

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

Análisis numérica de los ductos submarinos sobre los sleepers curvos frente a los tradicionales para disminuir el pandeo lateral

Para obtener el título profesional de Ingeniero Naval.

Elaborado por

Angelo Eduardo Pacheco Huaman

 [0009-0001-0692-3864](https://orcid.org/0009-0001-0692-3864)

Asesor

Dr. Juan José Uchuya López

 [0000-0002-6810-1065](https://orcid.org/0000-0002-6810-1065)

LIMA – PERÚ

2024

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi esposa y mis amados hijos de quienes siempre cuento el apoyo y la confianza. Además, a mis amigos y colegas en el SIMA Callao, quienes fueron un pilar importante en mi desarrollo profesional.

Angelo Pacheco

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, quien ha sido, es y será la guía y refugio en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi madre, padre y hermanos que me brindan su amor y apoyo incondicional.

También, a mi asesor, el Dr. Juan José Uchuya López, por sus enseñanzas, apoyo y tiempo brindado en la elaboración de esta tesis.

Por último, quiero agradecer a mis amigos de la universidad y compañeros de trabajo de los cuales he aprendido y mejorado en el ámbito académico y profesional.

Resumen

Este estudio aborda el análisis de los ductos submarinos sobre sleepers curvos, una forma crítica de infraestructura submarina utilizada en el transporte de fluidos a través de grandes distancias en entornos marinos. El problema se centra en comprender el comportamiento estructural de estos ductos y los factores que influyen en su rendimiento en condiciones extremas. El objetivo general es analizar numéricamente los ductos submarinos sobre los sleepers curvos frente a los tradicionales para disminuir el pandeo lateral respecto a la geometría del sleeper, la presión interna y la carga térmica del ducto afectan el pandeo lateral de este último. Para lograr este objetivo, se desarrolla una metodología que incluye la construcción de un modelo numérico, la selección de parámetros y condiciones de análisis, y la realización de simulaciones para evaluar el comportamiento estructural de los ductos submarinos sobre sleepers curvos. Los resultados obtenidos muestran que la geometría del sleeper, las imperfecciones laterales y la fricción entre el sleeper y el ducto tienen un impacto significativo en el pandeo lateral del ducto submarino. Además, se observa que las condiciones de carga térmica y la presión interna del ducto también influyen en su comportamiento estructural. El aporte de este trabajo radica en proporcionar una comprensión más profunda de los desafíos asociados con los ductos submarinos sobre sleepers curvos y en ofrecer recomendaciones para mejorar su diseño, construcción y operación en entornos marinos adversos.

Palabras claves: Sleepers, Ductos submarinos, pandeo lateral, geometría, imperfección y fricción.

Abstract

This study addresses the analysis of submarine pipelines on curved sleepers, a critical form of underwater infrastructure used in the transportation of fluids over long distances in marine environments. The problem focuses on understanding the structural behavior of these pipelines and the factors influencing their performance under extreme conditions. The general objective is to numerically analyze the lateral buckling of submarine pipelines on curved sleepers compared to traditional ones regarding the sleeper geometry, internal pressure, and thermal load of the pipeline affecting the lateral buckling of the latter. To achieve this objective, a methodology is developed that includes the construction of a numerical model, the selection of parameters and analysis conditions, and the conduct of simulations to evaluate the structural behavior of submarine pipelines on curved sleepers. The results obtained show that the sleeper geometry, lateral imperfections, and friction between the sleeper and the pipeline have a significant impact on the lateral buckling of the submarine pipeline. Additionally, it is observed that thermal loading conditions and internal pressure of the pipeline also influence its structural behavior. The contribution of this work lies in providing a deeper understanding of the challenges associated with submarine pipelines on curved sleepers and offering recommendations to improve their design, construction, and operation in adverse marine environments.

Keywords: Sleepers, Submarine pipelines, lateral buckling, geometry, imperfection and frictio.

Introducción

En el vasto océano de desafíos que enfrenta la ingeniería submarina, los ductos submarinos desempeñan un papel fundamental en el transporte seguro y eficiente de fluidos a través de grandes distancias. Estos conductos, que yacen bajo las aguas profundas, representan una infraestructura crítica para la industria energética y otros sectores clave. Sin embargo, su diseño, construcción y operación están sujetos a una serie de desafíos técnicos y ambientales que requieren una comprensión profunda y precisa para garantizar su integridad estructural y su funcionamiento confiable en condiciones extremas.

En este contexto, el presente trabajo de tesis se adentra en el análisis de los ductos submarinos sobre sleepers curvos, explorando su comportamiento estructural y los factores que influyen en su rendimiento en entornos marinos adversos. Con un enfoque multidisciplinario que abarca aspectos de la ingeniería estructural, la mecánica de materiales y la oceanografía, esta investigación busca arrojar luz sobre los desafíos y soluciones asociados con esta forma particular de infraestructura submarina.

En el desarrollo de este trabajo, la presente tesis se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo I: Parte introductoria del trabajo: Este capítulo establece el contexto general del estudio, proporcionando una visión panorámica de la problemática que motiva la investigación. Se describen las generalidades del tema, enfatizando la importancia de abordar los desafíos asociados con los ductos submarinos sobre sleepers curvos. Se

identifican tanto el problema general como los problemas específicos que se abordarán a lo largo del trabajo. Además, se establecen los objetivos de la investigación, tanto el objetivo general como los objetivos específicos que guiarán el desarrollo del estudio. Finalmente, se ofrece una revisión de los antecedentes investigativos relevantes que respaldan la importancia y la necesidad de abordar esta problemática.

Capítulo II: Marco Teórico: En este capítulo se presenta un marco teórico detallado que abarca diversos aspectos relacionados con los ductos submarinos, desde su relevancia en el transporte de fluidos hasta los desafíos técnicos, ambientales y sociales asociados con su diseño y operación. Se destacan las ventajas técnicas y económicas del transporte por ductos submarinos, así como los desafíos y soluciones tecnológicas para resistir condiciones extremas. Además, se exploran los impactos ambientales y las consideraciones de sostenibilidad, junto con aspectos geopolíticos y sociales relevantes. También se analizan los enfoques del estudio estructural de los ductos submarinos, incluyendo la formulación matemática y los modelos analíticos utilizados en la investigación.

Capítulo III: Hipótesis y operacionalización de variables: En este capítulo se formulan las hipótesis que orientarán la investigación, tanto la hipótesis general como las hipótesis específicas que se proponen verificar a lo largo del estudio. Además, se detalla la operacionalización de las variables, es decir, cómo se medirán y cuantificarán las variables relevantes para el análisis de los ductos submarinos sobre sleepers curvos.

Capítulo IV: Metodología de investigación: En este capítulo se describe la metodología utilizada para llevar a cabo la investigación. Se especifica el tipo y nivel de la investigación, así como la unidad de análisis. Se justifica la investigación y se presenta una matriz de consistencia que establece la relación entre los objetivos, las hipótesis y los métodos utilizados en el estudio.

Capítulo V: Desarrollo del trabajo de investigación: En este capítulo se detalla el desarrollo de la investigación, incluyendo la descripción de las partes del modelo numérico

utilizado, las propiedades mecánicas y parámetros de operación considerados, así como las condiciones de contorno y de contacto. Se explican los pasos de análisis de carga, la selección del método de estabilización y el análisis de malla. Además, se determina el tamaño del modelo utilizado en la investigación.

Capítulo VI: Análisis y discusión de resultados: Este capítulo constituye el núcleo del trabajo, donde se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir del análisis de los ductos submarinos sobre sleepers curvos. Se abordan aspectos como los diámetros de los sleepers, las imperfecciones laterales, la fricción entre el sleeper y el ducto, los efectos de los ciclos térmicos, y el aporte del trabajo de tesis al campo de la ingeniería submarina.

Finalmente, se presentan las conclusiones derivadas de la investigación, así como las recomendaciones para futuros estudios o aplicaciones prácticas en el diseño, construcción y operación de ductos submarinos sobre sleepers curvos. Se ofrece una reflexión y recomendación sobre los hallazgos y su relevancia en el contexto más amplio de la ingeniería submarina.

Tabla de contenido

<i>Dedicatoria</i>	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Introducción	vi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Realidad problemática	2
1.2.1 Problema General	9
1.2.2 Problemas Específicos	9
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo General.....	9
1.3.2 Objetivos Específicos	10
1.4 Antecedentes investigativos	10
Capítulo II. Marco teórico	18
2.1 Relevancia del transporte por ductos submarinos.....	18
2.1.1 Ventajas Técnicas y Económicas: Eficiencia y Rentabilidad.....	18
2.1.2 Desafíos y Soluciones Tecnológicas: Resistencia a Condiciones Extremas .	19
2.1.3 Consideraciones Ambientales y Sostenibilidad: Impacto y Mitigación.....	19
2.1.4 Importancia Geoeconómica y Geopolítica: Acceso a Mercados y Seguridad Energética	19
2.1.5 Desarrollos Tecnológicos y Futuras Tendencias: Innovación y Sostenibilidad	20
2.1.6 Consideraciones Sociales y Comunitarias: Participación y Responsabilidad Social	20

2.2 Desafíos de ductos submarinos con las presiones y temperaturas	20
2.2.1 Presiones Extremas: Desafíos para la Integridad Estructural	20
2.2.2 Efectos Térmicos: Adaptación a Temperaturas Extremas.....	21
2.2.3 Estrategias para Resistir Condiciones Ambientales Extremas: Materiales y Diseño	21
2.2.4 Tecnologías de Monitoreo y Mantenimiento: Garantizando la Operación Segura.....	21
2.2.5 Impactos en la Vida Marina: Consideraciones Ambientales y Éticas	21
2.2.6 Desarrollos Futuros y Tendencias: Innovación en la Adaptación	22
2.3 Enfoques del estudio estructural de ductos submarinos	22
2.3.1 Análisis Tradicional de Elementos Finitos: Modelado Detallado de la Estructura	22
2.4 Formulación matemática.....	22
2.4.1 Análisis de pandeo lateral de vigas en superficie plana	23
2.4.2 Análisis de pandeo lateral de ductos submarinos ideales	25
2.4.3 Análisis de pandeo vertical de ductos submarinos ideales.....	27
2.5 Modelo analítico bidimensional vertical.....	32
Capítulo III. Hipótesis y operacionalización de variables.....	39
3.1 Formulación de hipótesis	39
3.1.1 Hipótesis general.....	39
3.1.2 Hipótesis específicas	39
3.2 Operacionalización de variables	39
Capítulo IV. Metodología de la investigación	41
4.1 Tipo y nivel de la investigación	42
4.1.1 Tipo de investigación.....	42
4.1.2 Nivel de la investigación	42
4.2 Unidad de análisis	42
4.3 Justificación de la investigación	43

4.4 Matriz de consistencia	45
Capítulo V. Desarrollo del trabajo de investigación	46
5.1 Partes del modelo numérico	48
5.2 Propiedades mecánicas y parámetros de operación.....	49
5.3 Condiciones de contorno	50
5.4 Condiciones de contacto.....	50
5.5 Pasos de análisis de carga	52
5.6 Selección del método de estabilización	54
5.7 Análisis de malla.....	56
5.8 Determinación del tamaño del modelo.....	61
Capítulo VI. Análisis y discusión de resultados	64
6.1 Resultados de los diámetros de sleepers	64
6.2 Resultados de las imperfecciones laterales	69
6.3 Resultados del análisis de fricción	71
6.3.1 Fricción lateral sleeper-ducto.....	71
6.3.2 Fricción lateral suelo-ducto.....	72
6.3.3 Fricción axial suelo-ducto	74
6.4 Resultados del análisis de ciclos térmicos	76
6.5 Aporte del trabajo tesis	78
Conclusiones	80
Recomendaciones	82
Referencias Bibliográficas	83

Lista de Figuras

Figura 1.1 Sistema de líneas de transporte de petróleo	3
Figura 1.2 Proceso de Butting-bimetal-pipe	4
Figura 1.3 Proceso de Clad Pipe	5
Figura 1.4 Configuración Snake Lay	6
Figura 1.5 Configuración Distributed boyancy.....	6
Figura 1.6 Estructura de un sleeper tradicional utilizado en Pipeline.....	7
Figura 2.1 Notación y convención utilizada para un riel de tren	24
Figura 2.2 Distribución de fuerzas antes y después del pandeo lateral del riel	24
Figura 2.3 Definición de la longitud del alza de pandeo L y modos.....	26
Figura 2.4 Detalles del modelo vertical sobre un fondo rígido	28
Figura 2.5 Característica de la fricción axial.....	29
Figura 2.6 Configuración y distribución de fuerzas axiales de un pandeo vertical de fondo suave.....	30
Figura 2.7 Distribución de la fuerza a lo largo del ducto.....	31
Figura 2.8 Problema a ser resuelto analíticamente.....	32
Figura 2.9 Fuerza y momentos actuantes en una sección infinitesimal del ducto.....	33
Figura 5.1 Sección transversal del ducto submarino	48
Figura 5.2 Comportamiento del material elástico perfectamente plástico.....	49
Figura 5.3 Representación de la simetría en el modelo numérico	51
Figura 5.4 Asentamiento del ducto no fondo marino (suelo)	52
Figura 5.5 Levantamiento do sleeper en el nodo de simetría.....	53
Figura 5.6 Desviación lateral a lo largo del ducto por FDE.....	54
Figura 5.7 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por FDE.....	55
Figura 5.8 Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por FDE	55
Figura 5.9 Representación de elementos en la malla del ducto	56

Figura 5.10 Desviación lateral a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región A	57
Figura 5.11 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región A.....	58
Figura 5.12 Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región A.....	58
Figura 5.13 Desviación lateral a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región B	59
Figura 5.14 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región B	60
Figura 5.15 Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región B.....	60
Figura 5.16 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto de diámetro 1m	62
Figura 5.17 Tensión axial en la sección a lo largo del ducto de diámetro 1m.....	62
Figura 5.18 Desviación lateral a lo largo del ducto de diámetro 1m	63
Figura 6.1 Dimensiones del Sleeper tradicional	65
Figura 6.2 Dimensiones del Sleeper curvo.....	65
Figura 6.3 Vista longitudinal del sleeper de la forma ax^2	66
Figura 6.4 Desviación lateral a lo largo del ducto por diámetro sleepers.....	66
Figura 6.5 Desviación vertical a lo largo del ducto por diámetro sleepers	67
Figura 6.6 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por diámetro sleepers.....	67
Figura 6.7 Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por diámetro sleepers	68
Figura 6.8 Tensión Mises en la sección a lo largo del ducto por diámetro sleepers	68
Figura 6.9 Desviación lateral a lo largo del ducto por imperfección lateral	69
Figura 6.10 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por imperfección lateral	70
Figura 6.11 Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por imperfección lateral.....	70
Figura 6.12 Desviación lateral a lo largo del ducto por fricción lateral sleeper-ducto.....	71

Figura 6.13 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por fricción lateral sleeper- ducto.....	72
Figura 6.14 Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por fricción lateral sleeper- ducto.....	72
Figura 6.15 Desviación lateral a lo largo del ducto por fricción lateral suelo-ducto	73
Figura 6.16 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por fricción lateral suelo- ducto.....	73
Figura 6.17 Tensión axial en la sección a lo largo del ducto suelo-ducto	74
Figura 6.18 Desviación lateral a lo largo del ducto por fricción axial suelo-ducto	75
Figura 6.19 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por fricción axial suelo- ducto.....	75
Figura 6.20 Tensión axial a en la sección a lo largo del ducto por fricción axial suelo- ducto.....	76
Figura 6.21 Desviación lateral a lo largo del ducto.....	77
Figura 6.22 Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto.....	77
Figura 6.23 Tensión axial en la sección a lo largo del ducto	78

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Constante para modos de pandeo lateral.....	27
Tabla 3.1 Matriz de operacionalización de variables.....	40
Tabla 4.1 Matriz de consistencia.....	45
Tabla 5.1 Constante para modos de pandeo lateral.....	49
Tabla 5.2 Parámetros operacionales.	49
Tabla 5.3 Condiciones de contorno.....	50
Tabla 5.4 Relación de coeficientes de fricción.	51
Tabla 5.5 Representación de fricción durante la programación ABAQUS.....	52
Tabla 5.6 Separaciones de elementos en la Región A.....	56
Tabla 5.7 Separación de elementos en la Región B.	57
Tabla 5.8 Separaciones de elementos en el trabajo.	61

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

Los ductos submarinos son una parte vital de la infraestructura utilizada en la industria petrolera para transportar hidrocarburos desde los yacimientos submarinos hasta las instalaciones en tierra firme. Estas estructuras, ubicadas en entornos marinos complejos y a menudo hostiles, enfrentan una variedad de desafíos estructurales que comprometen su integridad y funcionamiento. Uno de estos desafíos principales es el fenómeno del pandeo lateral.

El pandeo lateral se refiere a la deformación lateral o flexión que experimentan los ductos bajo ciertas condiciones de carga y entorno. Este fenómeno es causado por una variedad de factores, incluidas las fuerzas hidrodinámicas, la presión interna del fluido transportado, las condiciones del lecho marino y la acción de las corrientes marinas. A medida que los ductos submarinos son sometidos a estas fuerzas, es crucial comprender cómo responden y cómo se diseña y opera de manera óptima para garantizar su estabilidad y seguridad.

En este contexto, surgen los sleepers como elementos esenciales de soporte para los ductos submarinos. Los sleepers son estructuras diseñadas para sostener y proteger los ductos en el lecho marino, distribuyendo las cargas y proporcionando estabilidad adicional. Dos tipos comunes de sleepers son los curvos y los tradicionales, cada uno con características geométricas y mecánicas distintas que influyen en su capacidad para resistir el pandeo lateral y mantener la integridad del sistema.

Este estudio se centra en el análisis numérico del pandeo lateral de los ductos submarinos sobre sleepers curvos en comparación con los tradicionales. Al investigar cómo estos diferentes tipos de soportes afectan el comportamiento estructural de los ductos, se busca mejorar la comprensión de los factores que influyen en su estabilidad y rendimiento. Esto, a su vez, informa el diseño, la operación y el mantenimiento de ductos submarinos más seguros y eficientes en la industria petrolera.

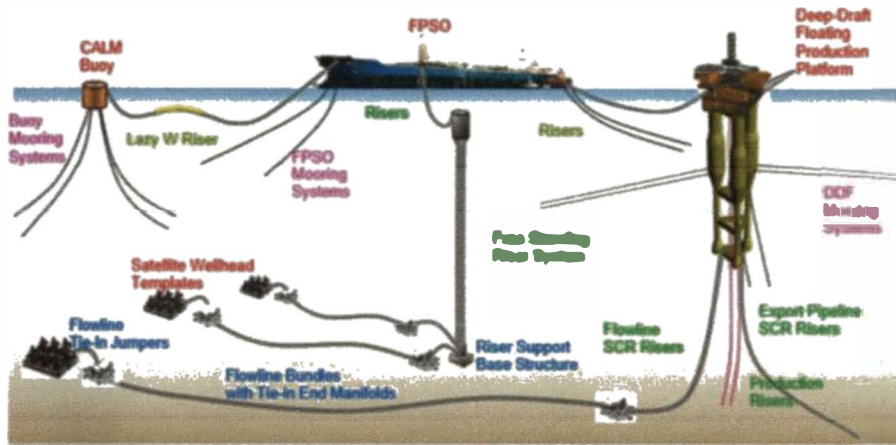
1.2 Realidad problemática

En la actualidad, la exploración y explotación de hidrocarburos offshore representan un desafío significativo para las empresas petroleras a nivel mundial. Estas empresas enfrentan la necesidad de realizar inversiones masivas en tecnología e infraestructura para gestionar eficientemente la explotación offshore. Este entorno presenta desafíos particulares debido a variables geográficas en zonas marítimas, posibles impactos en ecosistemas y las dificultades inherentes que generan costos elevados de montaje y operación de las estructuras petrolíferas en ubicaciones marítimas alejadas de la costa. Regiones con alta actividad en producción offshore incluyen el Golfo de México, el Mar del Norte, el Mar de China, el Oeste de África y el Mar de Brasil.

En este escenario, uno de los desafíos destacados para la industria petrolera es el pandeo de ductos rígidos submarinos que transportan hidrocarburos a lo largo del fondo marino irregular. Este fenómeno es causado por la extracción de petróleo a altas temperaturas, siendo conducido a través de líneas submarinas, como se ilustra en la Figura 1.1. La temperatura en el fondo marino ronda los 5 °C a 6 °C, y el petróleo que fluye a través de los ductos provoca variaciones de temperatura que resultan en pandeos a lo largo de las líneas submarinas, llevando a la generación de fallas estructurales tales como colapso hidrostático, fatiga y ruptura del recubrimiento anticorrosivo.

Figura 1.1

Sistema de líneas de transporte de petróleo



Nota: fuente Amaechi et al. (2023)

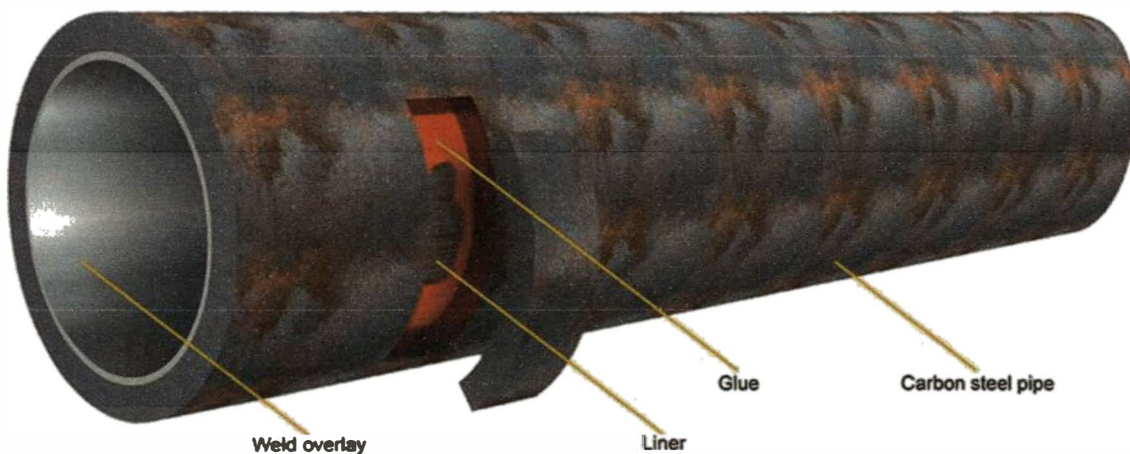
La parte del ducto en suspensión que conecta a la plataforma es conocida como riser en el caso de ductos flexibles, mientras que el tramo en contacto directo con el suelo se denomina ducto submarino para ductos rígidos (pipeline o flowline). Los ductos flexibles se emplean típicamente en aplicaciones dinámicas en plataformas fluctuantes. Su estructura consta de capas concéntricas de materiales metálicos y está revestida con material polimérico. En contraste, los ductos rígidos se utilizan en tramos suspendidos que conectan líneas de producción submarina a plataformas, debido a su alta rigidez y resistencia a cargas axiales, radiales y de flexión. La estructura de un ducto rígido es menos compleja que la de un ducto flexible y se fabrica mediante procesos de soldadura como Submerged Arc Welded (SAW), Electrical Resistance Welded (ERW), High Frequency Induction (HFI) Welded o High Frequency Welded (HFW), o mecánicamente mediante Seamless (SMLS).

Este contexto destaca la complejidad y la importancia de comprender los desafíos estructurales específicos que enfrentan los ductos submarinos, particularmente en relación con el pandeo lateral y sus consecuencias potenciales en términos de fallas y pérdida de integridad estructural. Un ducto rígido es revestido contra la corrosión mediante dos tipos de procesos:

1. **Lined Pipe** representa una innovación en los revestimientos mecánicos utilizados en ductos submarinos. Este revestimiento se produce mediante el proceso de Butting-bimetal-pipe, que implica la unión de dos ductos: uno con un material interno altamente resistente a la corrosión y otro externo fabricado con acero resistente (Figura 1.2). La técnica consiste en expandir hidráulicamente el ducto interno, quedando atrapado entre los dos materiales. Posteriormente, se recubre el ducto externo con capas de material polimérico para proporcionar protección adicional.

