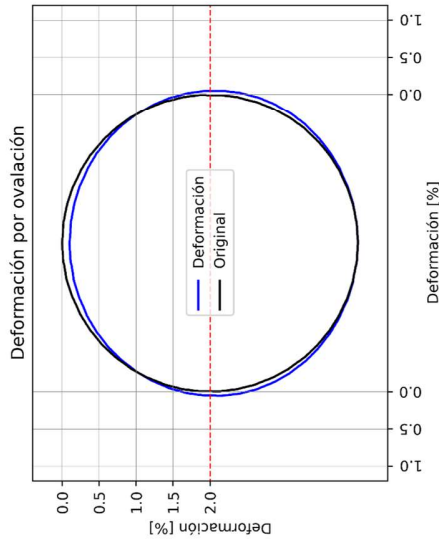
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

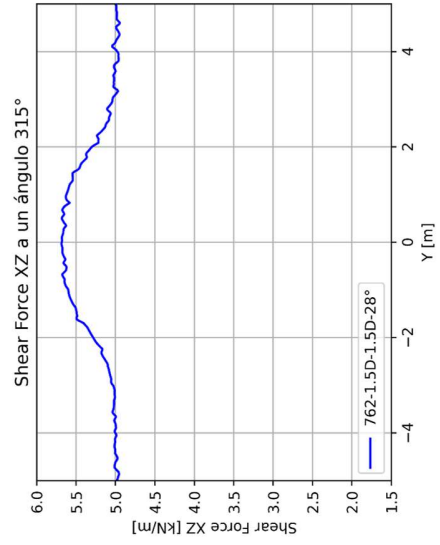
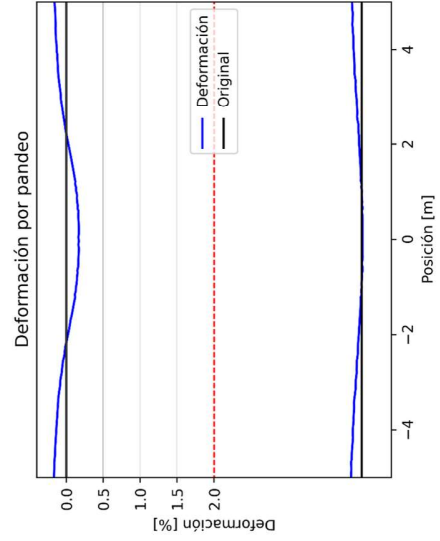
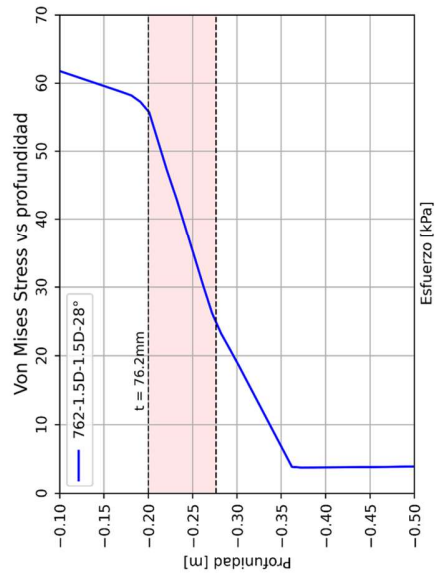
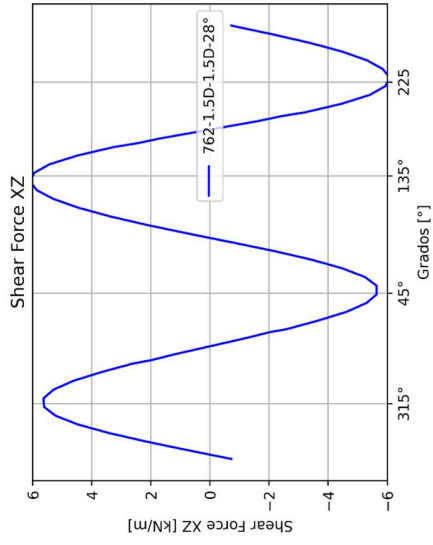
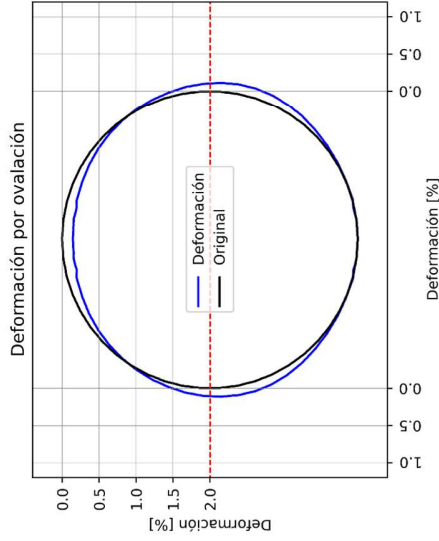
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 762-1.5D-1.5D-28°