Figura 1.2

Proceso de Butting-bimetal-pipe

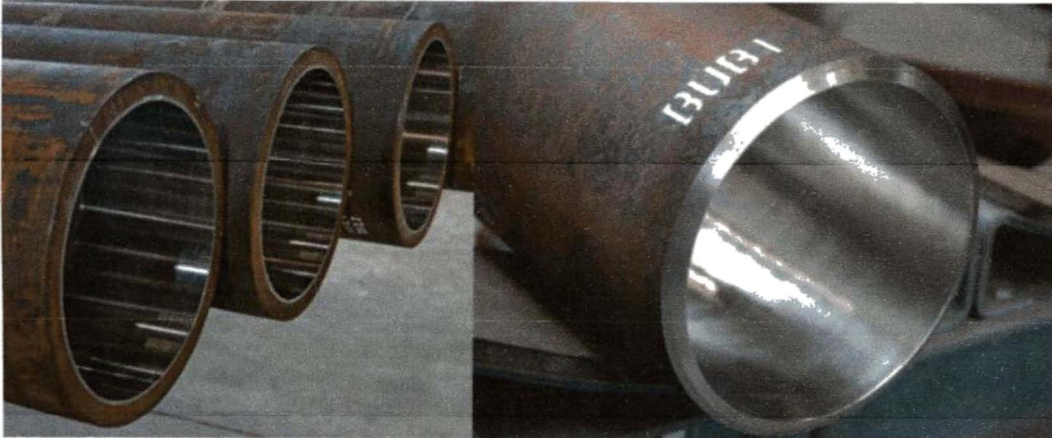


Nota: fuente Butting.com

2. **Clad Pipe**, que se caracteriza por ser un revestimiento metalúrgico, producido mediante los procesos de clad Steel plate y welded clad Steel plate. En el primer proceso, se fabrican chapas de acero resistente a la corrosión, mientras que el segundo implica el rolado de estas chapas fabricadas. Este enfoque metalúrgico confiere una capa adicional de resistencia y durabilidad al ducto submarino, especialmente en entornos corrosivos y desafiantes

Figura 1.3

Proceso de Clad Pipe



Nota: fuente Butting.com

La operación de ductos submarinos enfrenta una serie de desafíos asociados a cargas operacionales, particularmente en situaciones de elevadas presiones y temperaturas. Estas condiciones generan cargas axiales compresivas significativas debido a la fricción con el fondo submarino irregular, aumentando la probabilidad de pandeo en ductos submarinos utilizados para el transporte de petróleo. Las cargas operacionales, combinadas con las imperfecciones inherentes, complican el control del pandeo, ya que este fenómeno tiende a manifestarse en varios segmentos del ducto. Además, la ocurrencia repentina del pandeo representa un riesgo significativo para la integridad del ducto.

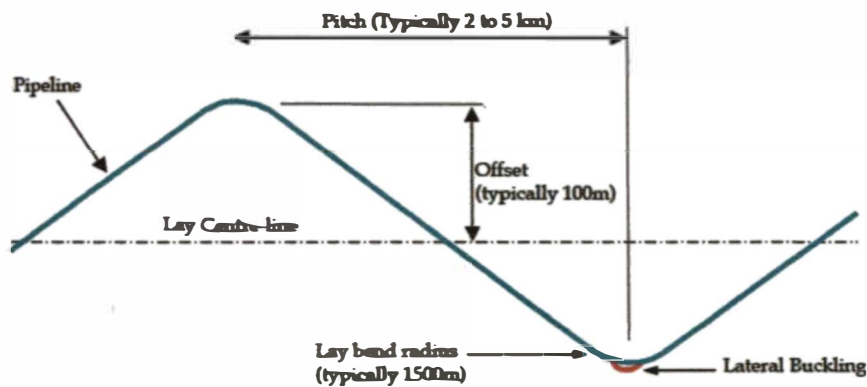
En este contexto, se recurre frecuentemente a técnicas de iniciación de pandeo, que buscan garantizar que el pandeo ocurra de manera controlada en puntos predefinidos del ducto. Estas técnicas se convierten en herramientas esenciales para comprender y mitigar los riesgos asociados al pandeo lateral en ductos submarinos. La complejidad de este problema radica en su naturaleza multifactorial, donde las condiciones operacionales, la fricción del fondo submarino y las variaciones en las propiedades de los materiales contribuyen de manera conjunta a la ocurrencia y propagación del pandeo.

En este sentido, se recurre con frecuencia a las técnicas de iniciación de pandeo, que buscan asegurar la ocurrencia de pandeo en algunos puntos del ducto previamente definidos como:

- **Snake Lay** que consiste en la instalación de ductos alternando espacio curvos y rectos para facilitar el control de pandeo lateral.

Figura 1.4

Configuración Snake Lay

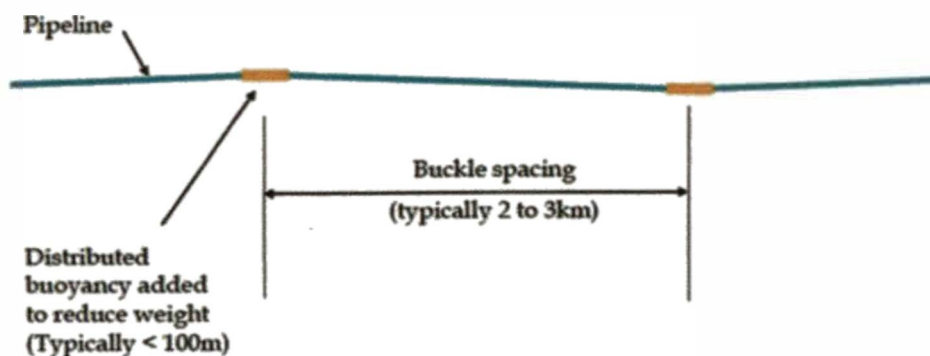


Nota: fuente Liu (2013)

- **Distributed buoyancy** que consiste en la estación de boyas a través de algunos puntos específicos del ducto para reducir la fuerza crítica de pandeo debido a la reducción del peso y fricción entre el fondo marino.

Figura 1.5

Configuración Distributed buoyancy



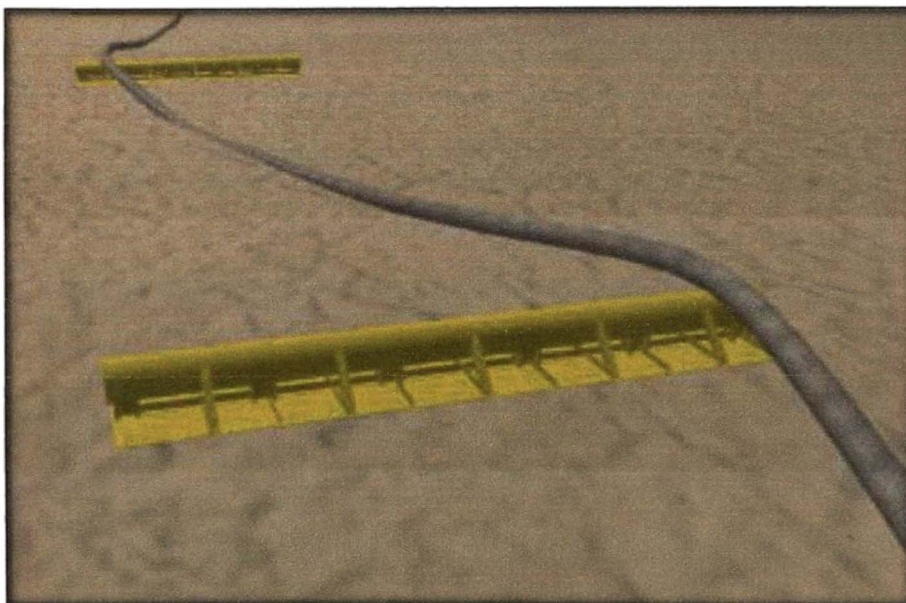
Nota: fuente Liu (2013)

- *Trench and bury* que consiste en hacer una socavación en el fondo marino para luego enterrar el ducto en él. Esto ayuda en la restricción de movimiento del ducto para prevenir la ocurrencia de pandeo lateral.
- *Expansion pool, sleeper, etc.*

El estudio del método de sleeper, ampliamente adoptado en la industria por sus supuestas eficacia, bajo costo y fácil fabricación, revela una serie de problemas y desafíos que plantean interrogantes sobre su idoneidad y seguridad en la operación de ductos submarinos. Este método, que se ha vuelto común en la industria, inicia con la creación de imperfecciones verticales en ubicaciones predefinidas a lo largo de la ruta de lanzamiento de los ductos. A través del lanzamiento de estructuras tubulares de 1 metro de diámetro transversalmente a la trayectoria de lanzamiento (Figura 1.6), se generan soportes para oleoductos, creando regiones propicias para el pandeo lateral. Aunque existen algunos trabajos relacionados con sleepers tubulares, como los de WANG, LIU y BAI, este trabajo propone una modificación en la forma geométrica del sleeper, revelando problemáticas adicionales.

Figura 1.6

Estructura de un sleeper tradicional utilizado en Pipeline



Nota: fuente Wang (2008)

A pesar de su amplia adopción, la eficacia del método de sleeper se torna cuestionable en este contexto de análisis numérico del pandeo lateral en ductos submarinos. La generación de imperfecciones verticales puede no ser suficientemente predictiva ni controlada, lo que plantea dudas sobre la capacidad de este método para inducir de manera efectiva el pandeo en regiones específicas.

La creación de regiones propicias al pandeo mediante la instalación de sleepers tubulares aumenta el riesgo inherente de fallas estructurales en los ductos submarinos. La modificación geométrica propuesta en este trabajo, lejos de ser una solución, podría intensificar este riesgo, ya que la alteración en la forma geométrica introduce nuevas tensiones y debilidades estructurales.

La introducción de imperfecciones verticales a través del método de sleeper plantea desafíos en términos de la precisión y confiabilidad de la predicción del pandeo lateral. La falta de control detallado sobre la generación de estas imperfecciones podría resultar en una respuesta impredecible del ducto submarino, complicando la tarea de evaluar y mitigar los riesgos asociados.

A pesar de su supuesto bajo costo, la fabricación y aplicación del método de sleeper conlleva costos ocultos y complejidades no inicialmente considerados. La necesidad de lanzar estructuras tubulares de 1 metro de diámetro transversalmente a la trayectoria de lanzamiento implica procesos logísticos y de fabricación adicionales, potencialmente aumentando los costos y la complejidad del proyecto.

La modificación propuesta en la forma geométrica del sleeper plantea dudas sobre la adaptabilidad del método a diferentes contextos y condiciones submarinas. Las variaciones en la topografía del lecho marino y las condiciones operativas hacen que el método de sleeper sea menos efectivo o incluso inaplicable en ciertos escenarios, limitando su utilidad generalizada.

Aunque se han realizado trabajos previos relacionados con sleepers tubulares, la propuesta de modificar la forma geométrica del sleeper introduce desafíos significativos en términos de validación experimental. La falta de evidencia empírica sólida genera incertidumbre sobre la eficacia y seguridad de esta modificación propuesta.

La creación de regiones propicias al pandeo mediante el método de sleeper compromete la integridad estructural general de los ductos submarinos. Las tensiones adicionales introducidas en el proceso podrían tener consecuencias imprevistas en términos de fatiga y durabilidad, lo que plantea serias preocupaciones sobre la fiabilidad a largo plazo de esta estrategia.

1.2.1 Problema General

¿Cómo afecta el uso de sleepers curvos en comparación con los tradicionales al pandeo lateral de los ductos submarinos, y cómo se analiza numéricamente esta influencia?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cuál es la influencia de la geometría del sleeper (curvo o tradicional) y del ducto submarino en el pandeo lateral de los ductos submarinos?
- ¿Cómo afectan la presión interna y la carga térmica del ducto submarino al pandeo lateral de los ductos submarinos?
- ¿En qué medida el modelo de simulación numérica proporciona insights significativos sobre el pandeo lateral de los ductos submarinos sobre sleepers curvos en comparación con los tradicionales?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar numéricamente los ductos submarinos sobre los sleepers curvos frente a los tradicionales para disminuir el pandeo lateral.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la geometría del sleeper curvo, sleeper tradicional y ducto submarino.
- Caracterizar el ducto submarino sometido a presión interna y carga térmica respecto al flujo de petróleo y la fuerza hidrostática en el fondo marino.
- Desarrollar un modelo de simulación numérica del comportamiento del ducto submarino sobre el sleeper curvo y tradicional dentro de un régimen elástico-plástico.

1.4 Antecedentes investigativos

Durante numerosos años, investigadores han dedicado atención al fenómeno de pandeo termomecánico. El autor pionero en este estudio fue Kerr (1978), quien identificó los cuatro primeros modos de pandeo lateral termomecánico en rieles de tren. Su enfoque incorporó principios de cálculo variacional, resolviendo ecuaciones diferenciales mediante la teoría de elasticidad y desplazamiento virtual. Utilizando la teoría de vigas, desarrolló formulaciones no lineales que han sentado las bases para comprender este fenómeno complejo. Este trabajo seminal ha influido en la investigación subsiguiente sobre el pandeo termomecánico, destacándose por su enfoque avanzado y metodología innovadora.

Hobbs (1984) presentó soluciones analíticas fundamentales para el pandeo lateral en ductos submarinos, abordando el primer modo y explorando infinitos modos ante diversas condiciones. Su enfoque consideró presiones internas y externas, así como la expansión térmica originada por el transporte de petróleo. Este trabajo pionero no solo identificó la distancia mínima de pandeo, sino que también estableció relaciones entre la longitud de pandeo y la fuerza axial, considerando una fricción lateral constante.

Hobbs no se limitó al primer modo, extendió su análisis a una variedad infinita de modos de pandeo lateral. Definió constantes analíticas que posibilitan soluciones detalladas para amplitudes y momentos máximos de flexión, utilizando el modelo

desarrollado por Kerr. Este enfoque exhaustivo sentó las bases para abordar complejas interacciones en el comportamiento de ductos submarinos.

Posteriormente, Boer et al. (1986), tomando como punto de partida las contribuciones de Kerr y Hobbs, desarrolló un proyecto de ingeniería que exploró el pandeo vertical en ductos submarinos sometidos a altas temperaturas. Este fenómeno se manifestaba en ductos enterrados por grava en el fondo marino. Su análisis concluyó que la transferencia de calor en el ducto y la grava obedecía a procesos de conducción y convección. BOER empleó conceptos avanzados, como las ecuaciones de NAVIER-STOKES para fluidos incompresibles en dos dimensiones, para determinar el flujo de calor y la temperatura en el ducto, proporcionando así valiosa información en ingeniería submarina. Estos estudios colectivos han sido fundamentales para comprender y abordar los desafíos estructurales en ductos submarinos, estableciendo una base sólida para futuras investigaciones en el campo.

Taylor y Gan (1986) introdujeron un enfoque innovador para estudiar las imperfecciones en ductos submarinos expuestos a elevadas temperaturas. Integraron datos de ensayos experimentales que vinculaban parámetros de deformación y coeficientes de fricción del fondo marino. Este enfoque permitió establecer una relación entre desviaciones y deformaciones axiales, posteriormente incorporada en ecuaciones diferenciales. De esta manera, lograron determinar distintos modos de pandeo y las fuerzas axiales críticas asociadas.

En una evolución de este enfoque, Taylor y Gan (1996) exploraron la relación entre momento y curvatura en la región de imperfección vertical del fondo marino en ductos submarinos bajo altas presiones y temperaturas. Mantuvieron la curvatura inicial en la ecuación del movimiento, creando una conexión entre la condición actual y la imperfección inicial, lo que les permitió derivar soluciones analíticas de 1º y 2º orden para pandeos verticales. Además, llevaron a cabo ensayos experimentales para validar y comparar los resultados analíticos obtenidos.

Bruton et al. (2005) proporcionó una visión integral en la conferencia de Victoria, Espírito Santo, Brasil. Presentó una revisión global de proyectos metodológicos y experimentales desarrollados por BUCKLINE JIP (Joint Industry Project) centrados en el fenómeno de "pipeline-walking" en aguas profundas. Estos proyectos se apoyaron en ensayos experimentales que exploraron la interacción suelo-ducto y la fatiga resultante de los ciclos térmicos operativos. Bruton detalló una secuencia de pasos conocida como las "SAFEBUCK Design Guidelines" diseñada para optimizar tanto el diseño como la instalación de ductos submarinos, brindando un enfoque integral para abordar los desafíos estructurales en ambientes submarinos. Estos estudios colectivos han sido esenciales para el avance del conocimiento y la aplicación práctica en la ingeniería de ductos submarinos.

Solano y Vaz (2006) desarrollaron formulaciones analíticas y numéricas para abordar el post pandeo termomecánico de barras esbeltas bajo condiciones críticas de temperatura de pandeo. Enfocándose en un comportamiento elástico lineal, homogéneo e isotrópico del material, establecieron tres condiciones de contorno: ambos extremos empotrados, extremo rotulado y empotrado, y ambos extremos rotulados. La respuesta del problema fue rigurosamente controlada por la relación entre la esbeltez y la rigidez para un material elástico. Este enfoque proporcionó una comprensión detallada de las condiciones críticas de pandeo termomecánico.

Keuper (2006) llevó a cabo un análisis experimental a escala reducida utilizando la teoría de semejanza de números adimensionales para estudiar el pandeo vertical de ductos submarinos sometidos a cargas térmicas. Comparó los resultados experimentales con diversos modelos analíticos encontrados en la literatura reciente, validando aquellos que ofrecían la mejor aproximación. Este enfoque experimental permitió una validación robusta de modelos analíticos previamente propuestos.

Por otro lado, Mendoça (2006) presentó una metodología integral para estudiar el pandeo lateral y vertical de ductos submarinos, determinando temperaturas seguras de operación. Empleando análisis no lineales con imperfecciones iniciales en el suelo, utilizó

Métodos de Elementos Finitos (FEM) implementados en el programa ABAQUS. Este enfoque detallado permitió el análisis de las curvas de temperatura y desviación transversal, brindando información valiosa para establecer prácticas operativas seguras.

Estas contribuciones colectivas han avanzado significativamente en la comprensión y aplicación de modelos analíticos y experimentales para abordar desafíos críticos relacionados con el pandeo termomecánico y la seguridad de ductos submarinos

While (2008) propuso un modelo de estudio (PIPELINE) para analizar las interacciones suelo-ducto, focalizándose en endurecimiento cinemático para grandes ciclos térmicos de desviaciones laterales. Este enfoque evaluó el comportamiento de la deformación lateral y la fuerza de resistencia lateral de un ducto enterrado. El modelo requería cuatro parámetros clave: la relación entre la carga vertical aplicada y la elevación del ducto durante la desviación lateral, así como la resistencia y forma geométrica del suelo asociadas al enterramiento del ducto.

Simultáneamente, Wang (2008) determinó parámetros de diseño para sleepers, como longitud, altura y la ubicación en la ruta de lanzamiento (VAS: Virtual Anchor Spacing) para ductos submarinos. Presentó una metodología para modelar el pandeo lateral, específicamente en ductos revestidos de concreto, sobre sleepers mediante el método de elementos finitos en ABAQUS.

Bai et al. (2009) realizó una revisión exhaustiva de métodos para iniciar o mitigar el pandeo global lateral en ductos submarinos sometidos a altas temperaturas y presiones. Su análisis abordó imperfecciones inducidas por sleeper único y sleeper dual, concluyendo que un sleeper dual resulta más ventajoso bajo diversas condiciones de contorno.

Para calcular la amplitud máxima en la región de pandeo de un ducto submarino, Xiaodi y Xiaoxian (2012) presentó una solución conveniente en la ecuación diferencial de movimiento para el segundo modo de pandeo lateral del fondo submarino ideal. Además, incorporó el efecto del coeficiente de fricción axial en sus evaluaciones. Se destacó que

las soluciones analíticas propuestas por HOOBS eran equivalentes; la distinción residía en la metodología para resolver la ecuación diferencial de movimiento. Este estudio demostró que el pandeo lateral inducido por esfuerzos térmicos guarda analogía con el pandeo estable de una columna.

Estas contribuciones, realizadas en la última década, han enriquecido significativamente la comprensión y la capacidad de modelado en la investigación sobre ductos submarinos, proporcionando herramientas y metodologías valiosas para abordar complejas interacciones entre el suelo y el ducto, así como para mitigar los efectos perjudiciales del pandeo lateral en diferentes condiciones operativas.

Tverámo (2013) desarrolló conceptos para análisis numéricos y analíticos del PIPELINE-WALKING debido a altas temperaturas y presiones en la descarga de petróleo, considerando el coeficiente de fricción entre el fondo marino y el ducto. Liu y Yan (2013) describió la historia de estudios teóricos y experimentales para el pandeo vertical de ductos enterrados.

Zeng et al. (2014) analizó el pandeo lateral de ductos submarinos para altas temperaturas y presiones mediante un modelo de viga sometida a compresión axial, fuerza de fricción del suelo y soportada lateralmente por soportes distribuidos. Complementó sus estudios presentando nuevos parámetros adimensionales para fuerzas críticas axiales, demostrando su relación directa con las fuerzas axiales críticas de un ducto submarino durante el pandeo vertical. Estos avances colectivos han contribuido significativamente a la comprensión y abordaje de los fenómenos de pandeo en ductos submarinos en diversas condiciones operativas.

Run (2015) llevó a cabo análisis por elementos finitos utilizando el software ABAQUS para estudiar el pandeo lateral de ductos submarinos frente a diferentes imperfecciones laterales, determinando las variaciones en la deformación lateral para diversas secciones transversales y espesores de pared. Su estudio reveló que, para diámetros mayores, se observan mayores amplitudes laterales. Simultáneamente,

Tianfeng y Xianhong (2015) presentó un novedoso modelo numérico de anti-pandeo lateral desarrollado en ABAQUS. Este modelo implica enterrar secciones rectas espaciadas a lo largo del ducto submarino (tipo de elemento PIPE31), seguido de la aplicación de un precalentamiento mediante flujos de agua en el interior del ducto, generando imperfecciones curvas a lo largo del ducto no enterrado. Posteriormente, se entierra la parte curva originada. Este enfoque mantiene la pre-tensión de la pared del ducto, sometido a altas presiones y temperaturas.

Liu y Hong (2015) examinó diversos Métodos de Elementos Finitos mediante el software ABAQUS para abordar pandeos globales de ductos submarinos bajo altas presiones y temperaturas. Los modelos analíticos en la literatura incluyeron 2D implícito (RIKS), 2D explícito (DYNAMIC EXPLICIT), 3D implícito (RIKS) y 3D explícito (DYNAMIC EXPLICIT). Estos modelos fueron comparados con soluciones analíticas clásicas, validando la similitud entre los métodos 2D, aunque con una pequeña diferencia en relación con los métodos 3D. Asimismo, estableció que la velocidad de desviación del pandeo lateral en un modelo 2D es más rápida que en un modelo 3D. El trabajo de Liu y Hong (2015) también abordó dos métodos para el análisis de pandeo lateral. El primero propuso un método analítico para el tercer modo de pandeo lateral global de un ducto submarino sujeto a imperfecciones laterales iniciales. En este caso, se introdujo el método de energía en el cálculo de las soluciones analíticas. Para el análisis numérico, se empleó ABAQUS, creando un análisis dinámico explícito para diferentes razones de imperfección geométrica (longitud de arco) en el medio del ducto. Posteriormente, se analizaron las diferencias de presiones residuales encontradas por los dos métodos presentados.

Estos estudios aportan significativamente al entendimiento del pandeo lateral de ductos submarinos, incorporando aspectos clave como imperfecciones laterales, modelos numéricos avanzados y comparaciones entre métodos analíticos y numéricos.

Zhang (2015) contribuyó con estudios de pandeo vertical en ductos submarinos mediante la presentación de 8 modelos analíticos. Estos modelos abordaron diferentes

imperfecciones verticales y grados de "out-of-straightness" (OOD), utilizando la teoría de viga-columna para ductos ideales. La análisis se llevó a cabo mediante elementos finitos utilizando el software ABAQUS, y se determinó una fórmula universal aproximada que permite calcular la fuerza crítica axial.

Mattos (2015) presentó estudios de pandeo térmico vertical en ductos submarinos sujetos a imperfecciones verticales. Su enfoque incluyó un análisis geométrico no lineal con pequeñas deformaciones, considerando que la longitud del ducto es significativamente mayor que la altura de pandeo. Esto permitió que la región de FEED-IN se formara completamente. Desarrolló un modelo analítico y realizó ensayos experimentales, comparando los resultados obtenidos. Para validar dichos resultados, construyó un modelo experimental a pequeña escala en el Laboratorio NEO (Núcleo de Estructuras Oceánicas), comparando los resultados analíticos y experimentales con un modelo numérico elaborado en ABAQUS.

Por otro lado, Gitahy (2015) presentó una metodología recomendada para el proyecto termo mecánico de sistemas PIPE-IN-PIPE. Además, propuso una manera viable de realizar análisis de confiabilidad del sistema mediante análisis detallados por elementos finitos. Este enfoque aporta a la comprensión y optimización del diseño de sistemas PIPE-IN-PIPE, asegurando una mayor confiabilidad y desempeño bajo condiciones termo mecánicas. Estos estudios de 2015 ofrecen valiosas contribuciones al campo del análisis de ductos submarinos, abordando aspectos específicos como pandeo vertical, pandeo térmico y confiabilidad del sistema PIPE-IN-PIPE, utilizando herramientas avanzadas como modelos analíticos, ensayos experimentales y análisis por elementos finitos.

Li et al. (2016) contribuyó al estudio del pandeo lateral de ductos submarinos mediante la determinación de soluciones analíticas. Su enfoque incluyó la instalación de secciones de fluctuación en lugares estratégicos, lo que redujo el peso sumergido y contribuyó a la rigidez del ducto. Utilizando como base los métodos analíticos previamente establecidos por Kerr y Hobbs, se analizaron los resultados mediante el método de

"respuesta al método de superficie" (RSM), una herramienta que combina análisis matemáticos y técnicas estadísticas. Las comparaciones entre las soluciones analíticas y los resultados de RSM mostraron similitudes notables. Sin embargo, al comparar RSM con el análisis por elementos finitos (FEM), se observaron diferencias en el 1º modo de pandeo, aunque se mantuvo una mayor similitud en el 3º modo.

Guo (2016) extendió la solución analítica para el pandeo vertical de ductos submarinos sobre fondos marinos suaves y rígidos. Su análisis se centró en los efectos en la estabilidad del ducto generados por el calentamiento y las presiones externas, resultando en diversos modos de pandeo y amplitudes verticales máximas. Los análisis más significativos de GUO se llevaron a cabo para un ducto submarino sobre un fondo suave, donde el ducto penetra en el lecho marino en pequeñas secciones en los extremos y presenta una elevación en el centro, similar al 3º modo de pandeo. Este modelo analítico se resolvió mediante el método de Newton-Raphson, proporcionando soluciones analíticas para comprender mejor los modos de pandeo y la estabilidad del ducto en condiciones específicas.

Estos estudios de 2016 aportan avances valiosos al entendimiento del comportamiento del pandeo lateral y vertical en ductos submarinos, explorando técnicas analíticas y herramientas estadísticas para evaluar la estabilidad y la respuesta estructural en condiciones diversas.

Capítulo II. Marco teórico

En la última década, los ductos submarinos han emergido como el método preeminente para el transporte offshore de petróleo y gas a nivel mundial. Este sistema, caracterizado por operar a elevadas presiones y temperaturas, genera esfuerzos térmicos y efectos de Poisson que introducen tensiones adicionales en el ducto. A pesar de estos desafíos, la expansión longitudinal del ducto se ve limitada por el coeficiente de fricción del suelo, dando lugar a acumulación de tensiones axiales compresivas en la pared del ducto y originando deformaciones inesperadas al superar la resistencia del suelo.

Este capítulo se adentra en los fundamentos teóricos que respaldan los métodos analíticos y experimentales llevados a cabo por diversos investigadores. Estos métodos se centran en el estudio estructural de ductos submarinos, abordándolos como elementos con comportamiento similar al de vigas, particularmente cuando se encuentran sometidos a condiciones extremas de presión y temperatura.

2.1 Relevancia del transporte por ductos submarinos

La relevancia del transporte por ductos submarinos ha ido en aumento, transformando la dinámica del transporte energético global. En la última década, estos ductos se han consolidado como una pieza clave en la cadena de suministro de hidrocarburos, ofreciendo eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad. Este marco teórico explora los múltiples aspectos que contribuyen a la importancia de esta modalidad de transporte.

2.1.1 Ventajas Técnicas y Económicas: Eficiencia y Rentabilidad

Los ductos submarinos destacan por su capacidad para transportar grandes volúmenes de petróleo y gas de manera eficiente. A diferencia de métodos tradicionales

como el transporte por buques, los ductos submarinos minimizan las pérdidas durante el proceso de transmisión. Además, suelen ser más rentables en términos operativos y de mantenimiento, lo que los convierte en una opción atractiva para la industria energética.

2.1.2 Desafíos y Soluciones Tecnológicas: Resistencia a Condiciones Extremas

No obstante, el entorno submarino plantea desafíos únicos. Los ductos submarinos deben resistir condiciones extremas de presión y temperatura, así como factores ambientales como la corrosión. Avances tecnológicos en materiales y diseño son esenciales para garantizar la integridad estructural y operativa de estos ductos, asegurando su resistencia a las condiciones adversas del entorno marino.

2.1.3 Consideraciones Ambientales y Sostenibilidad: Impacto y Mitigación

La relevancia del transporte por ductos submarinos se entrelaza con consideraciones ambientales cruciales. Los impactos en los ecosistemas marinos deben ser evaluados y mitigados. Estrategias de mitigación incluyen tecnologías que reduzcan la huella ambiental y programas de monitoreo continuo para evaluar los efectos a largo plazo en la biodiversidad marina.

2.1.4 Importancia Geoeconómica y Geopolítica: Acceso a Mercados y Seguridad Energética

Desde una perspectiva geopolítica, los ductos submarinos desempeñan un papel crucial en la diversificación de rutas y el acceso a mercados internacionales. Esto no solo influye en la seguridad energética de las naciones, sino que también configura relaciones políticas y económicas entre países productores y consumidores. La relevancia de estos ductos se amplifica en un contexto global donde la seguridad energética es un componente clave de la estabilidad y desarrollo económico.

2.1.5 Desarrollos Tecnológicos y Futuras Tendencias: Innovación y Sostenibilidad

Los avances tecnológicos continúan marcando el camino hacia el futuro del transporte por ductos submarinos. Innovaciones en materiales, diseño y la integración con fuentes de energía renovable son áreas de investigación críticas. La combinación de estas tecnologías no solo fortalecerá la eficiencia y sostenibilidad del transporte, sino que también abrirá nuevas posibilidades para un sistema energético más diversificado y sostenible.

2.1.6 Consideraciones Sociales y Comunitarias: Participación y Responsabilidad Social

La relevancia del transporte por ductos submarinos no se limita solo a aspectos técnicos y económicos; también abarca consideraciones sociales y comunitarias. La participación activa de las comunidades locales y la implementación de procesos de consulta pública son cruciales para gestionar eficazmente los impactos sociales asociados con la construcción y operación de estos ductos submarinos.

2.2 Desafíos de ductos submarinos con las presiones y temperaturas

La operación de ductos submarinos se enfrenta a un entorno adverso caracterizado por presiones y temperaturas extremas. Este marco teórico explora los desafíos específicos que enfrentan estos ductos en aguas profundas, donde las condiciones ambientales imponen rigurosas demandas a la integridad estructural y operativa.

2.2.1 Presiones Extremas: Desafíos para la Integridad Estructural

La inmersión en aguas profundas somete a los ductos submarinos a presiones significativamente superiores a las que experimentan en entornos terrestres. Esta presión hidrostática genera fuerzas compresivas considerables en la pared del ducto, lo que plantea desafíos para la integridad estructural. La selección de materiales resistentes a la presión y técnicas de diseño avanzadas se convierte en imperativa para asegurar la robustez y resistencia de los ductos.

2.2.2 Efectos Térmicos: Adaptación a Temperaturas Extremas

Las variaciones extremas de temperatura en ambientes submarinos introducen tensiones térmicas considerables en los ductos. Cuando el petróleo o gas transportado experimenta cambios de temperatura, las expansiones y contracciones térmicas generan tensiones adicionales en la estructura del ducto. La gestión de estos efectos térmicos se vuelve esencial para evitar deformaciones no deseadas y mantener la estabilidad operativa.

2.2.3 Estrategias para Resistir Condiciones Ambientales Extremas: Materiales y Diseño

El uso de materiales resistentes y técnicas de diseño avanzadas es fundamental para superar los desafíos asociados con las presiones y temperaturas extremas. Aleaciones de acero de alta resistencia, recubrimientos protectores y métodos de soldadura especializados son algunos de los enfoques empleados para garantizar la durabilidad y seguridad de los ductos submarinos en condiciones ambientales extremas.

2.2.4 Tecnologías de Monitoreo y Mantenimiento: Garantizando la Operación Segura

El monitoreo constante es esencial para evaluar la integridad de los ductos submarinos y detectar posibles anomalías antes de que se conviertan en problemas mayores. Tecnologías avanzadas, como sensores remotos y sistemas de monitoreo acústico, permiten una vigilancia efectiva del estado de los ductos. Además, estrategias de mantenimiento proactivo, como revestimientos protectores y sistemas de prevención de corrosión, contribuyen a prolongar la vida útil de los ductos.

2.2.5 Impactos en la Vida Marina: Consideraciones Ambientales y Éticas

La expansión de la infraestructura submarina tiene implicaciones ambientales significativas. Los ductos submarinos influyen en los ecosistemas marinos, afectando la vida marina circundante. La investigación ética y la implementación de estrategias para

minimizar el impacto ambiental son aspectos cruciales para equilibrar las necesidades energéticas con la conservación del entorno marino.

2.2.6 Desarrollos Futuros y Tendencias: Innovación en la Adaptación

A medida que la industria busca abordar los desafíos de los ductos submarinos ante presiones y temperaturas extremas, se observan desarrollos continuos en tecnologías de adaptación. Investigaciones sobre materiales más avanzados, métodos de construcción innovadores y sistemas de monitoreo autónomos ofrecen perspectivas prometedoras para enfrentar con eficacia los desafíos futuros.

2.3 Enfoques del estudio estructural de ductos submarinos

El estudio estructural de ductos submarinos es esencial para garantizar su operación segura y eficiente. En este marco teórico, se exploran enfoques y métodos utilizados en la investigación estructural de ductos submarinos, destacando la importancia de comprender y abordar los desafíos únicos que presenta el entorno marino.

2.3.1 Análisis Tradicional de Elementos Finitos: Modelado Detallado de la Estructura

Los enfoques tradicionales basados en el método de elementos finitos han sido fundamentales en el estudio estructural de ductos submarinos. Este método permite el modelado detallado de la estructura, considerando las propiedades del material, las cargas externas y las condiciones ambientales. El análisis de tensiones y deformaciones resultante proporciona una comprensión profunda del comportamiento estructural bajo diversas condiciones operativas.

2.4 Formulación matemática

En los últimos años los ductos submarinos (pipeline) son convertidos en el principal método de transporte offshore de petróleo o gas en todo el mundo. Este meto es generalmente transportado a altas presiones y temperaturas, generando esfuerzos térmicos y efecto de Poisson que resulta un adicional esfuerzo en el ducto, que causan la

expansión longitudinal del ducto. Sin embargo, el ducto no se expande libremente debido al coeficiente de fricción del suelo, entonces las tensiones axiales compresivas se acumulan en la pared del ducto y ocurren inesperadas deformaciones al vencer la resistencia del suelo.

En esta sección se presenta los métodos analíticos y experimentales realizados por diversos investigadores para un estudio estructural de ductos submarinos analizados como un comportamiento de tipo viga, sometidas a altas presiones y temperaturas.

2.4.1 Análisis de pandeo lateral de vigas en superficie plana

Uno de los investigadores más importantes en estudiar este fenómeno fue KERR (1978), donde presento formulaciones matemáticas relacionadas con la teoría de elasticidad no lineal para un post pandeo lateral de un "riel de tren" en un rango de temperatura $T_0 < T_L$. Para encontrar las soluciones exactas, el utilizo el método de principios de desplazamientos virtuales (ecuación 2.2) y calculo variacional.

$$\delta U - \iiint_V \bar{F}^* \cdot \delta \bar{u} dV - \iint_{S_1} \bar{f}^* \cdot \delta \bar{u} dS = 0 \quad 2.1$$

donde:

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma^*_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma^*_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma^*_{zz} \varepsilon_{zz} + \sigma^*_{xy} \varepsilon_{xy} + \sigma^*_{xz} \varepsilon_{xz} + \sigma^*_{yz} \varepsilon_{yz}) dV \quad 2.2$$

V: volumen em estado indeformado.

\bar{u} : vector de desplazamiento.

σ^* : tensiones generalizadas.

ε_{ij} : deformaciones Lagrangianas.

\bar{F}^* : Peso del riel de tren.

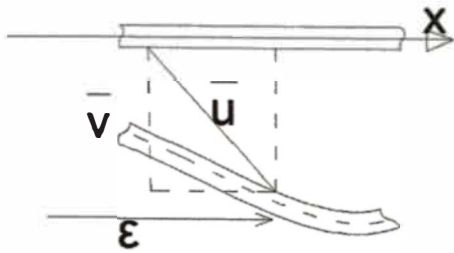
\bar{f}^* : fuerza de traccion em la seccion transversal

Para facilitar el analisis se genera la siguiente figura de una deformacion de riel de

tren:

Figura 2.1

Notación y convención utilizada para un riel de tren



Nota: fuente Kerr (1978)

Entonces la expresión U es reducida de acuerdo a la teoría de vigas:

$$U = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{2} [EA(\varepsilon_{xx} - \alpha T_0)^2 + EI\dot{v}^2] dx \quad 2.3$$

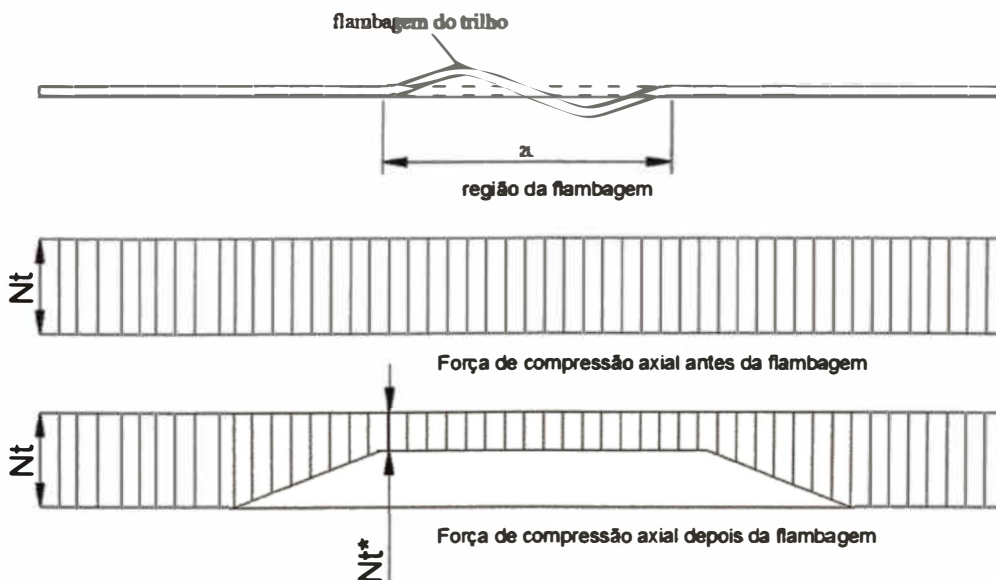
Donde:

$$\varepsilon_{xx} = \dot{u} + \frac{1}{2} \dot{v}^2 \quad 2.4$$

KERR determina las soluciones analíticas para cuatro modos libres de pandeo. En la *Figura 2.2* se muestra la distribución de fuerzas axiales N_t debido al efecto de la temperatura, además, se asume el efecto de la fricción lateral por unidad de longitud $q(x) = q_0 = cte.$

Figura 2.2

Distribución de fuerzas antes y después del pandeo lateral del riel



Nota: fuente Kerr (1978)

Resolviendo la ecuación 2.1 obtenemos la siguiente ecuación diferencial:

$$EIv^{iv} + N_t^* \ddot{v} = q_0 ; 0 \leq x \leq L \quad 2.5$$

La solución para esta ecuación diferencial es de la forma:

$$v(x) = \frac{q_0 L^4}{16\pi^4 EI} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) + \pi \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) - 2\pi^2 \left[\left(\frac{x}{L}\right)^2 - \frac{x}{L} \right] \right\} \quad 2.6$$

Finalmente se determina la fuerza axial N_t^* en la región de pandeo:

$$N_t^* = -EA\alpha T_0 + Lr_0 \left\{ \sqrt{1 + \frac{EA}{L^2 r_0} \int_0^L \dot{v}^2 dx} \right\} \quad 2.7$$

donde:

r_0 = resistencia axial en kg/m debido riel de tren fijado em el suelo.

2.4.2 Análisis de pandeo lateral de ductos submarinos ideales

En esta parte será estudiada solo la evaluación de las investigaciones relacionadas con el comportamiento del fenómeno de pandeo lateral. Existen dos mayores causas que generan fuerzas existentes a lo largo de un ducto de petróleo o gas; estas son la presión y la temperatura. Normalmente traen complicaciones en las condiciones de operación: cuando la temperatura es mayor a 90 ° C y la presión interna 10N/mm².

Por lo tanto, HOBBS (1984) determino soluciones analíticas de pandeo vertical y lateral de ductos de pared esbelta para diferentes modos de pandeo (ver Figura 2.3).

En ella se determina una ecuación 2.8 diferencial que gobierna la forma de deflexión.

$$\ddot{y} + \frac{P}{EI} y + \frac{\phi w}{8EI} (4x^2 - L^2) = 0 \quad 2.8$$

Dónde:

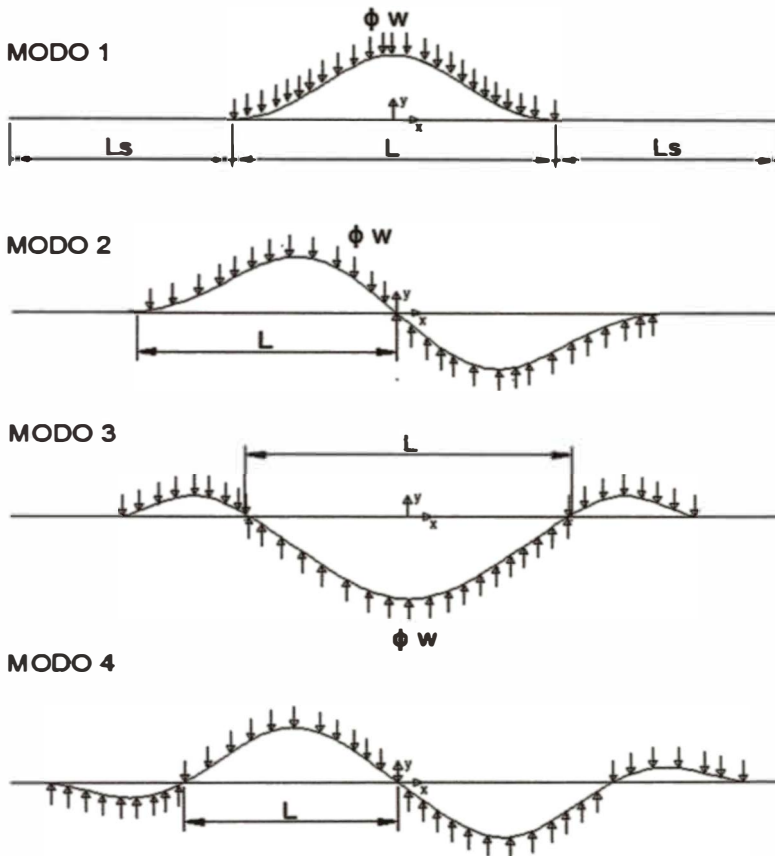
ϕ : es el coeficiente de fricción lateral.

w: es el peso por unidad de longitud.

L: es definido de acuerdo a la Figura 2.3.

Figura 2.3

Definición de la longitud del alza de pandeo L y modos



Nota: fuente Hobbs (1978)

Resolviendo esta ecuación se obtiene la amplitud máxima y_m y máximo momento de flexión M .

$$y_m = k_4 \frac{\phi w}{EI} L^4 \quad 2.9$$

$$M = k_5 \phi w L^2 \quad 2.10$$

Determinándose la fuerza axial efectiva P_0 , para una longitud L , es descrita como:

$$P_0 = P + k_3 \phi w L \left[\left(1 + k_2 \frac{EA \phi w L^5}{(EI)^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad 2.11$$

Donde P es la fuerza axial en la región de pandeo, I es el momento de inercia de la sección transversal del ducto y E es el módulo de elasticidad.

$$P = k_1 \frac{EI}{L^2} \quad 2.12$$

Las constantes K1-K5 para los cuatro primeros modos fundamentales de pandeo están representados en la *Tabla 2.1*.

Tabla 2.1

Constante para modos de pandeo lateral.

Modo	K1	K2	K3	K4	K5
1	80,76	6,39E-05	0,5	0,002407	0,06938
2	39,48	0,000174	1	0,005532	0,1088
3	34,06	0,000167	1,294	0,01032	0,1434
4	28,2	2,14E-04	1,608	1,05E-02	0,1483

Nota: fuente Hobbs (1978)

Para calcular la amplitud máxima en la región de pandeo del segundo modo (ver Figura 2.3); XIAODI (2012) utiliza una solución conveniente para la ecuación 2.8 descrito como:

$$y = A_1 \cos nx + A_2 \sin nx - \frac{\phi q}{2n^2 EI} x^2 + A_3 x + A_4 \quad 2.13$$

Donde:

$A_1 - A_4$: son las constantes a calcular con las condiciones del contorno para $y|_{x=0} = 0$; $\dot{y}_{xx}|_{x=0} = 0$; $y|_{x=L} = 0$ e $\dot{y}_x|_{x=L} = 0$.

La máxima amplitud es determinada por:

$$y_m = 5.531 \times 10^{-3} \frac{\phi w}{EI} L^4 \quad 2.14$$

Se determina que las soluciones analíticas de HOBBS y XIAODI son iguales, y la diferencia entre los dos métodos es la forma de resolver la ecuación diferencial 2.8.