Datos del modelo

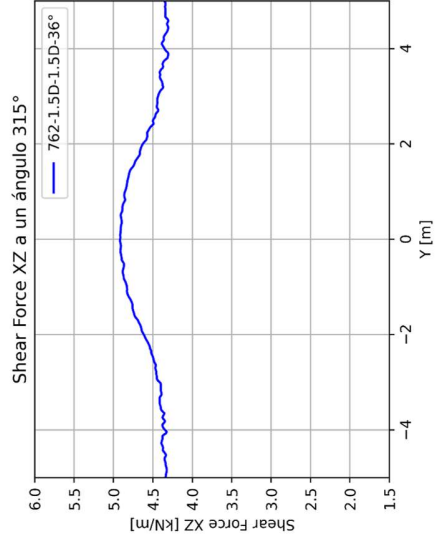
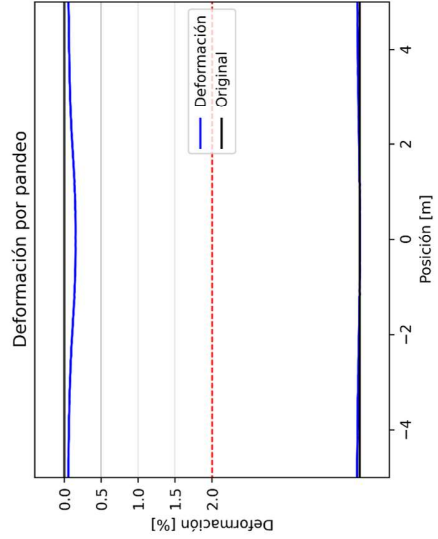
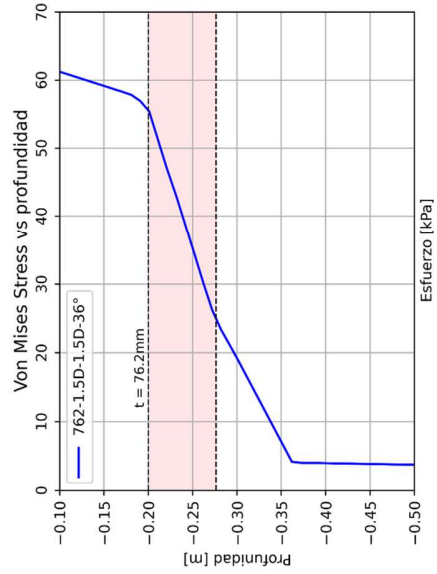
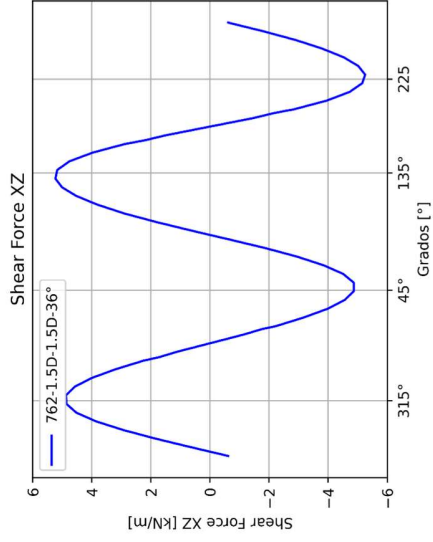
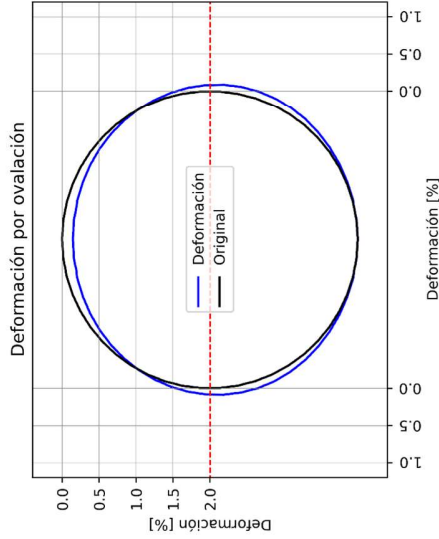
Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1D
 Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 762-1.5D-1.5D-36°

Datos del modelo

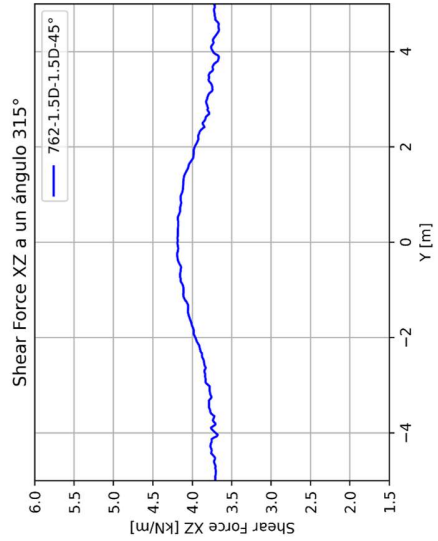
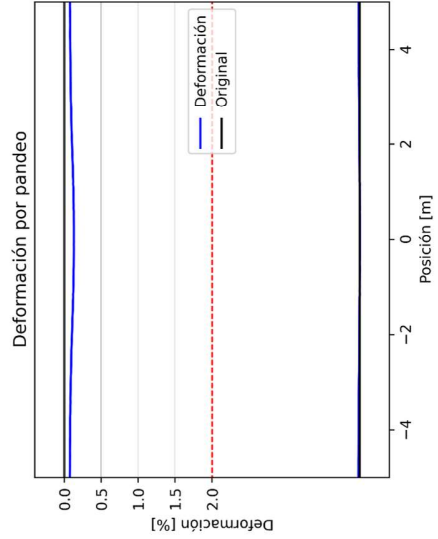
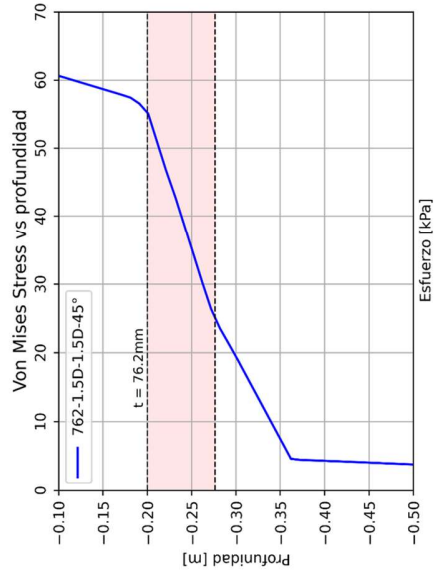
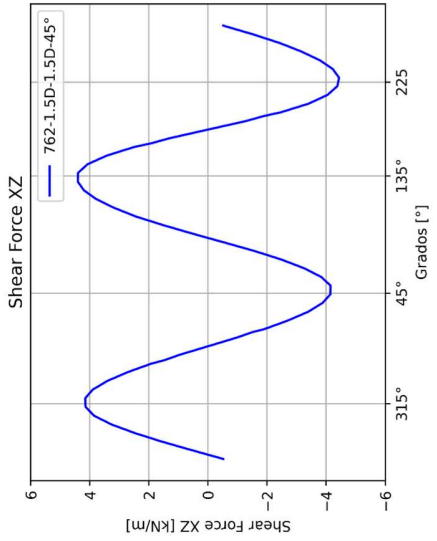
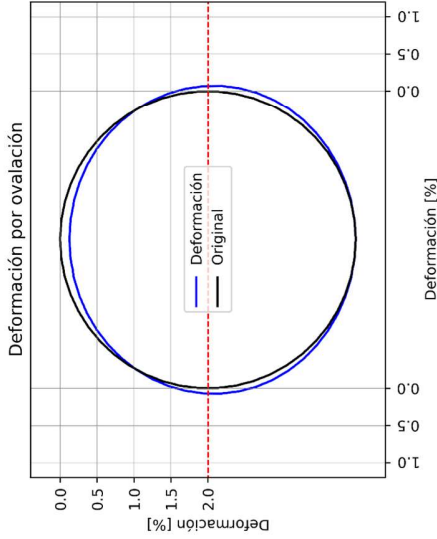
- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 76.2mm
- Ancho placa [D]: 1.5D
- Materia: Arena media
 - Peso unitario: 16 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa]: 20000
 - Angulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa]: 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-1.5D-1.5D-45°