2.4.3 Análisis de pandeo vertical de ductos submarinos ideales

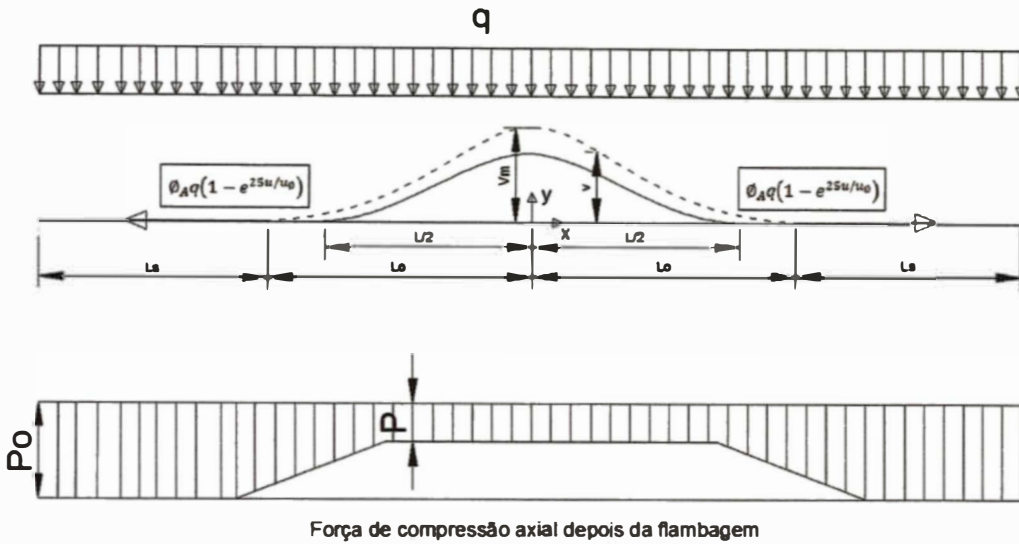
A) Solución analítica para ductos ideales sobre fondo rígido

Este análisis fue desarrollado por HOBBS (1984) y luego fue mejorado por Taylor y Gan (1986), donde se consideró la resistencia de un suelo rígido y los efectos en él, deduciendo una solución analítica con imperfecciones verticales iniciales. El modelo de análisis es presentado en la siguiente figura:

Figura 2.4

Detalles del modelo vertical sobre un fondo rígido

MODO 1



Nota: fuente Taylor y Gan (1986)

Donde:

q: peso del ducto por unidad de longitud

v_m : desplazamiento vertical máximo.

L: longitud de pandeo vertical.

P_0 : distribución de fuerzas axiales en los extremos del ducto.

P: distribución de fuerzas axiales en la región de pandeo vertical.

ϕ_A : Coeficiente de fricción axial.

u/u_0 : Desplazamiento lateral.

Se determina la ecuación de deflexión vertical v , descrita como:

$$v = \frac{q}{EI n^4} \left(1 + \frac{n^2 L^2}{8} - \frac{n^2 x^2}{2} - \frac{\cos nx}{\cos nL/2} \right); \quad -L/2 \leq x \leq L/2 \quad 2.15$$

Donde el valor $nL = 8.9868$ y EI es la rigidez a la flexión.

Para calcular v_m analizamos para $x=0$, resultando la siguiente ecuación:

$$v_m = 2.407 \times 10^{-3} \frac{qL^4}{EI} \quad 2.16$$

Determinamos la ecuación P y el momento de flexión máxima en la región de pandeo M, aplicando energía potencial total en el estado de deformación para la ecuación 2.15, para finalmente aplicar un estado de equilibrio obtenemos:

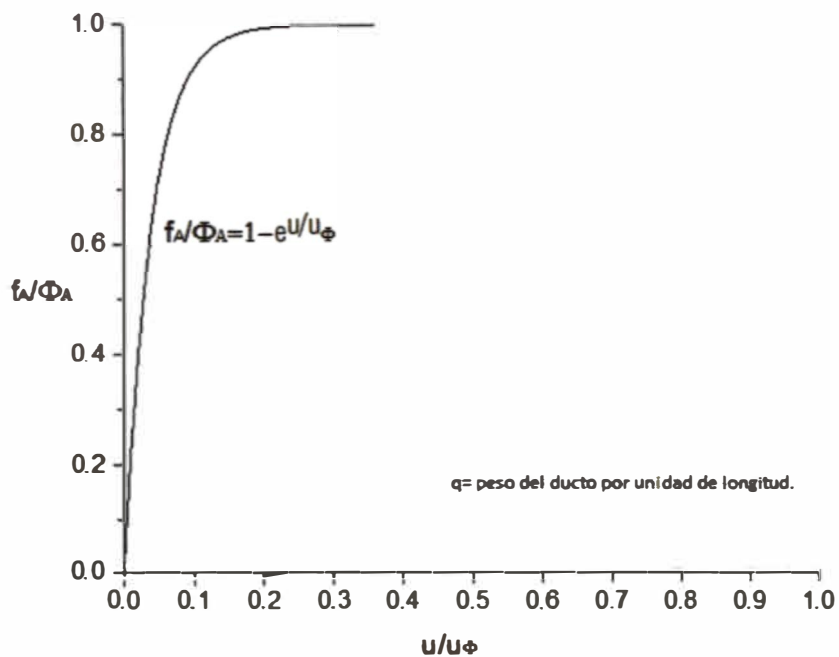
$$P = 80.76 \frac{EI}{L^2} \left[1 - \frac{R_1}{75.60} \left(\frac{L_0}{L} \right)^2 \right] \quad 2.17$$

$$M = -0.06938q(L^2 - L_0^2) \quad 2.18$$

Además, se presenta unos factores técnicos representados en la *Figura 2.5* para determinar la relación entre la fricción axial y la deformación.

Figura 2.5

Característica de la fricción axial



Nota: fuente Taylor y Gan (1986)

De acuerdo al gráfico es aplicada la ecuación de desplazamiento lateral:

$$AE \frac{d^2u}{dx^2} = -f_A q; \quad -L/2 \leq x \leq L/2 \quad 2.19$$

Obtenemos la relación de fuerzas axiales en la región de pandeo y la región sin pandeo:

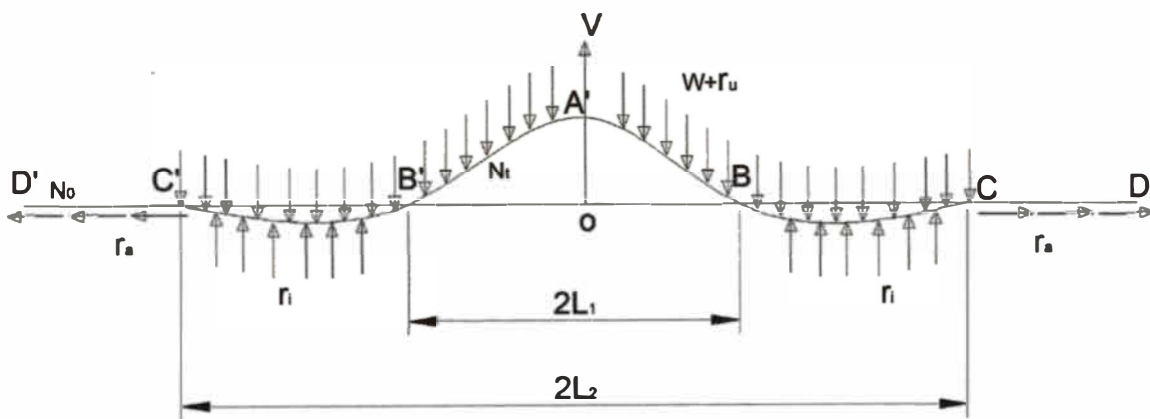
$$P_0 - P = \left[2\phi_A q A E \left(\frac{e^{\frac{25u}{u_\phi}}}{5} - u \right) \right]^{\frac{1}{2}} + \phi_A q (1 - e^{25u/u_\phi}) \quad 2.20$$

B) Solución analítica para ductos ideales sobre fondo suave

Este análisis fue realizado por WANG (2008); el amplía las soluciones analíticas sobre un fondo marino suave como se presenta en la Figura 2.6. Se asume que la resistencia r_u y r_a es constante a lo largo del ducto en las regiones B' B y CD-C'D' respectivamente.

Figura 2.6

Configuración y distribución de fuerzas axiales de un pandeo vertical de fondo suave



Nota: fuente Wang (2008)

Se determina dos ecuaciones diferenciales que gobiernan el pandeo:

$$EI \frac{d^4 v_1}{dx^4} + N_t \frac{d^2 v_1}{dx^2} = -(r_u + w); \quad (0 \leq x \leq L_1) \quad 2.21$$

$$EI \frac{d^4 v_2}{dx^4} + N_t \frac{d^2 v_2}{dx^2} = r_i - w; \quad (L_1 \leq x \leq L_2) \quad 2.22$$

Donde,

EI : es la rigidez da flexión.

N_t : es la fuerza axial en la región C'AC.

v_1 : es el desplazamiento vertical en la región O-A y O-B'.

v_2 : es el desplazamiento vertical en la región B-C y B'-C'.

w : es el peso sumergido por unidad de longitud de ducto.

r_i : es la resistencia de fricción en la región de hundimiento.

r_u : es la resistencia en la región de levantamiento.

Se determina dos soluciones de la ecuación 2.21 y 2.22:

$$v_1 = A_1 \cos ux + A_2 \operatorname{sen} ux + A_3 x + A_4 - \frac{r_0 x^2}{2u^2} \quad 2.23$$

$$v_2 = A_5 \cos ux + A_6 \operatorname{sen} ux + A_7 x + A_8 + k \frac{r_0 x^2}{2u^2} \quad 2.34$$

Donde,

$$k = \frac{r_i - w}{r_u + w}$$

$$r_0 = \frac{w + r_u}{EI}$$

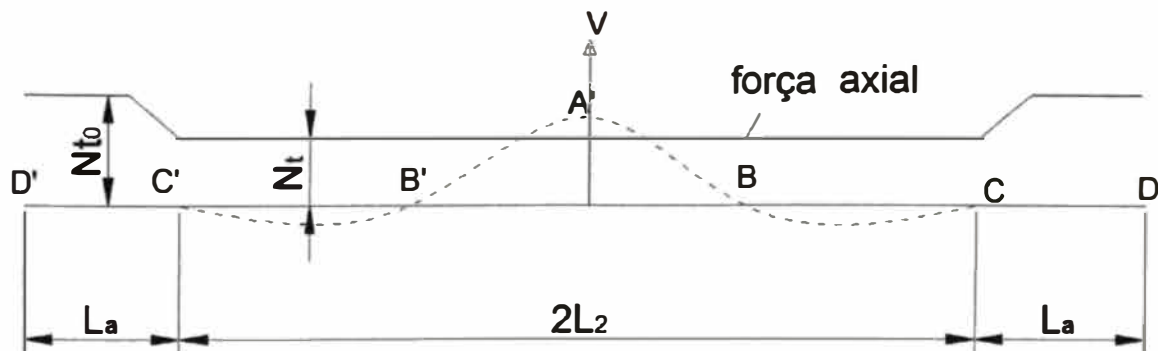
$$u = \sqrt{\frac{N_t}{EI}}$$

Se determinan las constantes aprovechando la simetría de la Figura 2.6 y las condiciones de contorno. Además, para determinar la fuerza axial N_t se necesita que la fuerza axial reducida en el ducto sea igual al producto de la rigidez axial y la extensión a través de la curva de pandeo.

Para comprender mejor se presenta la siguiente figura:

Figura 2.7

Distribución de la fuerza a lo largo del ducto



Nota: fuente Wang (2008)

El resultado de la ecuación es obtenido como:

$$\frac{\int_{-L_2}^{L_2} (N_{t0} - N_t) dx + 2 \int_0^{L_a} (N_{t0} - N_t + r_a x) dx}{2L_2 + 2L_a} \quad 2.25$$

$$= \frac{AE}{2L_2 + 2L_a} \left(\int_{-L_1}^{L_1} 0.5 \left(\frac{dv_1}{dx} \right)^2 dx + 2 \int_{-L_2}^{L_2} 0.5 \left(\frac{dv_2}{dx} \right)^2 dx \right)$$

Donde A es el área de la sección transversal del ducto.

La temperatura T_0 es uniforme y genera una fuerza axial de compresión, donde α es el coeficiente no lineal térmico de expansión:

$$N_{t0} = EA\alpha T_0 \quad 2.26$$

De la ecuación 2.25 y 2.26, se determina la relación más importante:

$$EA\alpha T_0 = N_t + L_2 r_a \left[\sqrt{1 + \frac{EA}{L_2^2 r_a} \left(\int_0^{L_1} \left(\frac{dv_1}{dx} \right)^2 dx + \int_{L_1}^{L_2} \left(\frac{dv_2}{dx} \right)^2 dx \right)} - 1 \right] \quad 2.27$$

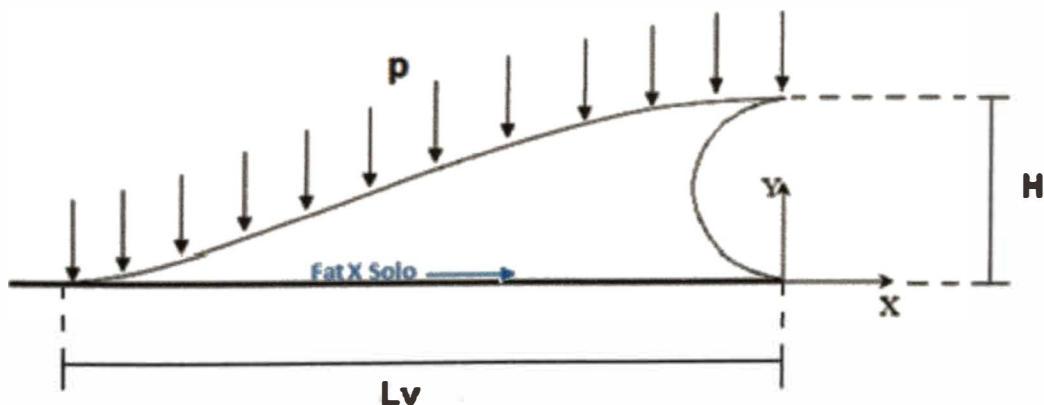
2.5 Modelo analítico bidimensional vertical

El modelo analítico bidimensional para pandeo vertical de ducto fue construido con base al modelo de HOBBS presentando en literaturas anteriores.

El problema consiste en una viga (ducto) apoyado sobre el sleeper en un único punto. La viga posee rigidez EI y esta sobre acción de su peso por longitud p (ver Figura 2.8).

Figura 2.8

Problema a ser resuelto analíticamente

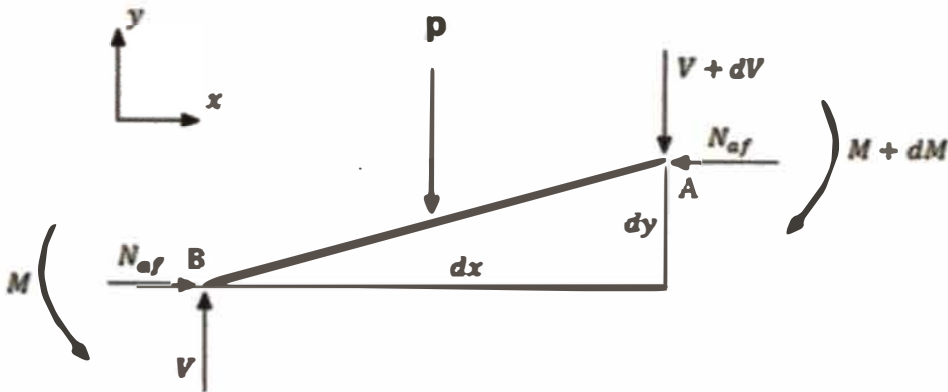


Nota: fuente Hobbs (1984)

Primeramente, se debe investigar las fuerzas y momentos en una sección infinitesimal del ducto, de manera de generar en seguida el equilibrio de fuerzas (ver Figura 2.9). En este diagrama N_{af} representa la fuerza axial efectiva en el alza de pandeo, V es el esfuerzo cortante y M es el momento flector.

Figura 2.9

Fuerza y momentos actuantes en una sección infinitesimal del ducto



Nota: fuente Hobbs (1984)

El equilibrio de momentos en el punto A:

$$\sum M_A = 0$$

$$M - (M + dM) + N_{af} \cdot dy - V \cdot dx = 0 \quad 2.28$$

Diferenciándose la ecuación 2.28 en relación a x:

$$\frac{dM}{dx} + N_{af} \cdot \frac{dy}{dx} - V = 0 \quad 2.29$$

De la expresión de flexión pura pequeños desplazamientos:

$$M = -E \cdot I \cdot \frac{d^2y}{dx^2} \quad 2.30$$

Derivando la ecuación 2.29 en relación a x y sustituyendo en la ecuación 2.30:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4y}{dx^4} + N_{af} \cdot \frac{d^2y}{dx^2} - \frac{dV}{dx} = 0 \quad 2.31$$

Como $\frac{dV}{dx} = -P$, donde p es el peso por unidad de longitud del ducto:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4y}{dx^4} + N_{af} \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = -P \quad 2.32$$

Definiendo las variables λ y p :

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{af}}{E \cdot I}} \quad 2.33$$

$$p = \frac{P}{E \cdot I} \quad 2.34$$

Sustituyendo 2.33 y 2.34 en 2.32:

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \lambda^2 \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = -P \quad 2.35$$

La solución de la ecuación 2.35 es de la siguiente forma:

$$y(x) = -\frac{C_1 \cdot \text{sen}(\lambda \cdot x)}{\lambda^2} - \frac{C_2 \cdot \text{cos}(\lambda \cdot x)}{\lambda^2} - \frac{px^2}{\lambda^2} + C_3 x + C_4 \quad 2.36$$

Para este problema las siguientes condiciones de contorno son aplicadas:

$$y(0) = H \quad 2.37$$

$$y'(0) = 0 \quad 2.38$$

$$y(Lv) = 0 \quad 2.39$$

$$y'(Lv) = 0 \quad 2.40$$

$$y''(Lv) = 0 \quad 2.41$$

Donde Lv es la longitud del tramo del ducto, o sea, la distancia del punto donde el ducto está apoyado en el sleeper hasta el touchdown point y H es la altura del sleeper.

A pesar de las 5 condiciones de contorno presentados al problema posee 6 incógnitas (C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , Lv y λ). Otra condición es necesaria, que resulta del análisis de la desviación axial del ducto.

De las ecuaciones 2.37 a 2.41 son usadas para calcular las constantes C_1 , C_2 , C_3 y C_4 . Debido a la extensión de esas ecuaciones sus valores están expresados en el anexo A de este trabajo.

La deformación es calculada de la siguiente forma, atribuyéndole la señal positiva a la compresión (ese cálculo solo es válido para el alza de pandeo.)

$$N_{af} = P_i \cdot A_i \cdot (1 - 2 \cdot \nu) + E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta T - E \cdot A \cdot \varepsilon_{af} \quad 2.42$$

Se aísla la deformación de la ecuación 2.42, resultando en:

$$\varepsilon_{af} = \frac{P_i \cdot A_i \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{E \cdot A} + \alpha \cdot \Delta T - \frac{N_{af}}{E \cdot A} \quad 2.43$$

La parte mecánica de la deformación es calculada por la siguiente expresión, donde u es la desviación axial.

$$\varepsilon_{af} = u'_{af} + \frac{1}{2} \cdot y'_{af}{}^2 \quad 2.44$$

Sustituyendo 2.42 y 2.43 y efectuando la integración en los límites deseados (x va de 0 a L_v) se llega a:

$$u_{af} = u_{af}(0) + \left(\frac{P_i \cdot A_i \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{E \cdot A} + \alpha \cdot \Delta T - \frac{N_{af}}{E \cdot A} \right) \cdot x - \frac{1}{2} \cdot \int_0^x y'_{af}{}^2 dx \quad 2.45$$

Como en $x=0$ es supuesto la simetría en el ducto, la desviación axial en este punto debe ser nulo, reduciendo la ecuación 2.45 a:

$$u_{af} = \left(\frac{P_i \cdot A_i \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{E \cdot A} + \alpha \cdot \Delta T - \frac{N_{af}}{E \cdot A} \right) \cdot x - \frac{1}{2} \cdot \int_0^x y'_{af}{}^2 dx \quad 2.46$$

Ahora debe ser calculado el desplazamiento axial en la región de feed-in. Las variaciones de fuerza en esta región son igual al valor de la fuerza de fricción del suelo por longitud. La validez de esta ecuación es de L_v hasta L_0 :

$$N'_f = Q_A; L_2 \leq x \leq L_0 \quad 2.47$$

Donde:

$$Q_A = \mu_A \cdot W_S$$

Sustituyendo 2.42 y 2.44 en 2.47:

$$E \cdot A \cdot \mu''_f = -Q_A; L_2 \leq x \leq L_0 \quad 2.48$$

Integrando dos veces la ecuación anterior se obtiene:

$$\mu_f(x) = -\frac{Q_A \cdot x^2}{2 \cdot E \cdot A} + C_5 \cdot x + C_6 \quad 2.49$$

Como condición de contorno para la ecuación anterior se aplica el desplazamiento y su variación nula en el punto de anclaje virtual (L_0) y la continuidad de deformación en L_v :

$$\mu_f(L_0) = 0 \quad 2.50$$

$$\mu_f'(L_0) = 0 \quad 2.51$$

$$\mu_{af}'(L_v) = \mu_f(L_v) \quad 2.52$$

$$\mu_{af}'(L_v) = \mu_f'(L_v) \quad 2.53$$

Utilizando 2.50 en 2.49:

$$C_6 = \frac{Q_A \cdot L_0^2}{2 \cdot E \cdot A} - C_5 \cdot L_0 \quad 2.54$$

$$C_5 = \left(\frac{P_i \cdot A_i \cdot (1 - 2 \cdot v)}{E \cdot A} + \alpha \cdot \Delta T - \frac{N_{af}}{E \cdot A} \right) + \frac{Q_A \cdot L_2}{E \cdot A} \quad 2.55$$

El punto de anclaje virtual (L_0) es dividido en la sumatoria de la longitud de alza de pandeo más la longitud de la región de feed-in:

$$L_0 = L_v + L_f \quad 2.56$$

Se llega a una expresión para la desviación axial en la región de feed-in al relacionar las ecuaciones 2.49, 2.54, 2.55 y 2.56:

$$\mu_f(x) = \left(\frac{Q_A}{2 \cdot E \cdot A} \cdot (x - L_v + L_f) - \left(\frac{P_i \cdot A_i \cdot (1 - 2 \cdot v)}{E \cdot A} + \alpha \cdot \Delta T - \frac{N_{af}}{E \cdot A} \right) \right) \cdot (L_v + L_f - x) \quad 2.57$$

El valor de L_f puede ser determinado por la diferencia $N_0 - N_{af}$ que es el total de la fuerza de fricción ejercida por el suelo. Para obtener ese valor, basta integrar Q_A en la longitud de feed-in. La variación de la fuerza lineal es lineal en esta región. obteniéndose así $\mu_A \cdot W_S \cdot L_f = Q_A \cdot L_f$ como resultado de la fuerza total del suelo ejercida. Aislado L_f en esa igualdad se tiene:

$$L_f = \frac{N_0 - N_{af}}{Q_A} \quad 2.58$$

Resta ahora solamente determinar el valor de $\lambda(N_{af})$ y L_v , para eso basta resolver el sistema compuesto por las ecuaciones obtenidas a partir de las condiciones de contorno

2.37 al 2.41. Las constantes de integración C1, C2, C3 y C4 y las ecuaciones del sistema a ser resuélvó a fin de determinar λ y Lv .