Datos del modelo

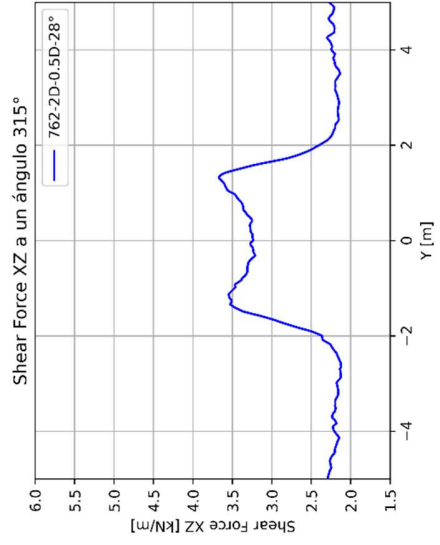
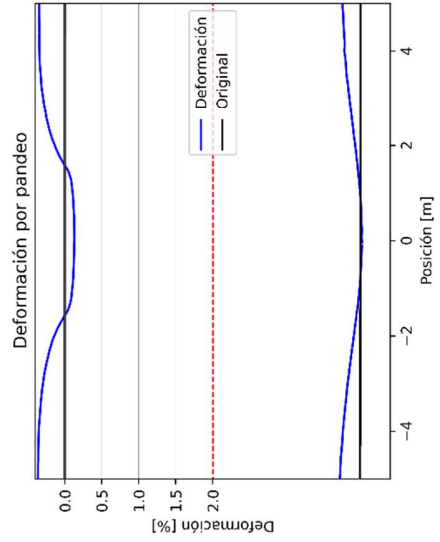
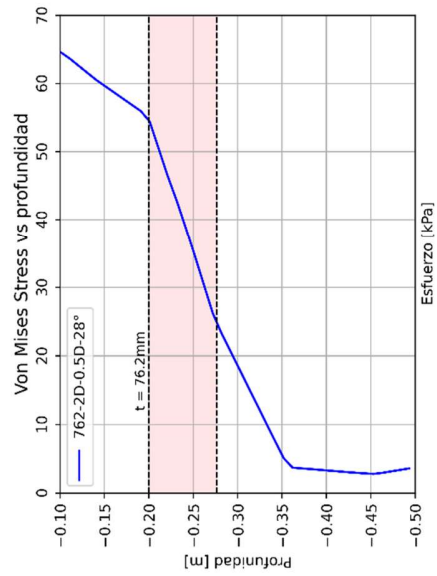
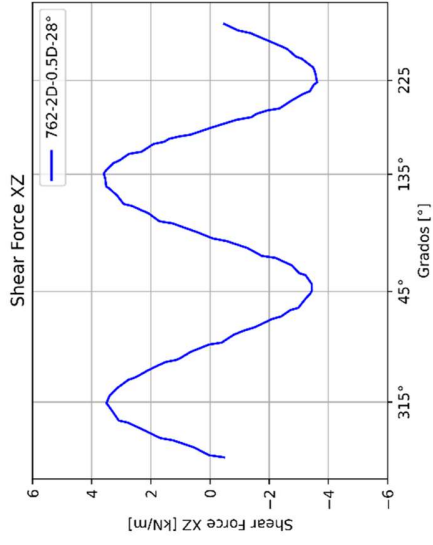
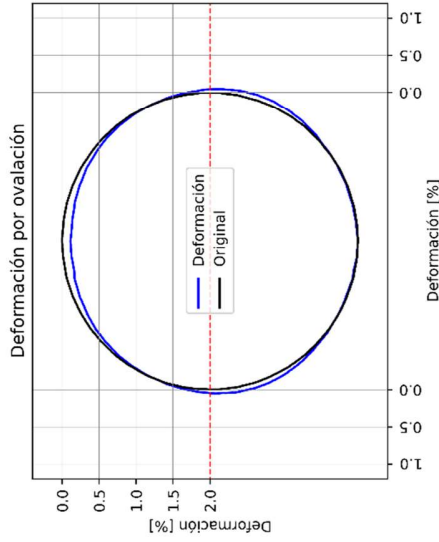
Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 1.5D
 Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 762-2D-0.5D-28°

Datos del modelo

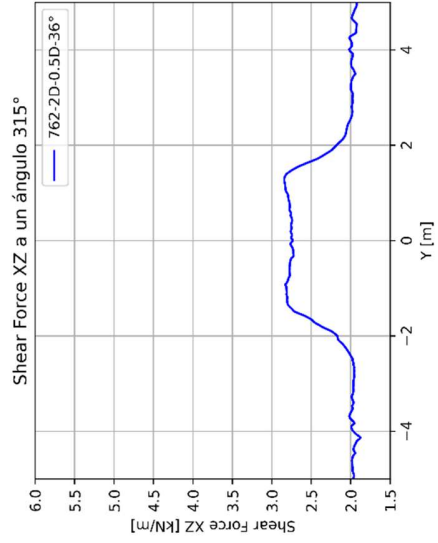
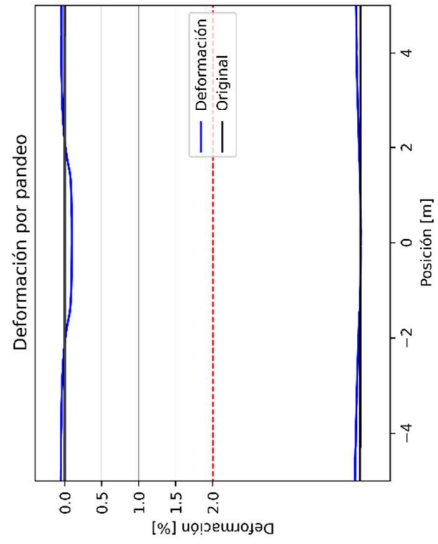
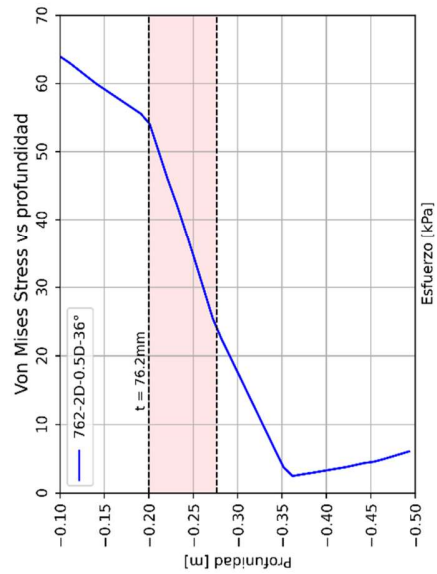
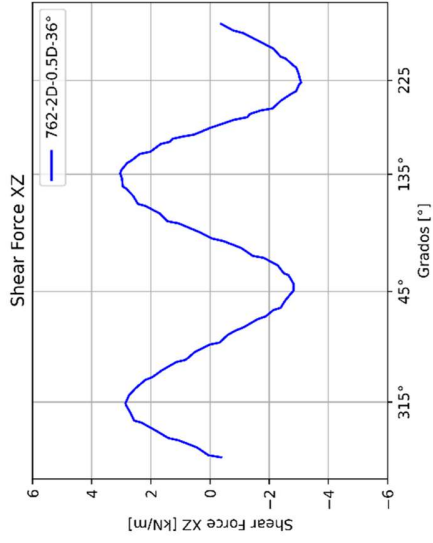
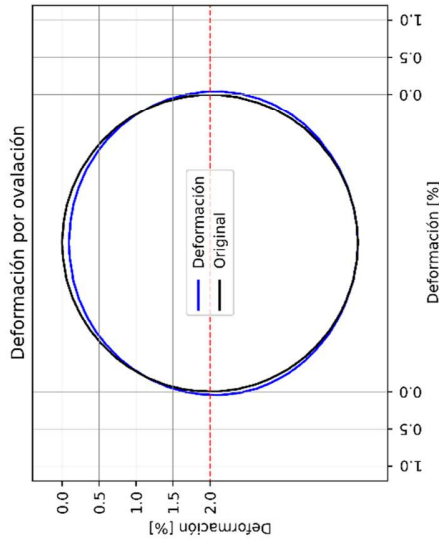
Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 2D
 Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Angulo de fricción: 28°
 Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81
 Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-2D-0.5D-36°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 76.2mm
- Ancho placa [D]: 2D
- Material: Arena media
- Peso unitario: 16 [kN/m³]
- Relación de poisson: 0.3
- Módulo de Young [kPa]: 20000
- Angulo de fricción: 36°
- Tubería: PVC
- Módulo de Young [MPa]: 2800
- Relación de poisson: 0.4
- Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-2D-0.5D-45°