- C4: Obtenido a partir de la condición de contorno 2.37

$$C4 = H + \frac{C1}{\lambda^2}$$

- C2: obtenida a partir de la condición de contorno 2.38

$$C2 = C3 \lambda$$

- C1: Obtenida a partir de la condición de contorno 2.39

$$C1 = \frac{\frac{C3 \sin(\lambda Lv)}{\lambda} + \frac{1}{2} \frac{pLv^2}{\lambda^2} - C3 Lv - H}{-\frac{\cos(\lambda Lv)}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda^2}}$$

- C3: Obtenida a partir de la condición de contorno 2.40

$$C3 = \frac{-\frac{2pLv (\cos(\lambda Lv) - 1)}{\lambda} - \sin(\lambda Lv) pLv^2 + 2 \sin(\lambda Lv) H \lambda^2}{2 \cos(\lambda Lv)^2 \lambda - 4 \cos(\lambda Lv) \lambda + 2 \sin(\lambda Lv)^2 \lambda - 2 \sin(\lambda Lv) Lv \lambda^2 + 2 \lambda}$$

Ecuación obtenida a partir de 5.41

$$\left(\frac{-\frac{2Ws Lv (\cos(\lambda Lv) - 1)}{E \ln \lambda} - \frac{\sin(\lambda Lv) WsLv^2}{E \ln} + 2 \sin(\lambda Lv) H \lambda^2 \right) \sin(\lambda Lv) \lambda}{2 \cos(\lambda Lv)^2 \lambda - 4 \cos(\lambda Lv) \lambda + 2 \sin(\lambda Lv)^2 \lambda - 2 \sin(\lambda Lv) Lv \lambda^2 + 2 \lambda}$$

$$+ \frac{1}{-\frac{\cos(\lambda Lv)}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda^2}} \left(\left(\frac{-\frac{2Ws Lv (\cos(\lambda Lv) - 1)}{E \ln \lambda} - \frac{\sin(\lambda Lv) WsLv^2}{E \ln} + 2 \sin(\lambda Lv) H \lambda^2 \right) \sin(\lambda Lv) \right)$$

$$\left(\frac{-\frac{2Ws Lv (\cos(\lambda Lv) - 1)}{E \ln \lambda} - \frac{\sin(\lambda Lv) WsLv^2}{E \ln} + 2 \sin(\lambda Lv) H \lambda^2 \right) Lv}{2 \cos(\lambda Lv)^2 \lambda - 4 \cos(\lambda Lv) \lambda + 2 \sin(\lambda Lv)^2 \lambda - 2 \sin(\lambda Lv) Lv \lambda^2 + 2 \lambda}$$

$$- H \cos(\lambda Lv) \left) - \frac{Ws}{E \ln \lambda^2} = 0$$

Ecuación obtenida a partir de 5.41

$$\left(\alpha \Delta T + \frac{Pop(1-2\nu)}{E} - \frac{\lambda^2 l n}{A} \right) Lv$$

$$\frac{\left(\frac{1}{2} \frac{PA t(1-2\nu) + EA \alpha \Delta T - \lambda^2 E l n}{EA} - \alpha \Delta T - \frac{Pop(1-2\nu)}{E} + \frac{\lambda^2 l n}{A} \right) (PA t(1-2\nu) + EA \alpha \Delta T - \lambda^2 E l n)}{\mu a W s}$$

$$= 0$$

En esta ecuación Pop es la presión de operación del ducto.

Como son ecuaciones no lineales, la respuesta del sistema es obtenida numéricamente. Para eso fue utilizado el método numérico `f solve` del Maple.

Capítulo III. Hipótesis y operacionalización de variables

3.1 Formulación de hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Existen diferencias significativas en el pandeo lateral de los ductos submarinos sobre los sleepers curvos en comparación con los tradicionales.

3.1.2 Hipótesis específicas

- La geometría del sleeper (curvo o tradicional) y del ducto submarino afecta significativamente el pandeo lateral del ducto.
- La presión interna y carga térmica del ducto submarino influyen significativamente en el pandeo lateral del ducto.
- El modelo de simulación numérica proporciona resultados significativamente diferentes para el pandeo lateral en sleepers curvos y tradicionales.

3.2 Operacionalización de variables

En esta sección se presentan las variables, mediante la tabla 3.1, su definición, dimensión e indicadores, así como el instrumento de análisis.

Tabla 3.1

Matriz de operacionalización de variables.

VARIABLES	DEFINICIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES
<p>V. Dependiente: Y1: Pandeo lateral del ducto</p>	<p>Desviación lateral máxima experimentada por el ducto submarino bajo condiciones de carga, expresada en milímetros, registrada durante la simulación numérica.</p>	<p>Desviación lateral máxima</p>	<ul style="list-style-type: none"> Desviación (mm).
<p>V. Independiente: X1: Geometría del sleeper y ducto</p>	<p>Conjunto de dimensiones físicas que caracterizan la forma y tamaño tanto del sleeper como del ducto submarino. Incluye la longitud, altura, y radio de curvatura (en el caso del sleeper curvo) para el sleeper, y el diámetro y espesor de la pared para el ducto submarino, medidos en milímetros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Dimensiones físicas 	<ul style="list-style-type: none"> Longitud del sleeper (mm) Altura del sleeper (mm) Ancho del sleeper (mm) Radio de curvatura del sleeper (mm) Espesor de pared de ducto (mm)
<p>X2: Caracterización del ducto</p>	<p>Descripción detallada de las propiedades del ducto submarino, como el diámetro, el espesor de la pared, la resistencia del material, y otras propiedades geométricas relevantes para el análisis de pandeo lateral. Medidas en milímetros y otras unidades pertinentes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Presión interna del ducto Carga térmica en el ducto Fuerza hidrostática 	<ul style="list-style-type: none"> Nivel de presión crítica en el que se inicia el pandeo lateral (Pa) Gradiente térmico para evaluar el efecto de las variaciones de temperatura (°C) Fuerza hidrostática en el fondo marino (Pa)
<p>X3: Modelo de simulación numérica</p>	<p>Conjunto de ecuaciones matemáticas y parámetros que representan el comportamiento del ducto submarino y del sleeper en un entorno numérico. Incluye coeficientes elásticos y plásticos, así como las condiciones de carga, como la presión interna, la carga térmica y otros factores relevantes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Parámetros del modelo 	<ul style="list-style-type: none"> Precisión del modelo en la predicción de casos de pandeo lateral en comparación con datos de campo Coefficiente elástico y plástico (Pa)

Capítulo IV. Metodología de la investigación

La metodología de investigación para el análisis numérico del pandeo lateral de ductos submarinos sobre sleepers curvos frente a los tradicionales se define por su enfoque analítico, descriptivo y principalmente explicativo. Este enfoque implica la descomposición del problema en componentes manejables para profundizar en las relaciones causales y patrones subyacentes. Se abordará a través de simulaciones numéricas que permitirán discernir los factores determinantes del pandeo lateral en los ductos submarinos.

La unidad de análisis comprende los ductos submarinos y los sleepers, tanto curvos como tradicionales, y sobre ella se realizará una descripción detallada de su geometría, incluyendo dimensiones y materiales relevantes para la comprensión del fenómeno. Este enfoque permitirá entender cómo las características geométricas y mecánicas de los sleepers influyen en el comportamiento estructural de los ductos submarinos ante cargas externas y condiciones ambientales variables.

La justificación de la investigación radica en la importancia de garantizar la integridad y estabilidad de los ductos submarinos en la industria petrolera. El pandeo lateral representa una preocupación significativa debido a sus posibles implicaciones en términos de seguridad, eficiencia operativa y costos asociados. Comprender cómo los sleepers curvos se comparan con los tradicionales en términos de su capacidad para mitigar el pandeo lateral es crucial para mejorar el diseño, la operación y el mantenimiento de infraestructuras submarinas.

Por último, se elaborará una matriz de consistencia que detallará la coherencia y congruencia entre los diferentes elementos de la investigación, incluyendo los objetivos, la

metodología y los resultados esperados. Esto garantizará que la investigación se lleve a cabo de manera sistemática y rigurosa, siguiendo un enfoque coherente y transparente en todo el proceso.

4.1 Tipo y nivel de la investigación

4.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada o técnica pues la naturaleza de la investigación aplicada se evidencia en la aplicación de conocimientos teóricos y metodologías específicas para abordar un problema práctico y concreto en el ámbito de la ingeniería submarina. En este caso, el objetivo principal es analizar numéricamente el pandeo lateral en ductos submarinos, buscando resultados directamente aplicables a la mejora de la seguridad y eficiencia de las estructuras utilizadas en la industria petrolera offshore.

4.1.2 Nivel de la investigación

El presente trabajo muestra un nivel de investigación explicativo o causal pues busca comprender las relaciones de causa y efecto entre las variables involucradas. El análisis numérico del pandeo lateral no se limita a describir fenómenos observados, sino que busca explicar las razones subyacentes detrás de estos comportamientos. La relación causal se establece al investigar cómo las características de la geometría del sleeper y ducto (X1), la caracterización del ducto (X2), y el modelo de simulación numérica (X3) influyen en el pandeo lateral del ducto (Y1). Este enfoque permite no solo identificar patrones y correlaciones, sino también entender las razones detrás de la ocurrencia del pandeo lateral en diferentes condiciones.

4.2 Unidad de análisis

La unidad de análisis en esta investigación es la estructura formada por el ducto submarino y los sleepers, tanto curvos como tradicionales. Se examina cómo las características geométricas, la presión interna, la carga térmica y el modelo de simulación numérica afectan el comportamiento de esta unidad estructural en términos de pandeo lateral. La unidad de análisis es esencial para comprender de manera integral y específica

las interacciones entre las variables independientes y la variable dependiente, permitiendo así una evaluación precisa del impacto de diferentes factores en el pandeo lateral de los ductos submarinos.

4.3 Justificación de la investigación

La exploración y explotación de hidrocarburos en entornos submarinos representan un componente crítico de la industria petrolera global. Los ductos submarinos, encargados de transportar petróleo y gas desde los yacimientos hasta las instalaciones en la superficie, enfrentan desafíos estructurales significativos. Uno de estos desafíos cruciales es el fenómeno de pandeo lateral, que compromete la integridad de los ductos y poner en riesgo tanto la seguridad operativa como la protección del medio ambiente marino circundante.

La justificación de esta investigación radica en la necesidad apremiante de comprender y mitigar el pandeo lateral en ductos submarinos, centrándonos específicamente en la comparación entre sleepers curvos y tradicionales. Este fenómeno conduce a fallas estructurales, afectar la eficiencia operativa y generar costos significativos en términos de reparación y mantenimiento. A continuación, se exponen las razones fundamentales que respaldan la relevancia y urgencia de este estudio.

- Los ductos submarinos son la columna vertebral del transporte de hidrocarburos en entornos offshore. Su papel crítico en la cadena de producción de petróleo y gas resalta la necesidad de abordar de manera proactiva los desafíos estructurales que enfrentan. Un pandeo lateral no controlado compromete la capacidad de transporte y afectar la seguridad operativa en la producción submarina.
- Las fallas estructurales en ductos submarinos tienen consecuencias económicas significativas. Interrupciones en la producción, costos de reparación y pérdida de recursos son algunas de las consecuencias directas. Comprender y prevenir el pandeo lateral es esencial para minimizar estos impactos económicos y mantener la viabilidad financiera de los proyectos offshore.

- La integridad de los ductos submarinos no solo afecta a la industria, sino que también tiene implicaciones ambientales. El pandeo lateral resulta en fugas de hidrocarburos y daños al ecosistema marino circundante. La prevención de tales riesgos ambientales es una responsabilidad crítica en la gestión sostenible de las operaciones petroleras en aguas profundas.
- La introducción de sleepers curvos representa una innovación potencial en la mitigación del pandeo lateral. Estos elementos estructurales ofrecen ventajas en términos de distribución de cargas y resistencia a esfuerzos laterales. Investigar la eficacia de los sleepers curvos frente a los tradicionales es esencial para evaluar su viabilidad y promover innovaciones que mejoren la seguridad y la eficiencia de las infraestructuras submarinas.
- La interacción compleja entre la geometría del sleeper y del ducto, la carga térmica, la presión interna y el comportamiento elástico-plástico del sistema exige un análisis numérico detallado. Comprender cómo estos factores se entrelazan en la ocurrencia del pandeo lateral es crucial para desarrollar estrategias efectivas de prevención y mitigación.
- Esta investigación no solo busca comprender el pandeo lateral, sino también contribuir al campo de la ingeniería offshore. Los resultados obtenidos informan el diseño de futuras estructuras submarinas, proporcionando insights valiosos para la mejora de las prácticas y normativas de la industria.
- El desarrollo de un modelo de simulación numérica específico para el comportamiento del ducto submarino sobre sleepers curvos y tradicionales es una contribución significativa. Este avance no solo amplía la comprensión del fenómeno de pandeo lateral, sino que también establece un precedente para la aplicación de modelos más precisos y adaptados a condiciones específicas de operación.
- La industria petrolera enfrenta constantes desafíos, y la adaptación a nuevas tecnologías y prácticas es esencial. Esta investigación aborda un desafío actual y

ofrece información que es crucial para el diseño y operación de ductos submarinos en el futuro, asegurando la sostenibilidad y eficacia de las operaciones offshore.

4.4 Matriz de consistencia

Para el presente trabajo de investigación se elaboró la siguiente matriz de consistencia, plasmada en la tabla 4.1.

Tabla 4.1

Matriz de consistencia.

FORMULACIÓN DE PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES
<p>PROBLEMA GENERAL: ¿Cómo afecta el uso de sleepers curvos en comparación con los tradicionales al pandeo lateral de los ductos submarinos, y cómo se analiza numéricamente esta influencia?</p> <p>PROBLEMA ESPECIFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ ¿Cuál es la influencia de la geometría del sleeper (curvo o tradicional) y del ducto submarino en el pandeo lateral de los ductos submarinos? ➤ ¿Cómo afectan la presión interna y la carga térmica del ducto submarino al pandeo lateral de los ductos submarinos? ➤ ¿En qué medida el modelo de simulación numérica proporciona insights significativos sobre el pandeo lateral de los ductos submarinos sobre sleepers curvos en comparación con los tradicionales? 	<p>OBJETIVO GENERAL: Analizar numéricamente los ductos submarinos sobre los sleepers curvos frente a los tradicionales para disminuir el pandeo lateral.</p> <p>OBJETIVOS ESPECIFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Caracterizar la geometría del sleeper curvo, sleeper tradicional y ducto submarino. ➤ Caracterizar el ducto submarino sometido a presión interna y carga térmica respecto al flujo de petróleo y la fuerza hidrostática en el fondo marino. ➤ Desarrollar un modelo de simulación numérica del comportamiento del ducto submarino sobre el sleeper curvo y tradicional dentro de un régimen elástico-plástico. 	<p>HIPÓTESIS GENERAL: Existen diferencias significativas en el pandeo lateral de los ductos submarinos sobre los sleepers curvos en comparación con los tradicionales.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECIFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ La geometría del sleeper (curvo o tradicional) y del ducto submarino afecta significativamente el pandeo lateral del ducto. ➤ La presión interna y carga térmica del ducto submarino influyen significativamente en el pandeo lateral del ducto. ➤ El modelo de simulación numérica proporciona resultados significativamente diferentes para el pandeo lateral en sleepers curvos y tradicionales. 	<p>VARIABLE DEPENDIENTE:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Pandeo lateral del ducto <p>VARIABLE INDEPENDIENTE:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Geometría del sleeper y ducto ➤ Caracterización del ducto ➤ Modelo de simulación numérica

Capítulo V. Desarrollo del trabajo de investigación

El desarrollo de la tesis se enfocó en la construcción y análisis de un modelo numérico representativo del proceso de pandeo lateral de ductos submarinos sobre sleepers curvos frente a los tradicionales, utilizando el software ABAQUS. Este modelo se dividió en tres partes principales: el ducto, el suelo y el sleeper curvo, y se estructuró en cinco pasos para abordar diferentes aspectos del proceso.

Inicialmente, se llevaron a cabo estudios para determinar el tamaño óptimo del modelo, con el objetivo de garantizar que este no influyera en los resultados obtenidos. Se analizaron modelos de diferentes longitudes, incluyendo 4.5, 10, 20 y 30 kilómetros, evaluando cómo la variación en la escala del modelo afectaba la precisión y la eficacia de las simulaciones.

Además, se realizó un análisis para estabilizar problemas estáticos inestables que surgían durante el estudio. Dado que el trabajo generaba una gran liberación de energía de deformación para mantener el equilibrio estático del ducto con rigidez negativa, se originaban pandeos laterales localizados a lo largo del ducto, debido a la variación de temperatura y presiones. Este análisis de estabilización fue fundamental para garantizar la validez y la convergencia de las soluciones numéricas obtenidas.

A partir de este punto, se procedió a detallar los procesos de construcción del modelo numérico, centrándose en los siguientes aspectos:

Partes del modelo numérico: Se dividió el modelo en tres partes principales: el ducto, el suelo y el sleeper curvo. Cada una de estas partes fue meticulosamente modelada para reflejar con precisión las condiciones reales del sistema submarino y su interacción con el entorno circundante.

Propiedades mecánicas y parámetros de operación: Se consideraron las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el ducto, el sleeper curvo y el suelo, así como los parámetros de operación relevantes para el análisis. Esto incluyó características como la resistencia a la tracción, la elasticidad y la plasticidad de los materiales, así como las condiciones de carga y las fuerzas externas que actúan sobre el sistema.

Condiciones de contorno: Se definieron las condiciones de contorno para cada parte del modelo, estableciendo los límites y restricciones que influirían en el comportamiento del sistema. Estas condiciones fueron esenciales para garantizar la validez y la precisión de las simulaciones numéricas realizadas.

Condiciones de contacto: Se modelaron las condiciones de contacto entre el ducto, el sleeper curvo y el suelo, considerando la fricción y la interacción entre las diferentes superficies. Esto fue crucial para simular con precisión la transferencia de cargas y el comportamiento estructural del sistema.

Pasos de análisis de carga: Se diseñaron y ejecutaron una serie de pasos de análisis de carga para simular diferentes escenarios operativos y condiciones de funcionamiento del sistema submarino. Estos pasos incluyeron el asentamiento del ducto, el levantamiento del sleeper curvo, la aplicación de presión interna y variaciones de temperatura.

Selección del método de estabilización: Se evaluaron y seleccionaron métodos de estabilización adecuados para abordar problemas estáticos inestables que surgían durante el análisis. Esto incluyó consideraciones sobre la estabilidad del modelo y la convergencia de las soluciones numéricas obtenidas.

En resumen, el desarrollo de la tesis se basó en construir y analizar el modelo numérico utilizado en el estudio del pandeo lateral de ductos submarinos sobre sleepers curvos frente a los tradicionales. Cada paso y aspecto del proceso fue cuidadosamente considerado para garantizar la validez y la precisión de los resultados obtenidos.

5.1 Partes del modelo numérico

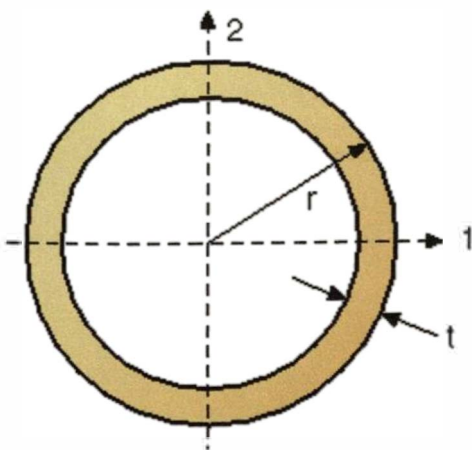
El modelo numérico propuesto consiste básicamente en tres partes diferentes: Suelo, ducto y sleeper curvo. El suelo y sleeper curvo son modelados como cuerpos rígidos bidimensionales (Analytical rigid) por elementos de tipo R3D4 (sin deformaciones) para evitar efectos de penetración entre superficies.

Para el análisis de pandeo de ductos submarinos, generalmente es utilizado elementos de tipo viga PIPE31 (3-node linear pipe) y PIPE32 (3-node quadratic pipe) que son cuerpos deformables bidimensionales, porque permiten aplicar presiones internas y externa en el ducto. Además, estos dos elementos son parecidos al elemento de viga TIMOSHENKO "B31" (seis grados de libertad). Otro elemento utilizado para el análisis de pandeo lateral de ductos submarino sin cargas de presiones es el S4R, el cual fue utilizado por RUN.

El ducto fue echo con elemento tipo PIPE31 con sección transversal representada en la Figura 3.1 donde se requiere el radio externo y el espesor de la pared del ducto. Este elemento es seleccionado por motivos de aproximación optima fundamentado por los autores WANG, TIANFENG y LI.

Figura 5.1

Sección transversal del ducto submarino



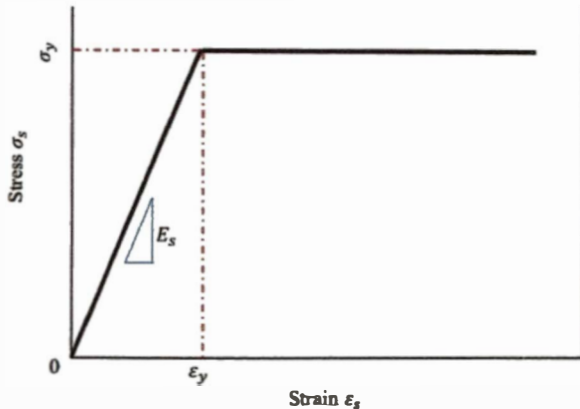
Nota: fuente ABAQUS

5.2 Propiedades mecánicas y parámetros de operación

El material del ducto es acero se asume un comportamiento elástico perfectamente plástico (ver Figura 5.2), y sus propiedades mecánicas y parámetros de operación son representadas en la Tabla 5.1 y Tabla 5.2 respectivamente.

Figura 5.2

Comportamiento del material elástico perfectamente plástico



Nota: fuente Liu et al. (2015)

Tabla 5.1

Constante para modos de pandeo lateral.

Ducto acero: API 5L Gr: X-65		
Parámetro	Medida	Unidad
Diámetro Externo (d)	323,9	mm
Espesor de la pared (t)	23,8	mm
Revestimiento Externo (Triple camada de PP solida con 900 kg/m ³)	50	mm
Peso Distribuido (w)	1367	N/m
Coefficiente de Atrito con o Solo (μ)	0,3	---
Módulo de Elasticidad (E)	2,07E+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3	---
Coefficiente de Expansión Térmica (α)	1,17E-05	1/°C
Esfuerzo de fluencia (σ _y)	4,48E+8	N/m ²

Nota: fuente API (2004)

Tabla 5.2

Parámetros operacionales.

	Medida	Unidad
Presión del proyecto	20,7	Mpa
Temperatura del proyecto	90	°C
Densidad del fluido interno	930	kg/m ³
Ciclos de calentamiento	30	-
Densidad del agua de mar	1030,6	kg/m ³
Profundidad en el mar	1000	m

5.3 Condiciones de contorno

Para poder resolver las ecuaciones diferenciales generadas en el análisis numérico se necesita determinar las condiciones de contorno. Ellas son:

- Fijar suelo: condición necesaria para que el suelo no se mueva.
- Simetría del ducto submarino: el nodo sobre el sleeper curvo recibe la condición de simetría, disminuyendo el esfuerzo computacional y el tiempo del análisis.
- Extremidad del ducto: el nodo de la extremidad del ducto fue fijado para representar un análisis de tipo viga empotrada. Esto es creado al utilizar presiones interna, externa y temperatura en el ducto.
- Levantamiento del sleeper curvo: como la condición que adopta inicialmente para el sleeper es enterrada, es necesario levantar una altura igual al diámetro del sleeper.
- Imperfección del ducto: condición que se aplica a la desviación lateral en el nodo sobre el sleeper curvo para inducir el pandeo.

Tabla 5.3

Condiciones de contorno.

Pasos	Fijar solo	Simetría del ducto	Extremidad del ducto	Imperfección del ducto	Levantamiento del ducto
1	Activado	Activado	Desactivado	Desactivado	Desactivado
2	Activado	Activado	Desactivado	Desactivado	Desactivado
3	Activado	Activado	Desactivado	Activado	Activado
4	Activado	Activado	Activado	Desactivado	Activado
5	Activado	Activado	Activado	Desactivado	Activado
6	Activado	Activado	Activado	Desactivado	Activado

5.4 Condiciones de contacto

Las condiciones de contacto suelo-ducto y sleeper-ducto son modeladas de acuerdo a la ley de COULOMB para fricción seca (ver ecuación 5.1). La fuerza de fricción es la constante y contraria a la dirección del movimiento.