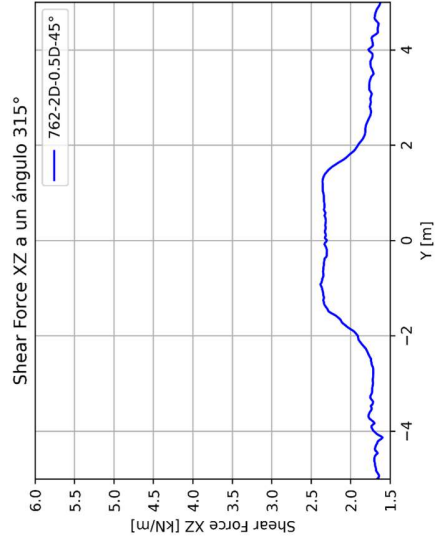
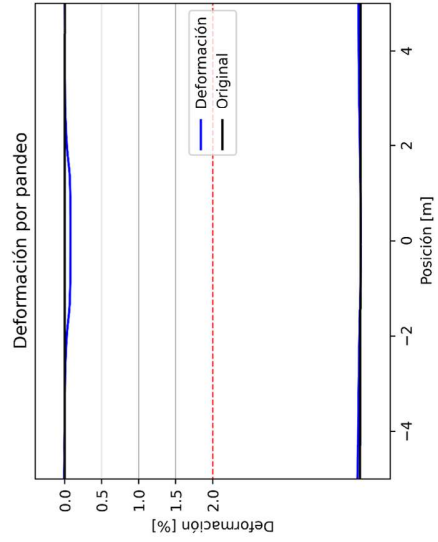
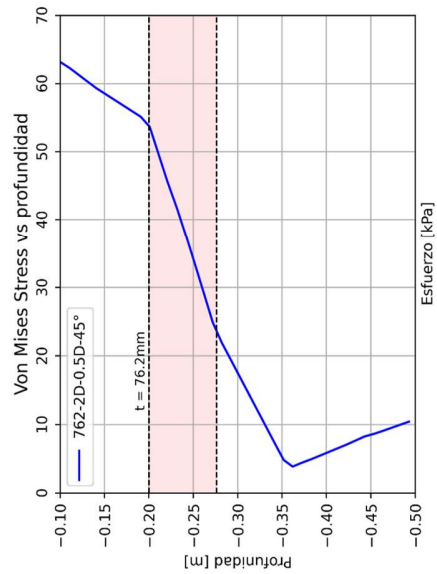
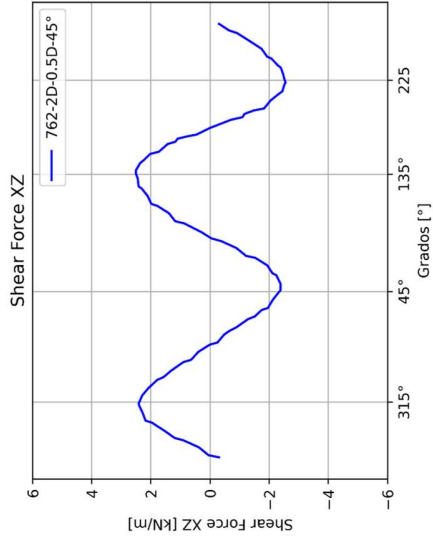
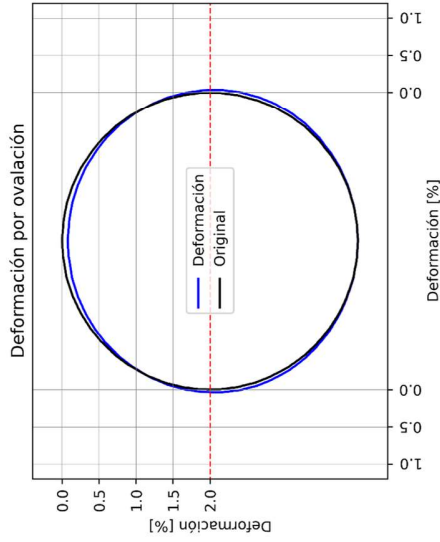
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-2D-1D-28°

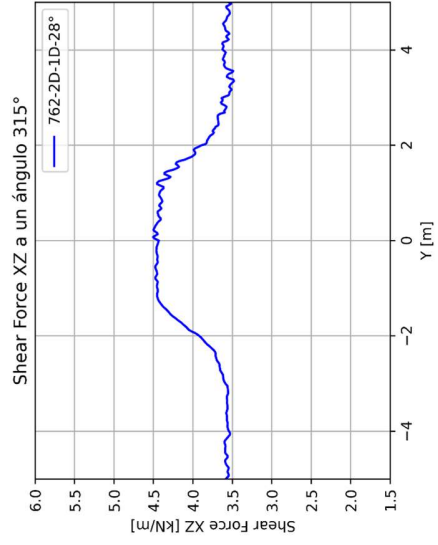
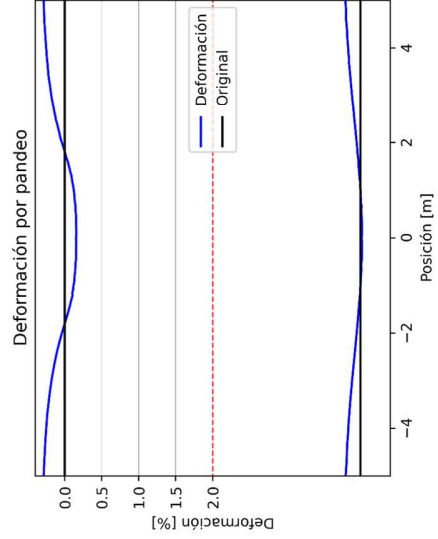
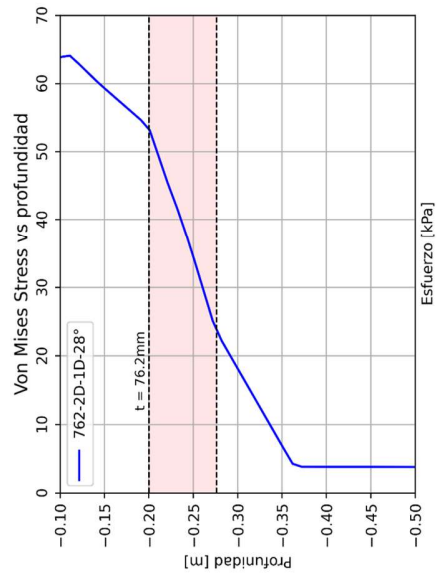
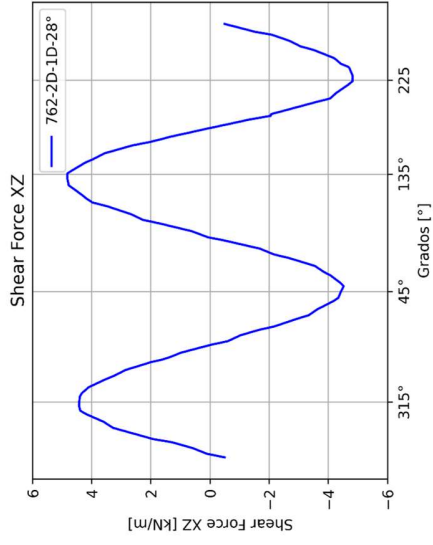
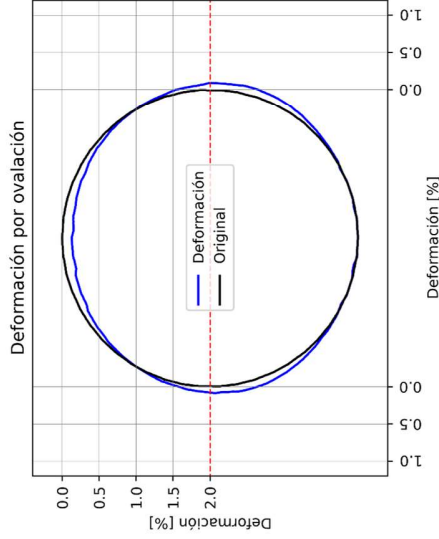
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena suelta
 Peso unitario: 13 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 5000
 Ángulo de fricción: 28°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 762-2D-1D-36°