N: Fuerza normal.

μ : Coeficiente de fricción.

$$F_R = N\mu$$

5.1

En la programación, el tipo de fricción usada para el suelo es Anisotrópico, o sea, en la dirección axial es un valor y en la dirección lateral es diferente. El atrito (deviación lateral) utilizado para el contacto entre ducto y sleeper es isotrópico. Se analizarán 3 tipos de fricciones (ver Tabla 5.4), donde la condición suelo-ducto axial es usada durante el levantamiento del sleeper (para realizar esta simulación el sleeper curvo fue supuesto inicialmente enterrado y este luego es levantado hasta su posición final), el proceso es observado en la Figura 5.3. La secuencia de pasos para el uso de la fricción en el modelo es representada en la Tabla 5.5.

Figura 5.3

Representación de la simetría en el modelo numérico



Tabla 5.4

Relación de coeficientes de fricción.

Partes	Tipos	coeficientes	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
solo-ducto axial	Anisotrópico	coeficiente axial	0	0	0	0
		coeficiente lateral	0.4	0.6	0.8	0.8
solo-ducto	Anisotrópico	coeficiente axial	0.2	0.3	0.4	0.5
		coeficiente lateral	0.4	0.5	0.6	0.7
sleeper-ducto	Isotrópico	coeficiente lateral	0.075	0.1	0.125	0.15

Nota: fuente ABAQUS

Tabla 5.5

Representación de fricción durante la programación ABAQUS.

Pasos	solo-ducto Axial	solo-ducto	Sleeper-ducto
1	Desactivado	Activado	Activado
2	Desactivado	Activado	Activado
3	Desactivado	Activado	Activado
4	Activado	Activado	Activado
5	Activado	Activado	Activado
6	Activado	Activado	Activado

Nota: fuente ABAQUS

5.5 Pasos de análisis de carga

El modelo es dividido en seis pasos de análisis de carga siendo ellos:

- 1. Asentamiento del ducto:** En este paso se aplica el peso del ducto sumergido por unidad de longitud para luego activar el contacto entre superficies.

Figura 5.4

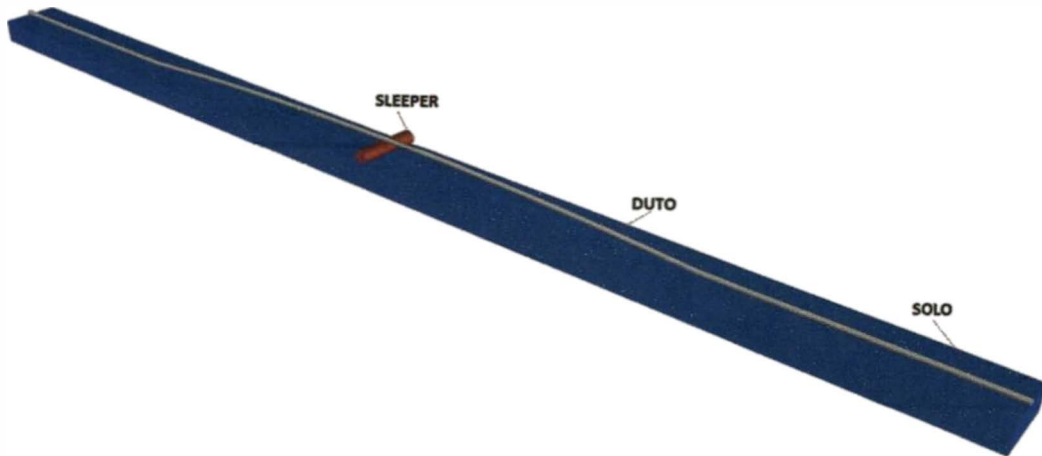
Asentamiento del ducto no fondo marino (suelo)



- 2. Levantamiento del sleeper curvo:** En este paso es necesario determinar el diámetro del sleeper (debido a la relación directa con la posición de equilibrio del ducto sobre el sleeper). Para hacer esa simulación el sleeper fue supuesto inicialmente enterrado y después fue levantado hasta su posición final. El proceso es observado en la siguiente figura:

Figura 5.5

Levantamiento do sleeper en el nodo de simetría



- 3. Desviación Lateral:** se crea una imperfección geométrica en el ducto (al desviarlo lateralmente en el punto de simetría) fundamentado por las investigaciones de LIU. Esa imperfección es hecha para inducir el pandeo lateral, pero para mayores incrementos de desviaciones es reducida la fuerza axial en la sección media.
- 4. Aplicación de presión Interna:** En este paso se aplica la presión interna a lo largo del ducto debido al fluido de petróleo que transporta. Según HOBBS se determina que una diferencia de presión de 4.65 Mpa equivale a una variación de temperatura de 5°C en el ducto submarino.
- 5. Aplicación de presión Externa:** Aquí se calcula la presión hidrostática del ducto sometido a grandes profundidades marinas.
- 6. Aplicación de gradiente de temperatura:** En este paso se crea ciclos térmicos de operación para una temperatura de 90°C simulando la entrada en operación, y paradas debido al mantenimiento de las líneas submarinas. Como premisa se considera una parada del sistema de extracción de petróleo por año, para una vida útil media de 30 años.

Debido a los ciclos térmicos, la desviación lateral del ducto aumenta continuamente, ya que no ocurre el retorno completo del ducto sobre el sleeper curvo para

la posición inicial, pues el proceso no es conservativo, teniendo disipación de energía por la fricción. Ese fenómeno fue ampliamente estudiado por TVERAMO.

5.6 Selección del método de estabilización

Para el modelo numérico propuesto, es usado el método modificado de NEWTON RAPHSON como "General static", porque controla el proceso de deformación de la estructura inestable mediante una matriz de amortecimiento. Para eso, es analizado el pandeo lateral del ducto submarino sobre sleeper curvo (sus propiedades mecánicas y parámetros de operación están representados en la Tabla 5.1 y Tabla 5.2 respectivamente y la secuencia de cargamento en la sección 5.5) sujeto a diferentes FDE (fracción de disipación de energía): 0.002, 0.0002, 0.00002 (ver Figura 5.6, 5.7 y 5.8) con la finalidad de escoger el valor que no altere los resultados del problema, analizándose, la tensión axial, fuerza axial (escogido el punto de la sección transversal del ducto con mayor valor) y desviación lateral (en la región próxima al punto de simetría). A continuación, se presenta los siguientes gráficos las respuestas en la región comprendida entre el nodo de simetría y una distancia de ella.

Figura 5.6

Desviación lateral a lo largo del ducto por FDE

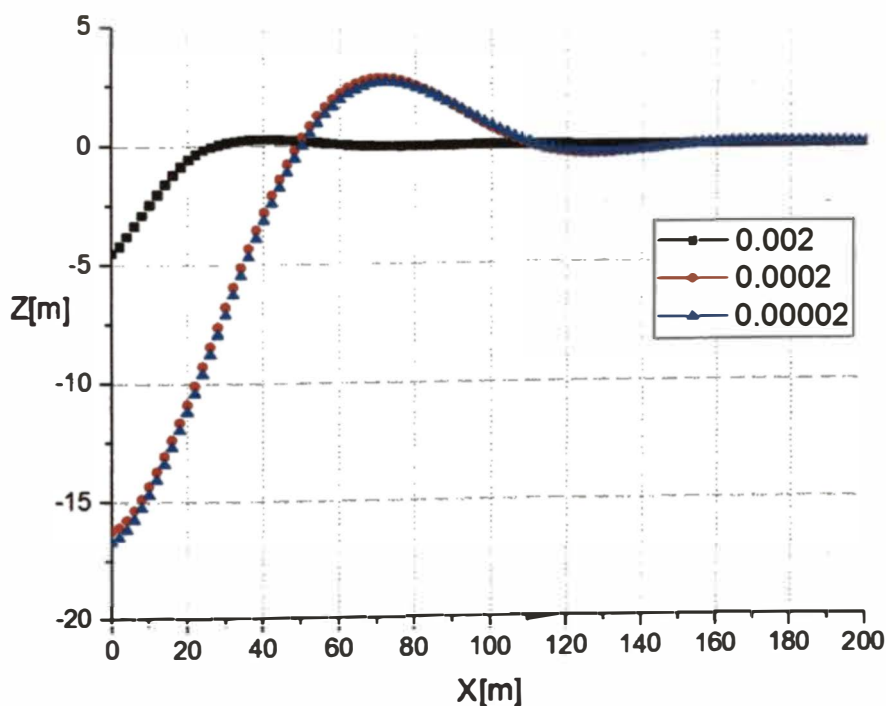


Figura 5.7

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por FDE

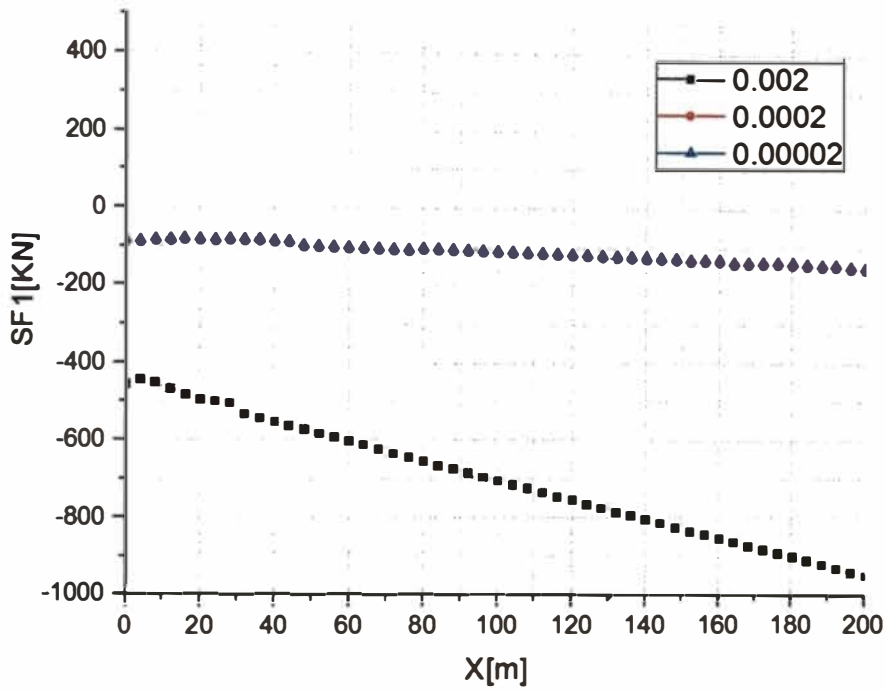
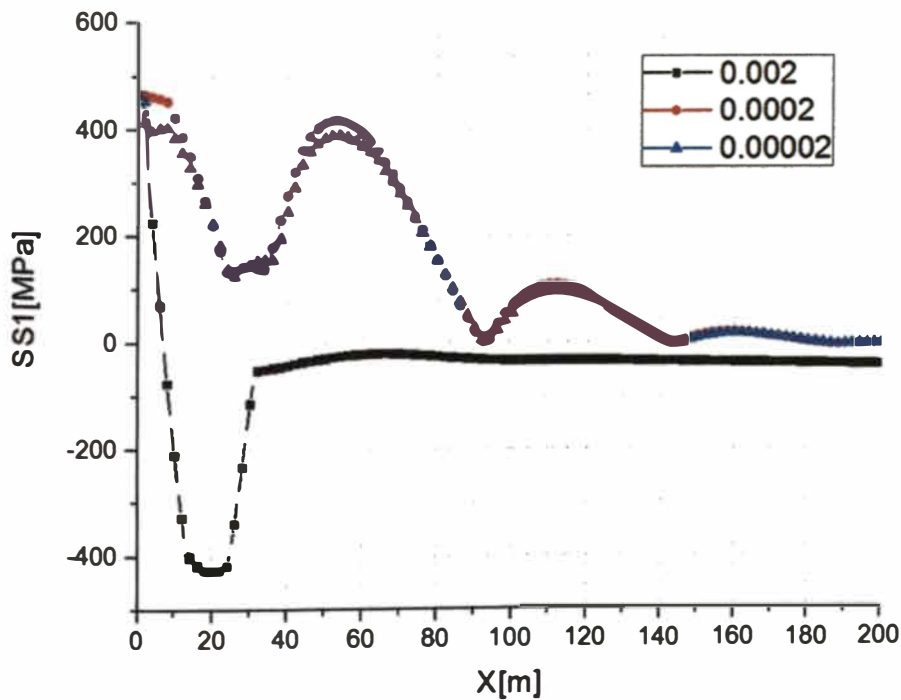


Figura 5.8

Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por FDE



De los gráficos presentados en las figuras, se determina que, conforme los FDE van disminuyendo, los resultados de los análisis son más próximos, sin embargo, el

rendimiento computacional es mucho mayor. Optándose por un FDE de 0.0002 para estabilizar el problema y no alterar los resultados en los próximos análisis.

5.7 Análisis de malla

En cuanto a la malla, el suelo y sleeper curvo son superficies master de contacto debido a que fue considerado como Analytical rigid de elementos tipo R3D4, esto evita penetraciones entre superficies próximas haciendo que la malla de superficie master se adapte a la parte slave, entonces, no se necesita enmallar porque ellos son superficies rígidas.

Para la malla del ducto es utilizado el elemento de tipo PIPE31, esto realiza cargas hidrostáticas. Para reducir el tiempo computacional es creado una región simétrica en el medio del ducto y sleeper (ver Figura 5.3). Luego, es dividido el ducto submarino en dos partes: la primera parte, del punto de simetría hasta 1500 m (Región A), con diferentes separaciones entre elementos de: 0.25, 0.5, 0.75, 1 m (ver Figura 5.9 y Tabla 5.6).

Figura 5.9

Representación de elementos en la malla del ducto

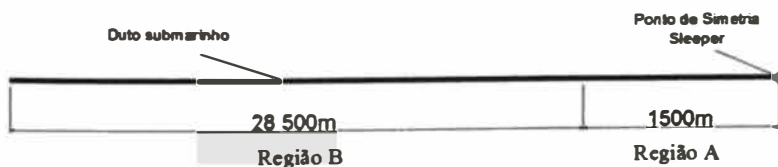


Tabla 5.6

Separaciones de elementos en la Región A.

Malla	Separación entre Elementos (m)		Tiempo Computacional (min)
	Región A	Región B	
M1	0,25	5	389
M2	0,5	5	259
M3	0,75	5	148
M4	1	5	124

En la segunda parte, del extremo del ducto hasta 28000 m (Región B), con diferentes separaciones entre elementos de: 0.25, 5, 10 y 20 m (ver Figura 5.9 y Tabla 5.7). Después, se analiza el pandeo lateral del ducto sobre sleeper curvo 5 ciclos térmicos

operacionales y diferentes tipos de llama en el ducto, analizando las respuestas de esfuerzos axiales, tensiones axiales y desviaciones laterales (ver figura 5.10, 5.11 y 5.12) los cuales son factores importantes para un análisis de falla.

Tabla 5.7

Separación de elementos en la Región B.

Malla	Separación entre Elementos (m)		Tiempo Computacional (min)
	Región A	Región B	
M1	0,25	2,5	180
M2	0,25	5	389
M3	0,25	10	200

Análisis de la malla en la primera región A:

Figura 5.10

Desviación lateral a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región A

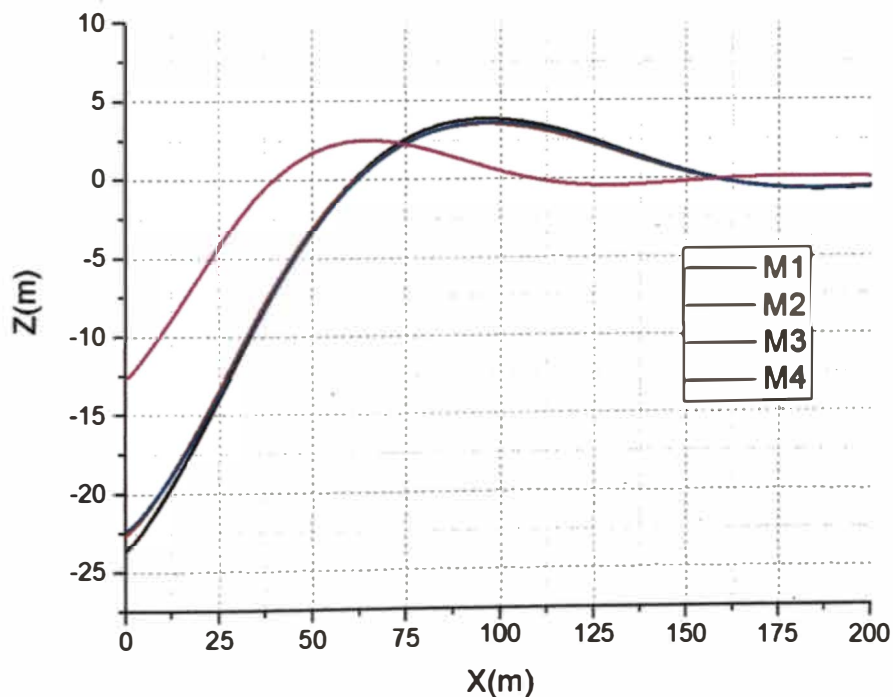


Figura 5.11

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región A

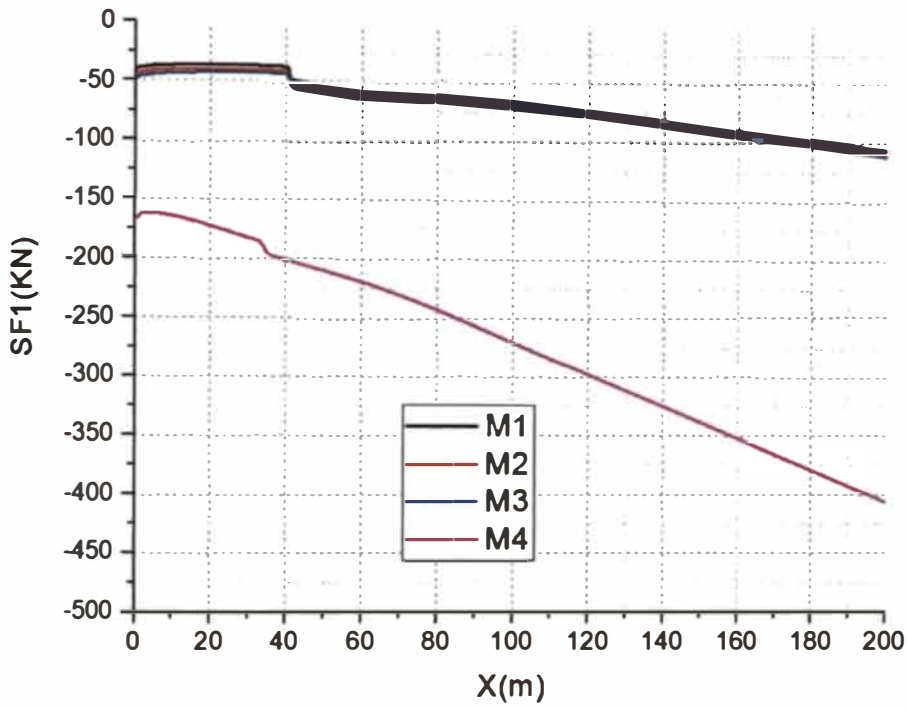
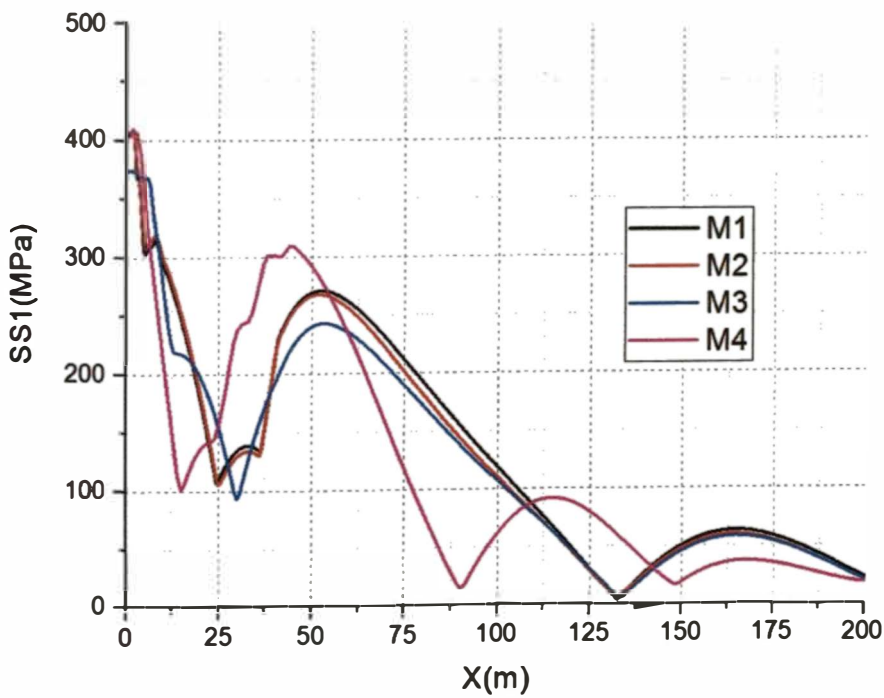


Figura 5.12

Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región A



De las Figuras 5.11 y 5.12, cuando la separación de elementos en el ducto es mayor a 1m los resultados son muy diferentes, sin embargo, cuando la separación de elementos es próxima a 0.25 m los resultados son casi los mismos. Determinándose una separación de elementos en la región A de 0.25m para obtener resultados confiables. Luego, es creada una separación de elementos en la región B manteniendo la separación de elementos en la región A.