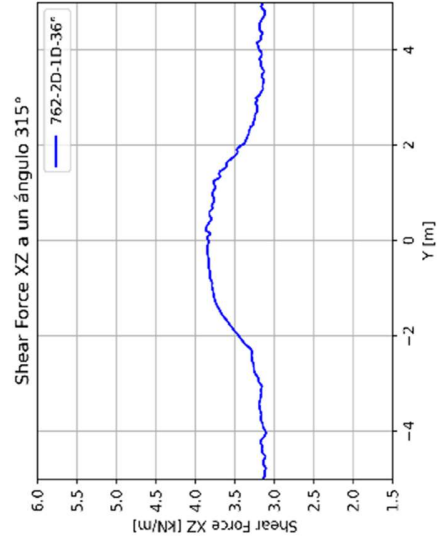
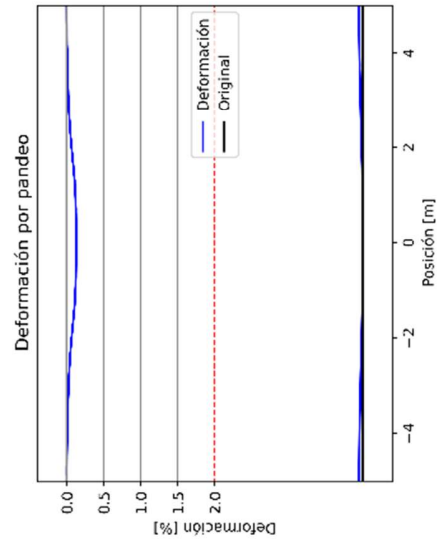
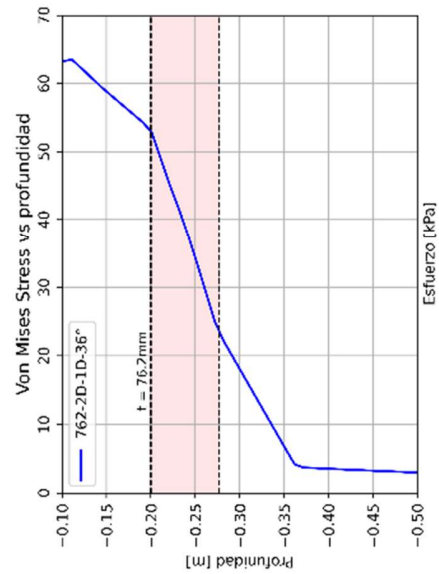
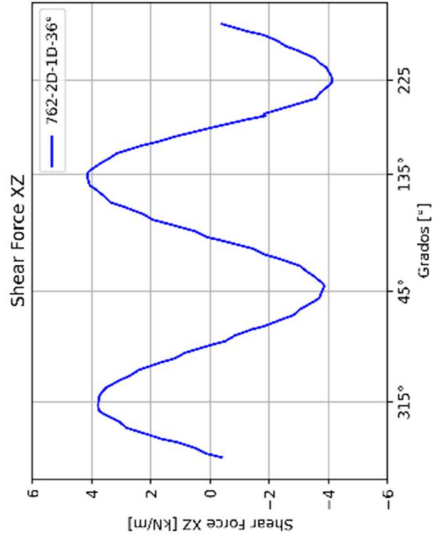
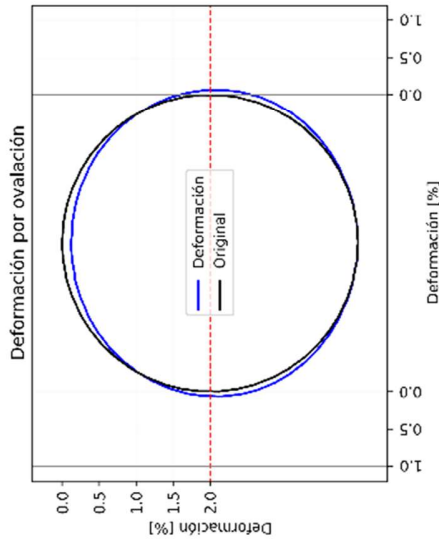
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1D



MODELO: 762-2D-1D-45°

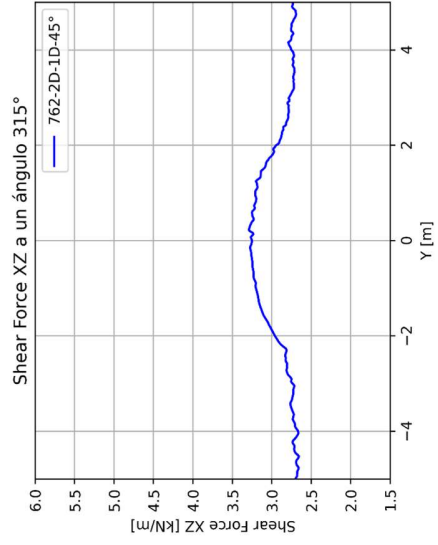
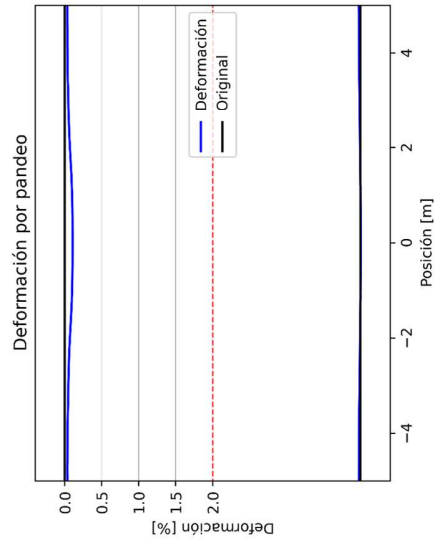
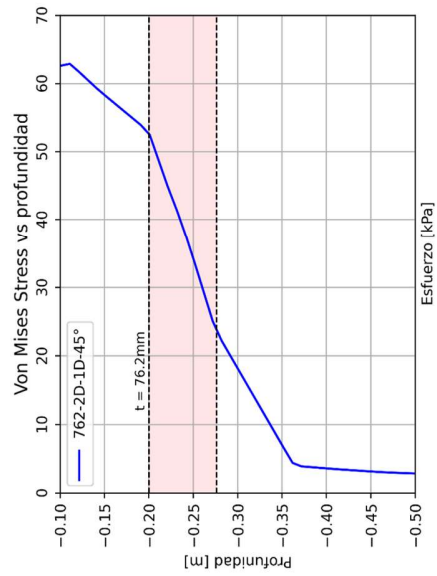
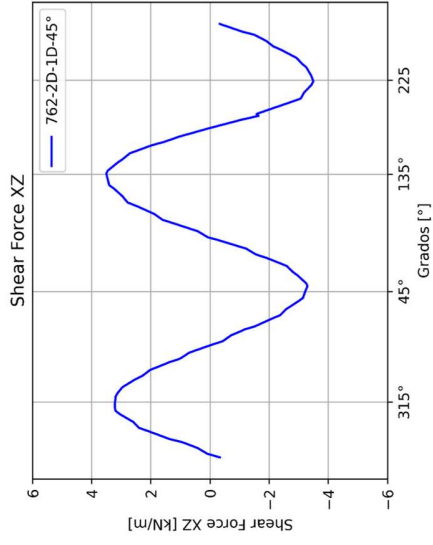
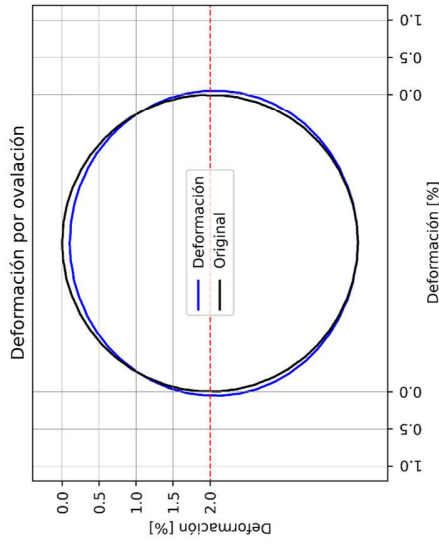
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

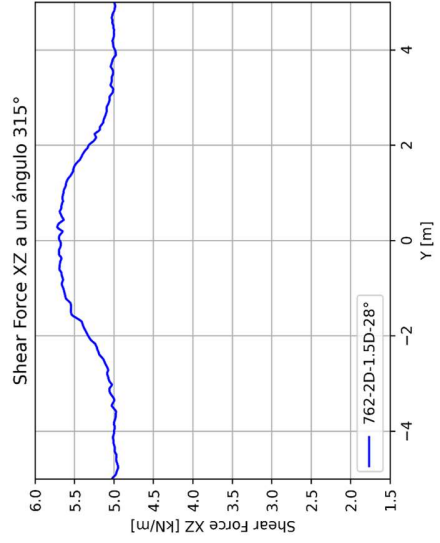
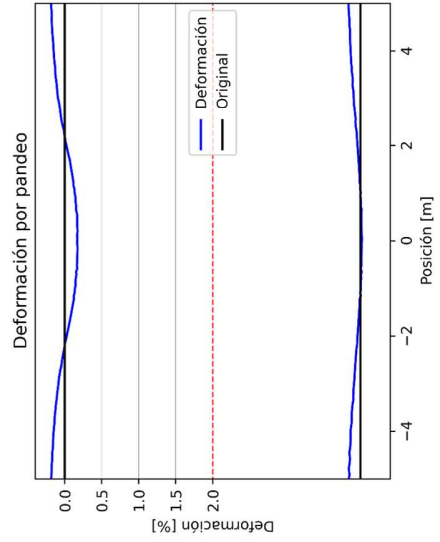
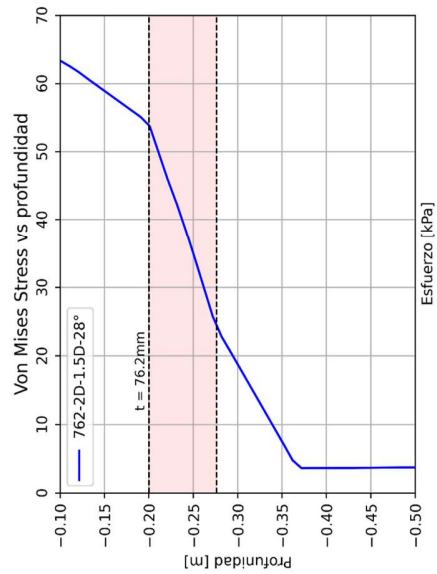
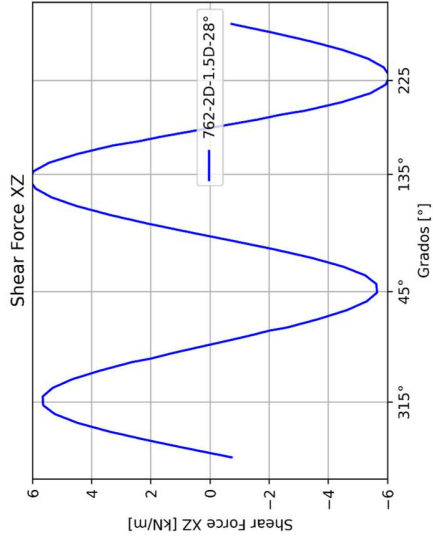
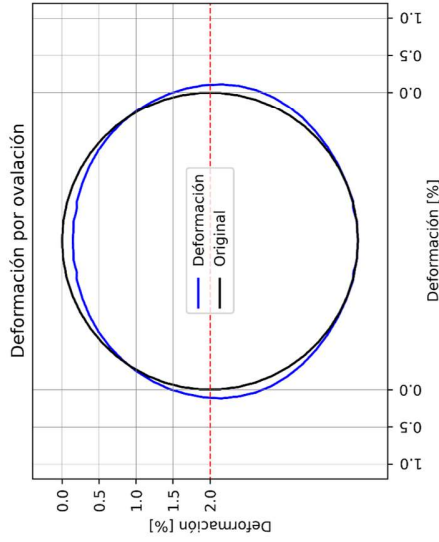
Profundidad [D]: 1D