Análisis de la malla en la primera región B:

Figura 5.13

Desviación lateral a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región B

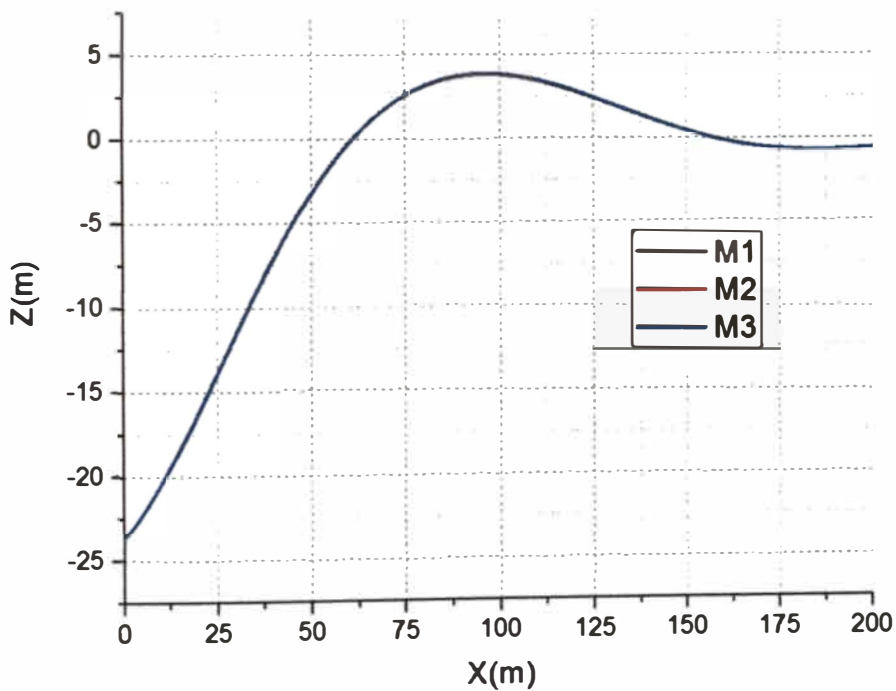


Figura 5.14

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región B

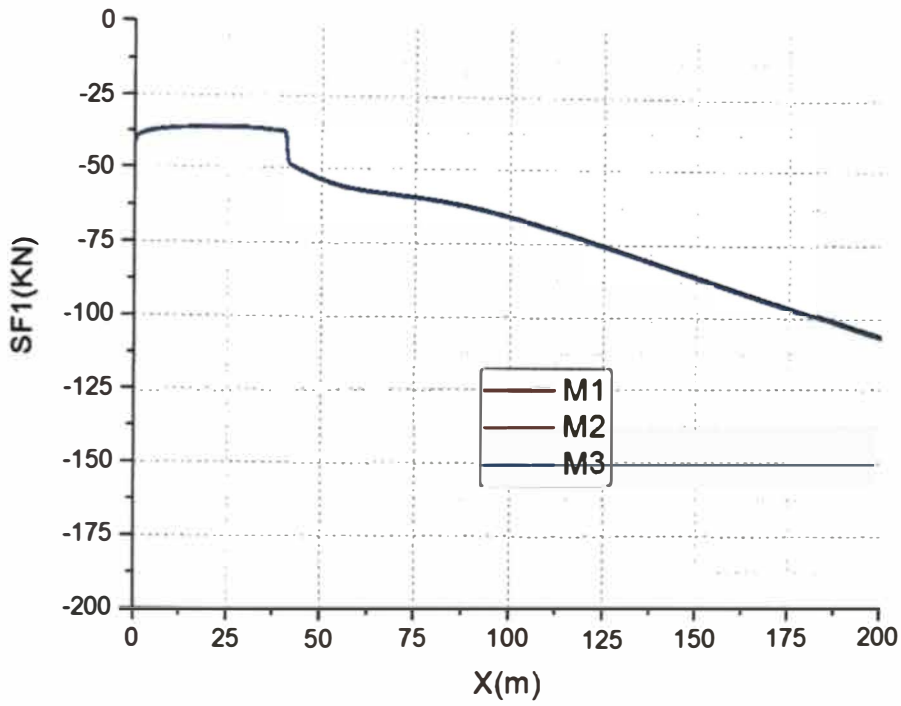
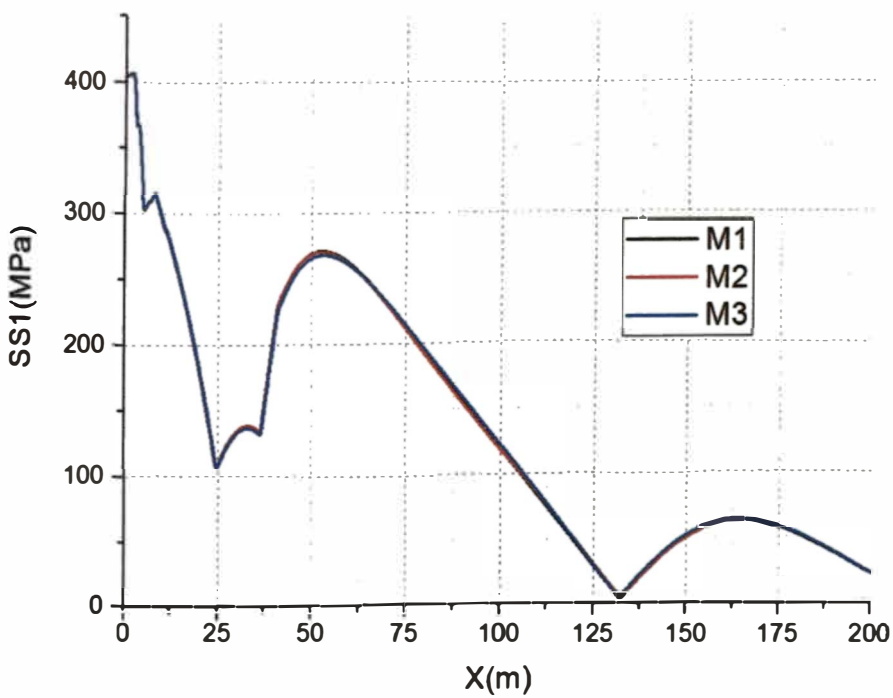


Figura 5.15

Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por cada separación de elementos en la Región B



De las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15, fue demostrado que la separación de elementos en la región B no tiene efecto en la respuesta, debido a que la región A es más sensible.

Finalmente es determinada la siguiente configuración de malla para el trabajo:

Tabla 5.8

Separaciones de elementos en el trabajo.

Malla	Separación entre Elementos (m)	
	Región A	Región B
M1	0,25	2,5

5.8 Determinación del tamaño del modelo

Para definir el tamaño del modelo es necesario analizar los siguientes tamaños de ductos: 4.5, 10, 20 y 30 km los cuales son comparados entre ellos las respuestas de las fuerzas axiales, tensiones y desviaciones laterales en la sección transversal; a fin de saber cuál tamaño simula un ducto infinito de manera al no haber influencia de la extremidad en la región de pandeo. Se presenta los siguientes gráficos, las respuestas a lo largo del ducto en el inicio del nodo de simetría de un análisis de pandeo lateral de ducto submarino sobre sleeper curvo de diámetro 1m, cuyo coeficiente de fricción del suelo-ducto axial y lateral es 0.3 y 0.7 respectivamente. El coeficiente de fricción del sleeper-ducto es de 0.1 y una carga térmica operacional de 90°C .

En la Figura 5.16 fueron comparados las fuerzas axiales en cada nodo, notándose que el tamaño del ducto de 4.5 km presento resultados muy diferentes de los demás. Sin embargo, para tamaños de 10, 20 y 30 km no concluye nada porque las curvas son casi iguales entre ellas. En seguida se comparó las tensiones axiales en la sección de la Figura 5.17, determinándose que el modelo de 10 km presenta resultados muy diferentes de los demás, sin embargo, para los modelos de 20 y 30 km presentan diferencias porcentuales significativas entre nodos más de 6%. Además, en la Figura 5.18 la diferencia porcentual de los valores de desviación lateral obtenidos de los ductos de 10 y 20 km es aproximadamente de 4%, entonces, la diferencia porcentual para los modelos de 20 y 30

km es menor que 2%. En conclusión, se determina un tamaño no menor de 30 km para el modelo propuesto.

Figura 5.16

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto de diámetro 1m

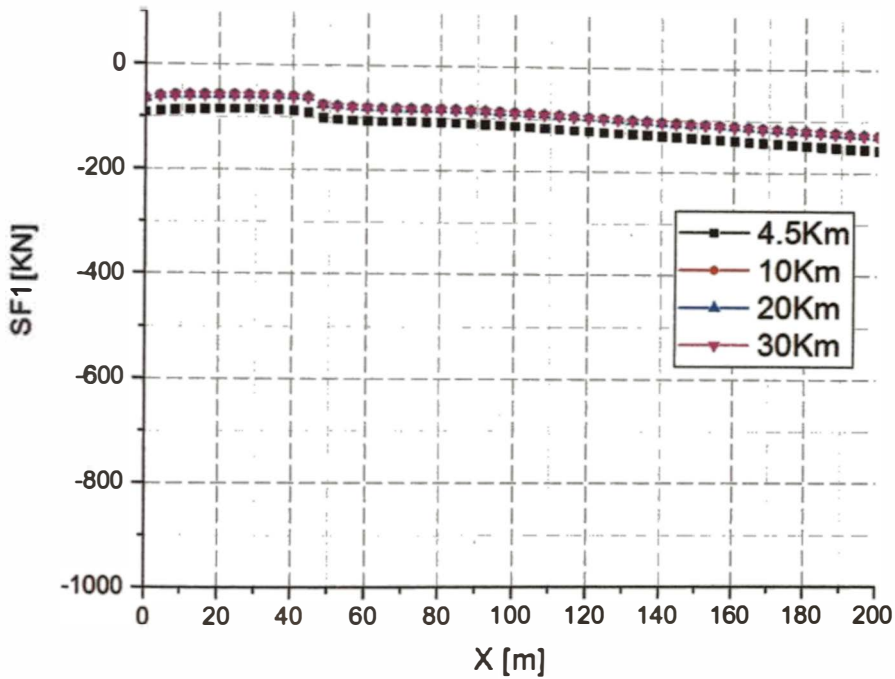


Figura 5.17

Tensión axial en la sección a lo largo del ducto de diámetro 1m

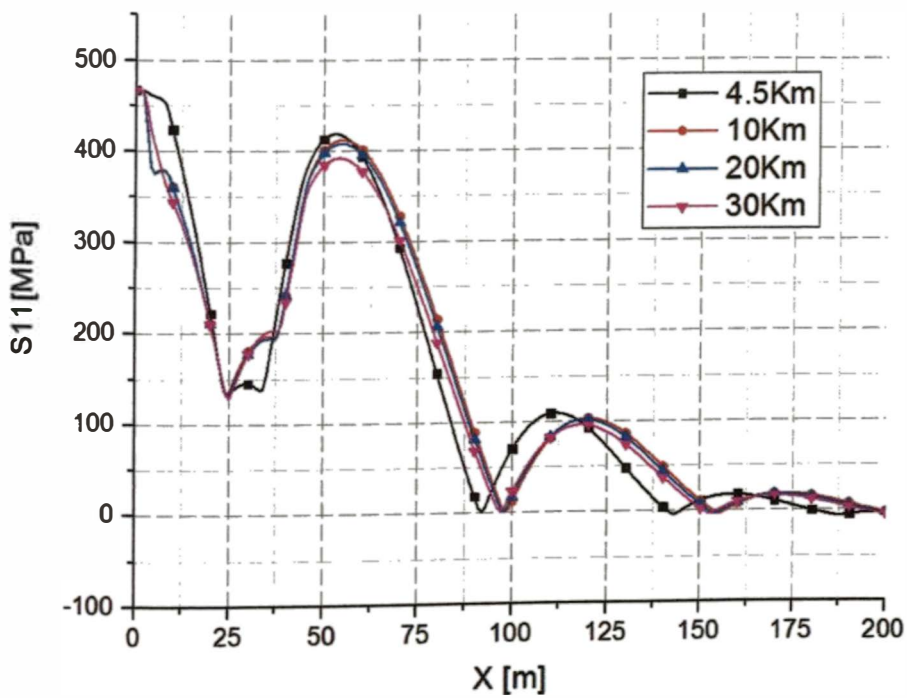
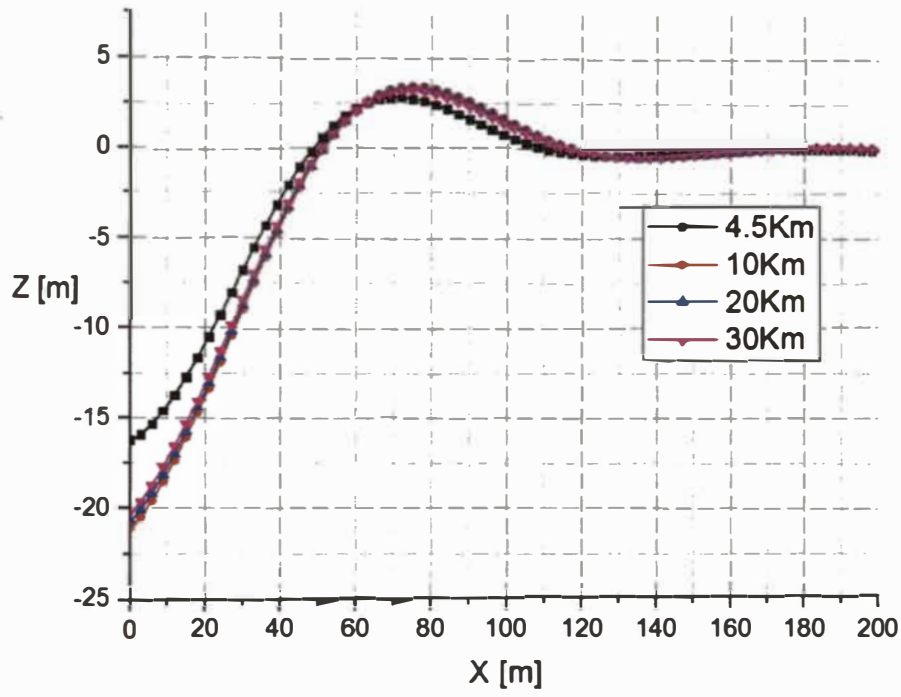


Figura 5.18

Desviación lateral a lo largo del ducto de diámetro 1m



Capítulo VI. Análisis y discusión de resultados

Este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la investigación llevada a cabo. Aquí, se despliega un conjunto de hallazgos que arrojan luz sobre el comportamiento de los ductos submarinos en relación con los sleepers curvos, abordando múltiples aspectos fundamentales de su interacción. Desde la evaluación de los diámetros de los sleepers hasta el análisis de las imperfecciones laterales, cada aspecto se examina para comprender cómo estos factores influyen en la estabilidad y el rendimiento de los sistemas submarinos. Además, se exploran los efectos de la fricción en diferentes contextos, desde la interacción entre el sleeper y el ducto hasta la relación entre el ducto y el suelo circundante. Estos análisis proporcionan una visión detallada de los mecanismos subyacentes que guían el comportamiento estructural de los ductos submarinos en condiciones reales. En particular, el estudio de los ciclos térmicos revela cómo la variación de la temperatura a lo largo del tiempo impacta significativamente en la integridad y estabilidad del sistema. En última instancia, el capítulo concluye con una reflexión sobre el significado y la relevancia de los resultados obtenidos, destacando tanto sus implicaciones prácticas como su contribución al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería submarina. Este análisis sienta las bases para futuras investigaciones y ofrece nuevas perspectivas sobre cómo mejorar el diseño y la operación de los ductos submarinos en entornos marinos complejos.

6.1 Resultados de los diámetros de sleepers

Un sleeper tradicional de proyectos actuales tiene una longitud comprendido entre 30 y 42 m. Sin embargo, en este trabajo son propuestos cuatro modelos numéricos de

sleeper, el primero será un sleeper tradicional como sleeper1 (ver Figura 6.1) de 50 m de longitud y 1m de diámetro y los tres últimos serán sleeper curvos: sleeper2, sleeper3 y sleeper4 (ver Figura 6.2) de 50 m de longitud y diferentes alturas de 1.5, 2 y 2.5m (ver figura 6.3) representado mediante una ecuación cuadrática de la forma ax^2 .

Figura 6.1

Dimensiones del Sleeper tradicional



Figura 6.2

Dimensiones del Sleeper curvo

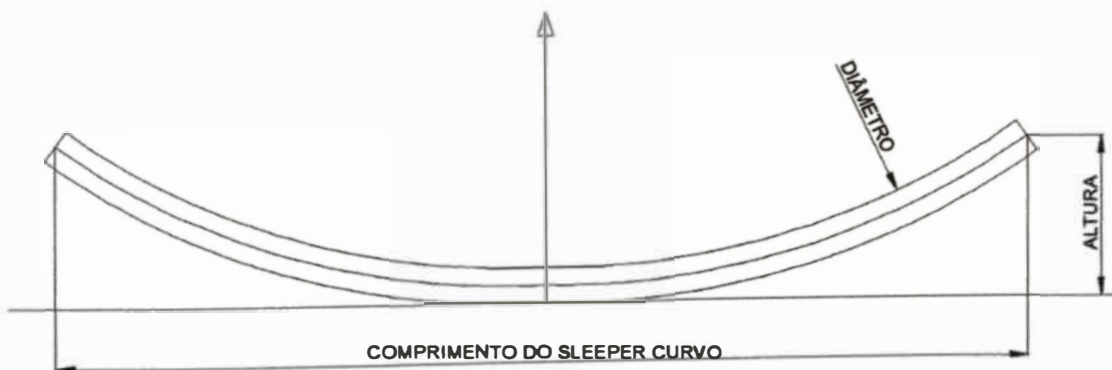


Figura 6.5

Desviación vertical a lo largo del ducto por diámetro sleepers

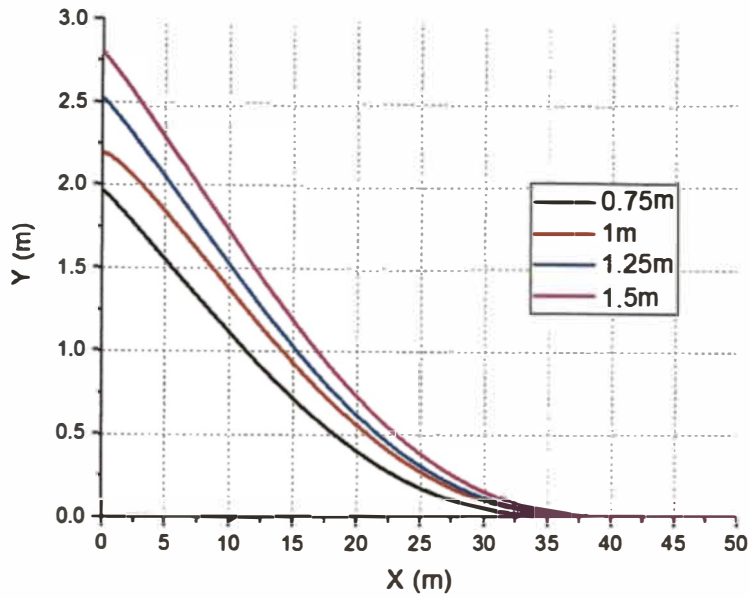


Figura 6.6

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por diámetro sleepers

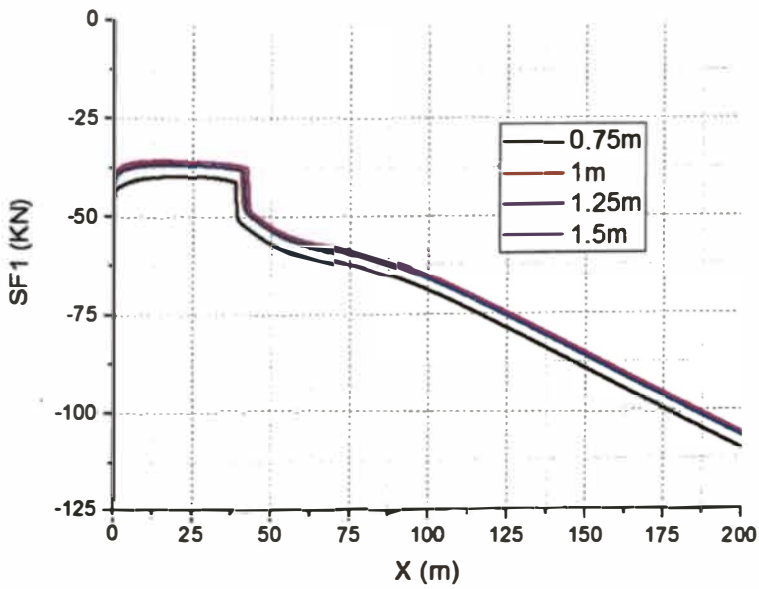


Figura 6.7

Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por diámetro sleepers

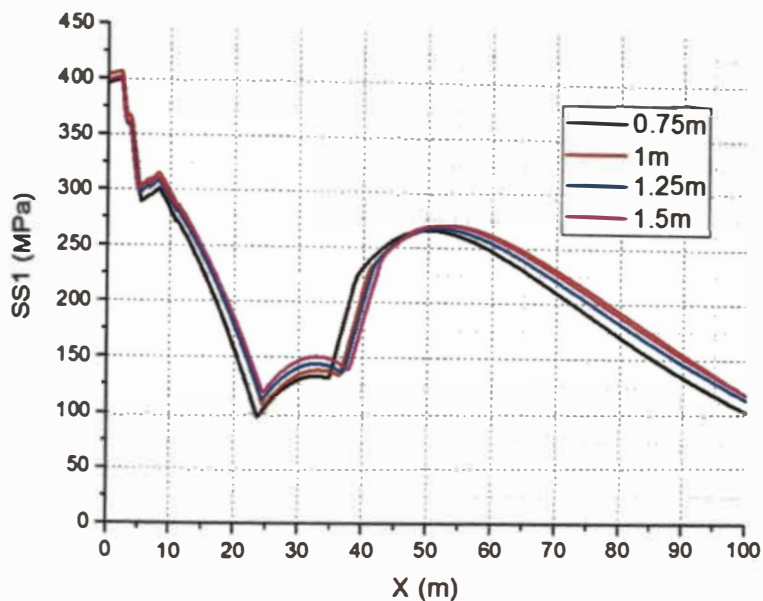
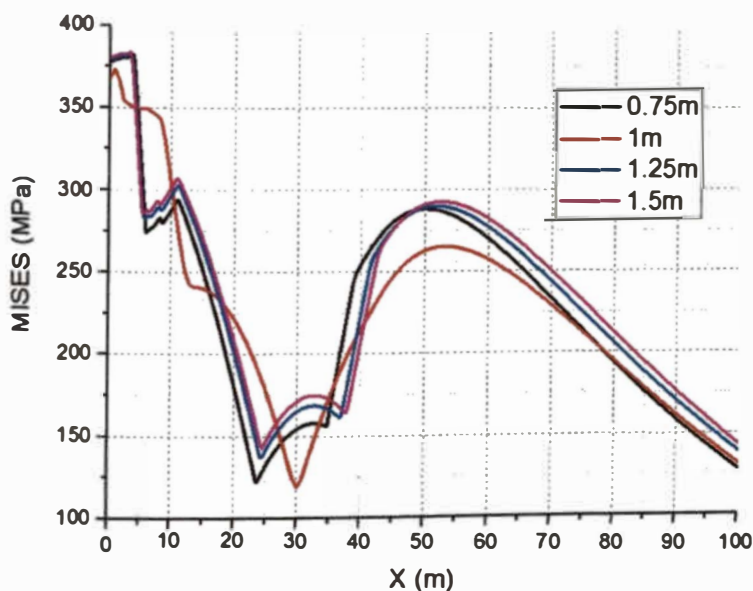


Figura 6.8

Tensión Mises en la sección a lo largo del ducto por diámetro sleepers



Los gráficos presentados fue el resultado de un análisis de pandeo lateral de ducto submarino sobre sleeper curvo operado para una temperatura de 90°C sometido a cinco ciclos térmicos operacionales; determinándose que la desviación lateral en el punto de simetría, aquel que es apoyado sobre el sleeper, aumenta con el aumento de la altura de sleeper. Además, la tensión axial presenta una pequeña disminución con el aumento del

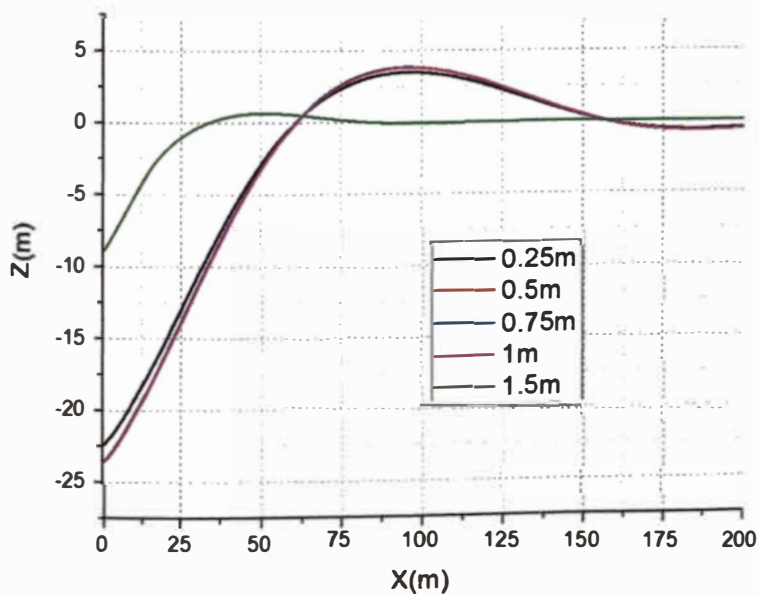
atrito lateral. Finalmente se determina del análisis de gráficos que el sleeper curvo debe tener 1m de diámetro y por disposición de material sobrante de ductos rígidos en los proyectos.