MODELO: 762-2D-1.5D-28°

Datos del modelo

- Radio [D]: 1D
- Protección: Con protección
- Espesor placa [t]: 76.2mm
- Ancho placa [D]: 2D
- Material: Arena suelta
 - Peso unitario: 13 [kN/m³]
 - Relación de poisson: 0.3
 - Módulo de Young [kPa]: 5000
 - Angulo de fricción: 28°
- Tubería: PVC
 - Módulo de Young [MPa]: 2800
 - Relación de poisson: 0.4
 - Espesor [mm]: 3.81
- Profundidad [D]: 1.5D



MODELO: 762-2D-1.5D-36°

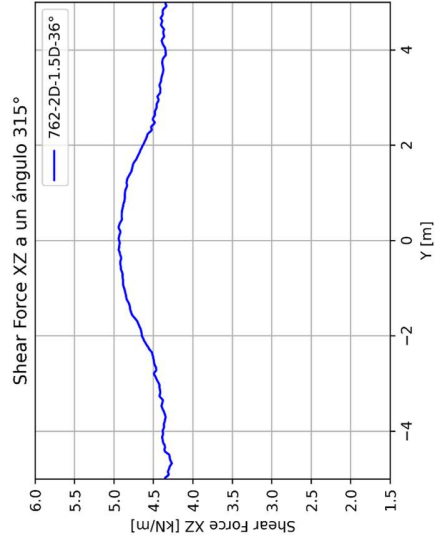
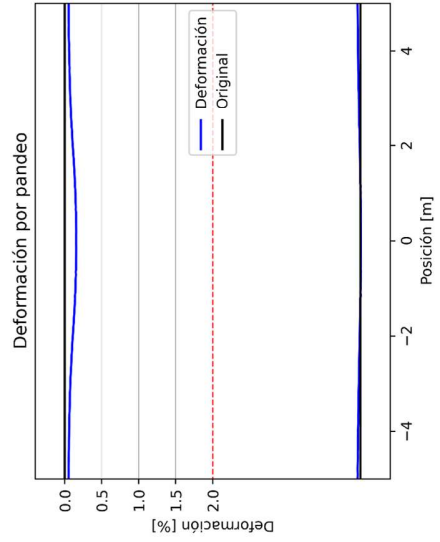
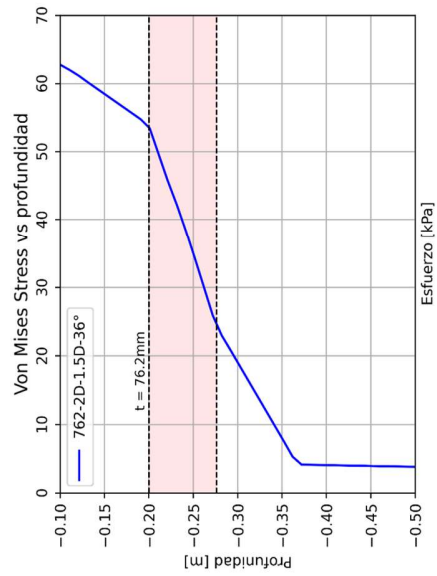
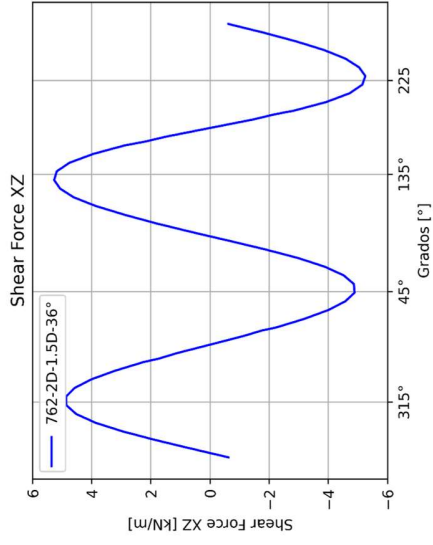
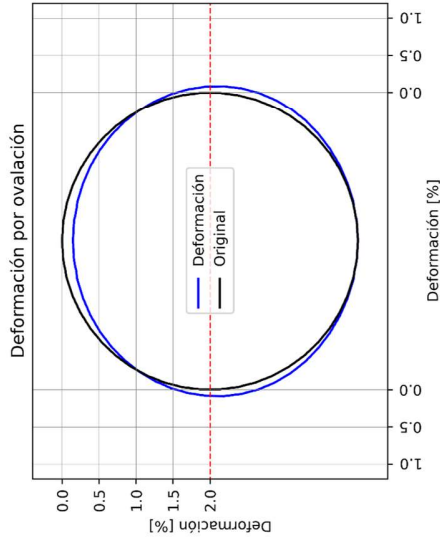
Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Material: Arena media
 Peso unitario: 16 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 20000
 Angulo de fricción: 36°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 0.5D



MODELO: 762-2D-1.5D-45°

Datos del modelo

Radio [D]: 1D
 Protección: Con protección
 Espesor placa [t]: 76.2mm
 Ancho placa [D]: 2D

Materia: Arena densa
 Peso unitario: 19 [kN/m³]
 Relación de poisson: 0.3
 Módulo de Young [kPa]: 40000
 Angulo de fricción: 45°

Tubería: PVC
 Módulo de Young [MPa]: 2800
 Relación de poisson: 0.4
 Espesor [mm]: 3.81

Profundidad [D]: 1.5D