6.2 Resultados de las imperfecciones laterales

La desviación lateral inicial contribuye en la reducción de la fuerza crítica de pandeo durante el lanzamiento del ducto, cuando la embarcación navega en dirección a la ruta predefinida en el proyecto. Es importante destacar que usualmente esta variable es tratada en términos del radio de curvatura a lo largo de la ruta del sistema para la instalación de líneas submarinas; lo cual, es completamente arbitrario y no presenta un patrón definido. Por eso, se presenta análisis de imperfecciones laterales iniciales de: 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5 m, respectivamente, para inducir el pandeo lateral del ducto sobre sleeper curvo sometido a una temperatura de 90⁰C para 5 ciclos térmicos operacionales. Sera estudiado los efectos de desviaciones laterales, fuerza y tensiones axiales en la sección transversal.

Figura 6.9

Desviación lateral a lo largo del ducto por imperfección lateral



De la Figura 6.9 se determina que la desviación lateral fue afectada significativamente, presentando resultados incoherentes para valores mayores a 1m de imperfección lateral. De la Figura 6.10 y 6.11 las fuerzas y tensiones axiales en la sección

son casi las mismas para valores entre 0.5 y 0.75 m de imperfección lateral. Determinándose para análisis del proyecto, 0.5 m de imperfección lateral porque presenta resultados más estables.

Figura 6.10

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por imperfección lateral

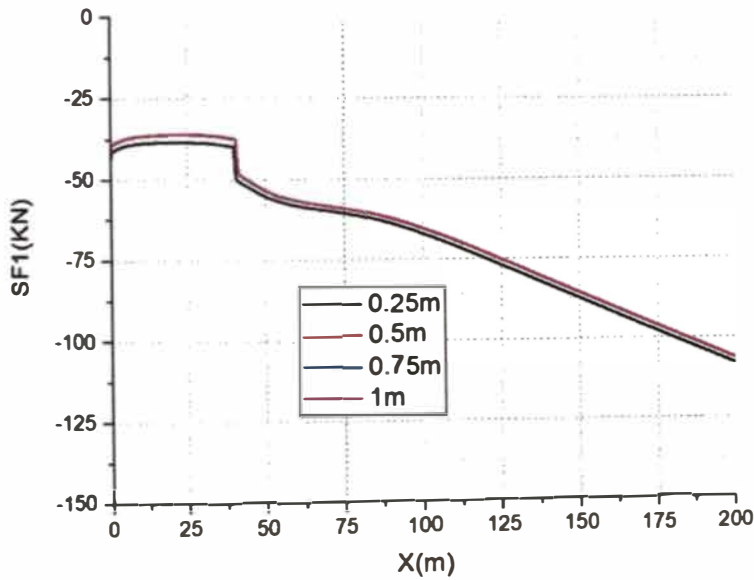
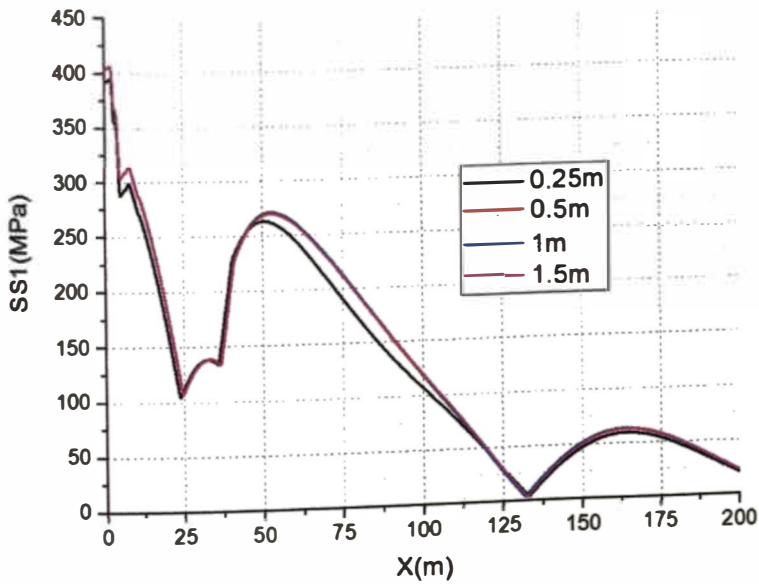


Figura 6.11

Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por imperfección lateral



6.3 Resultados del análisis de fricción

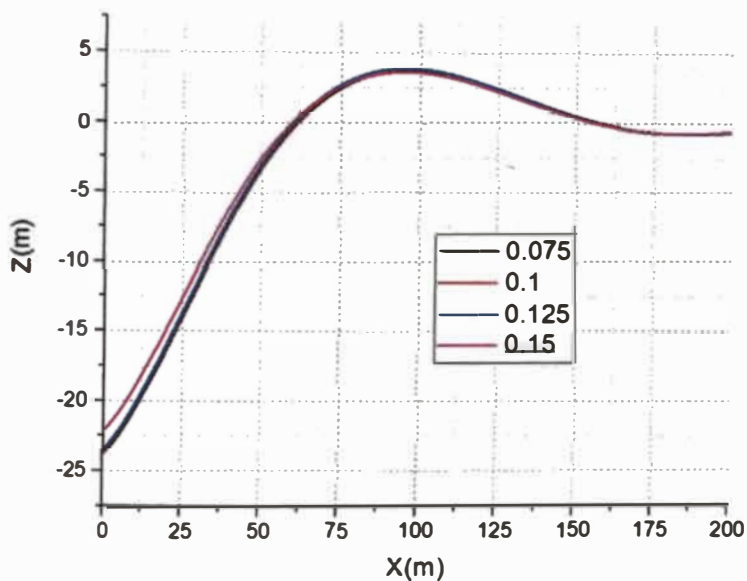
Los gráficos presentados fue el resultado de un análisis de pandeo lateral de ducto submarino sobre sleeper curvo. Operado para 5 ciclos térmicos a 90° C de temperatura.

6.3.1 Fricción lateral sleeper-ducto

Fueron estudiados casos con coeficientes de fricción sleeper-ducto variando de 0.075 a 0.15, respectivamente, y los resultados son presentados en las figuras 6.12, 6.13 y 6.14.

Figura 6.12

Desviación lateral a lo largo del ducto por fricción lateral sleeper-ducto



En la Figura 6.12 se observa que cuanto mayor es la fricción, menor es la desviación lateral del mismo. Adema, con el aumento del coeficiente de fricción las fuerzas axiales tienen una disminución más significativa (ver Figura 6.13). Las tensiones axiales en las regiones más afectadas por el alza de pandeo son reducidas con el aumento del coeficiente de fricción (ver Figura 6.14).

Figura 6.13

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por fricción lateral sleeper-ducto

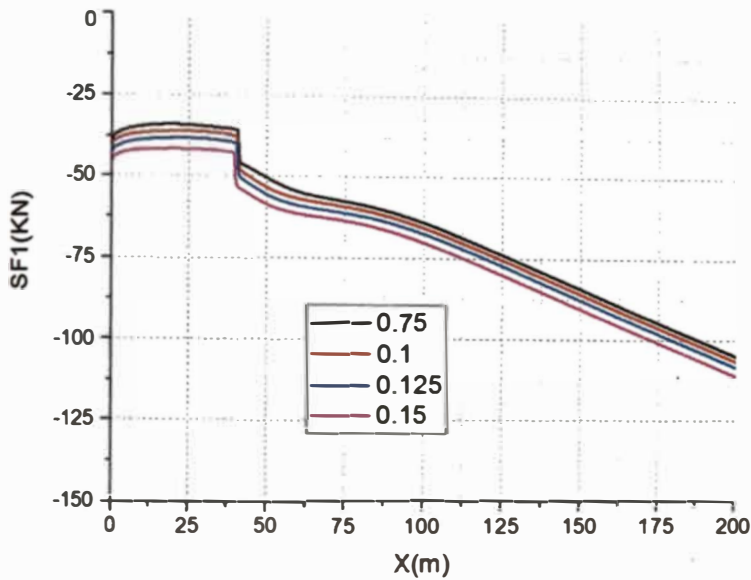
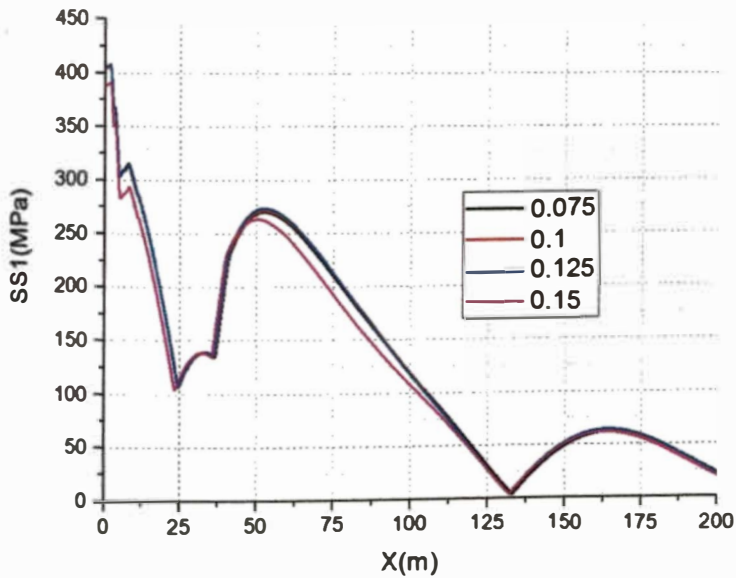


Figura 6.14

Tensión axial en la sección a lo largo del ducto por fricción lateral sleeper-ducto



6.3.2 Fricción lateral suelo-ducto

Fueron estudiados casos con coeficientes de fricción sleeper-ducto variando de 0.075 a 0.15, respectivamente, y los resultados fueron estudiados es casos con coeficientes de fricción suelo-ducto variando de 0.4 a 0.7 y los resultados son presentados en las siguientes figuras:

Figura 6.15

Desviación lateral a lo largo del ducto por fricción lateral suelo-ducto

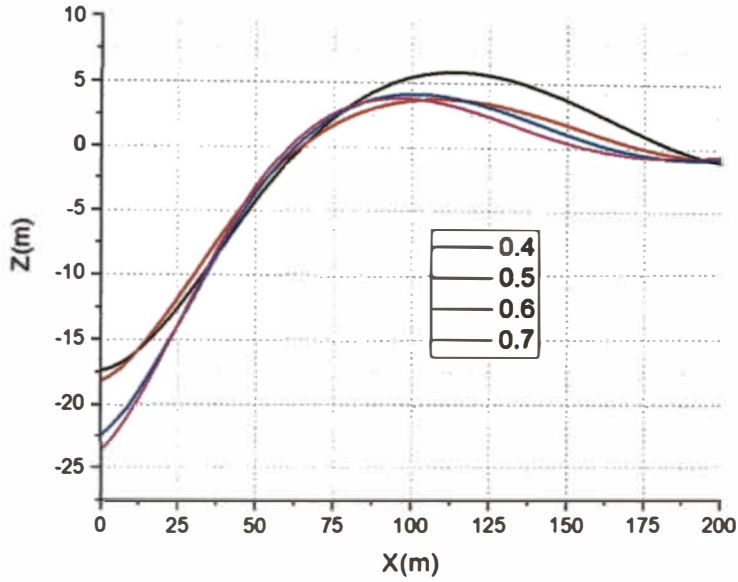


Figura 6.16

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por fricción lateral suelo-ducto

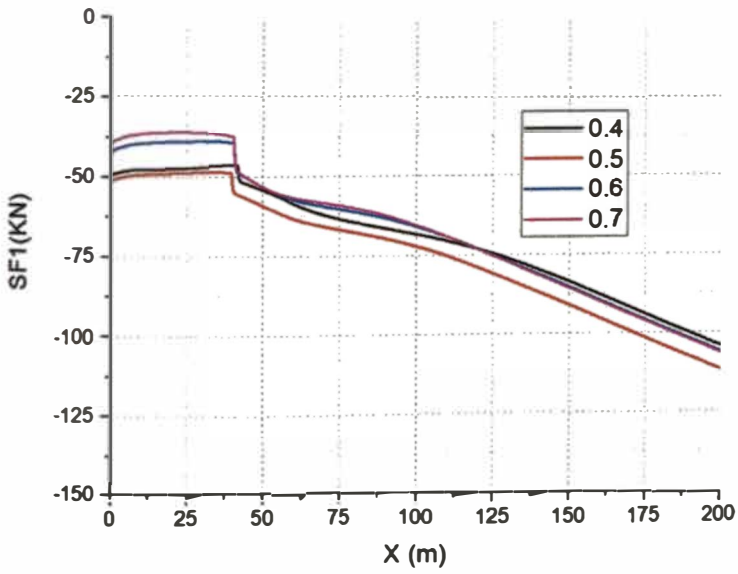
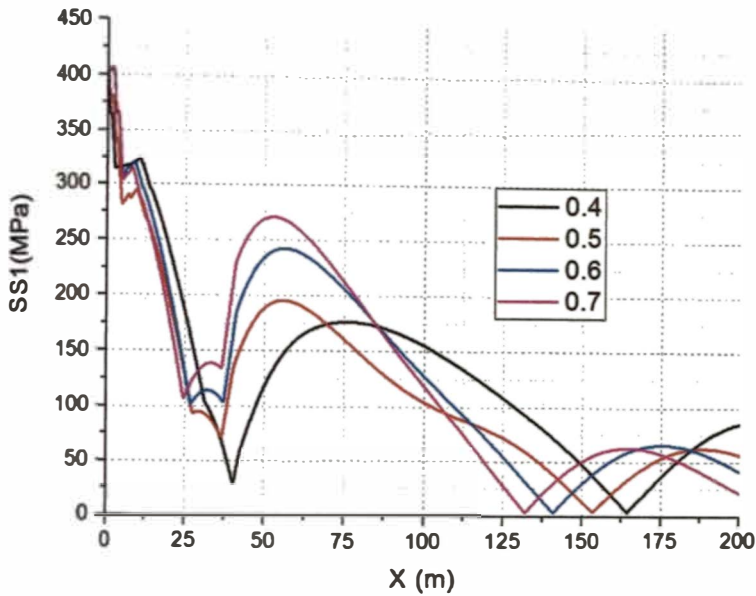


Figura 6.17

Tensión axial en la sección a lo largo del ducto suelo-ducto



Al aumentar la fricción la desviación lateral en el nodo de simetría aumenta significativamente (ver Figura 6.15), sin embargo, en la región de alza de pandeo disminuye significativamente al aumentar la fricción (ver Figura 6.16). Además, las tensiones axiales en la sección aumentan significativamente con el aumento de la fricción (ver Figura 6.17)

6.3.3 Fricción axial suelo-ducto

Fueron estudiados casos con coeficiente de fricción suelo-ducto variando de 0.2 a 0.5 y los resultados son presentados en las figuras 6.18, 6.19 y 6.20.

Se determina que la desviación lateral en el nodo de simetría, aquel que ubica sobre el apoyo del sleeper, expresa una disminución significativa con el aumento de la fricción (ver Figura 6.18). Además, la tensión axial en la sección aumenta y la fuerza axial en la sección disminuye con el aumento de la fricción (ver Figura 6.19 y 6.20).

Figura 6.18

Desviación lateral a lo largo del ducto por fricción axial suelo-ducto

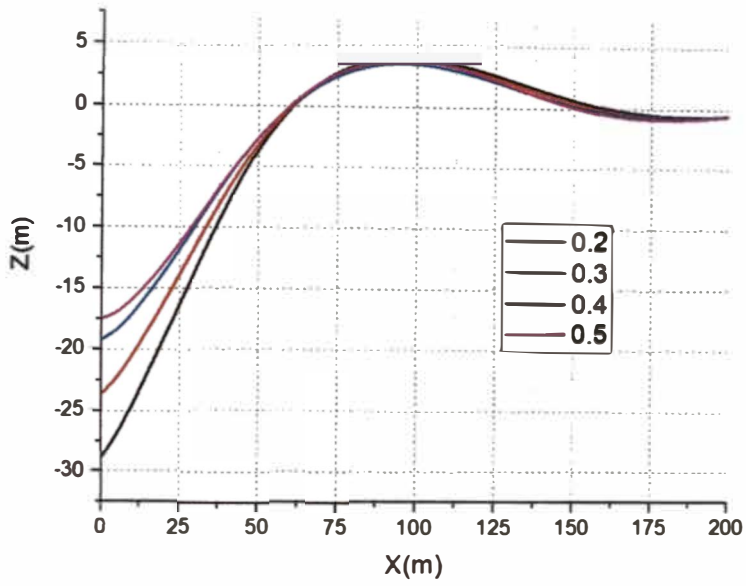


Figura 6.19

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto por fricción axial suelo-ducto

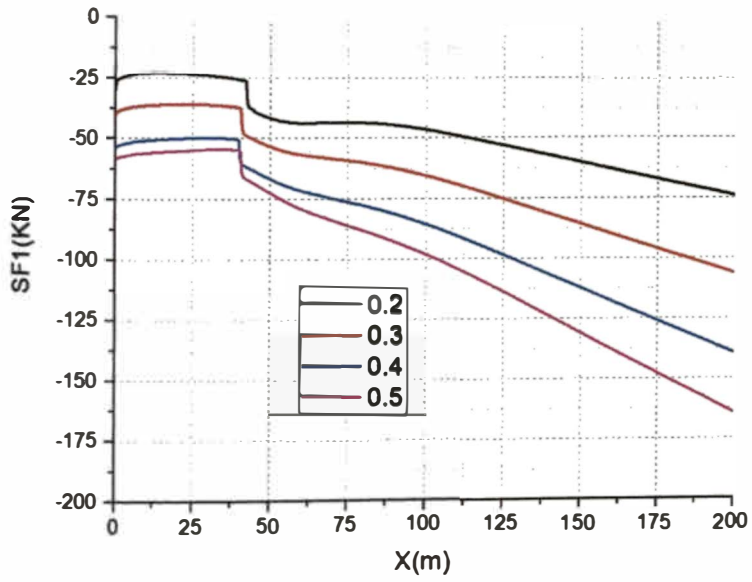
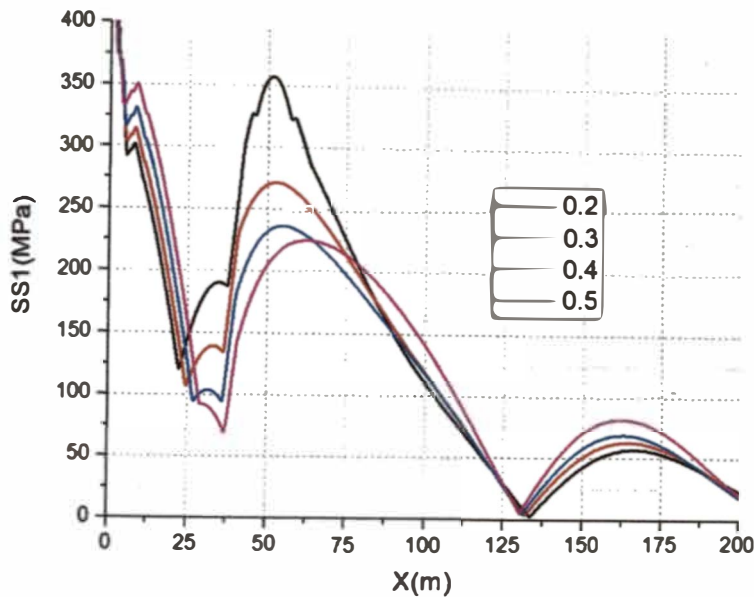


Figura 6.20

Tensión axial a en la sección a lo largo del ducto por fricción axial suelo-ducto



6.4 Resultados del análisis de ciclos térmicos

Debido a los ciclos térmicos operaciones, la desviación lateral del ducto aumenta continuamente, ya que no ocurre el retorno completo del ducto hacia la posición inicial, pues el proceso no es conservativo, presentando disipación de energía por la fricción. Además, se presenta comparación entre *sleeper* curvos (*sleeper02*, *sleeper03* y *sleeper04*) y *sleeper* tradicional o recto (*sleeper01*) calentado a una temperatura de 90 °C para 30 ciclos térmicos operacionales. Los coeficientes de fricción son determinados analizando las respuestas en la sección 4.3, debido a que el fondo marino es irregular y no presenta coeficiente de fricción exacta. Se asume los siguientes coeficientes de fricción para el suelo:

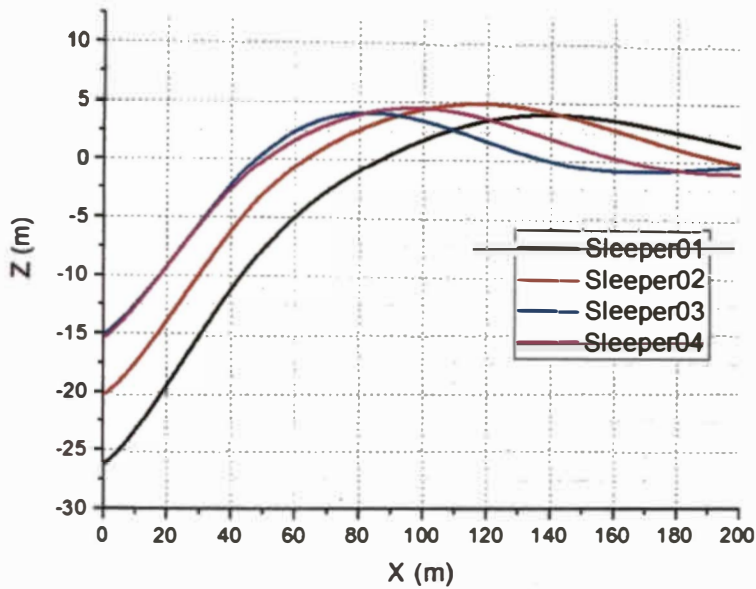
Fricción Axial (suelo-ducto) = 0.3

Fricción Lateral (suelo -ducto) = 0.7

Fricción sleeper-ducto = 0.1

Figura 6.21

Desviación lateral a lo largo del ducto



De la Figura 6.21 es óptimo utilizar sleeper curvo porque obtenemos un 41.5% de desviación lateral menos que un sleeper recto. Además, las fuerzas axiales en la sección (ver Figura 6.22) disminuyen cuando los sleeper curvos presentan mayor inclinación (sleeper04). Sin embargo, las tensiones axiales aumentan en algunas secciones para ciertas regiones a lo largo del ducto (ver Figura 6.23)

Figura 6.22

Fuerza axial en la sección a lo largo del ducto

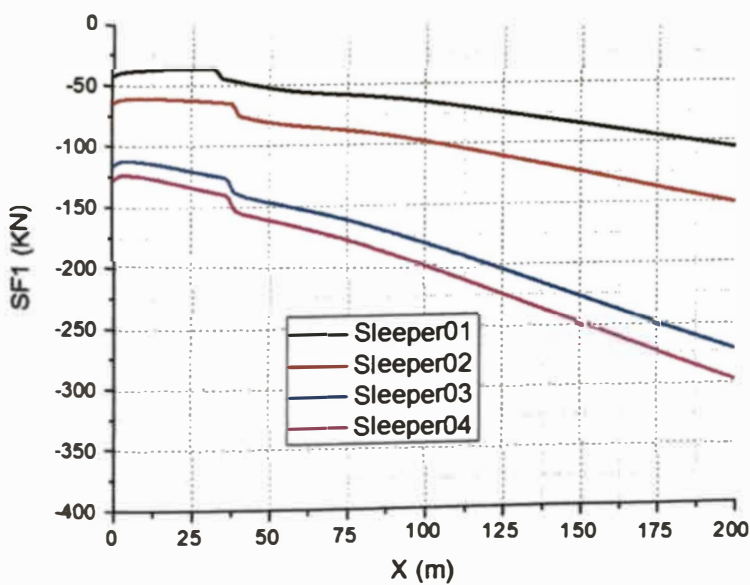
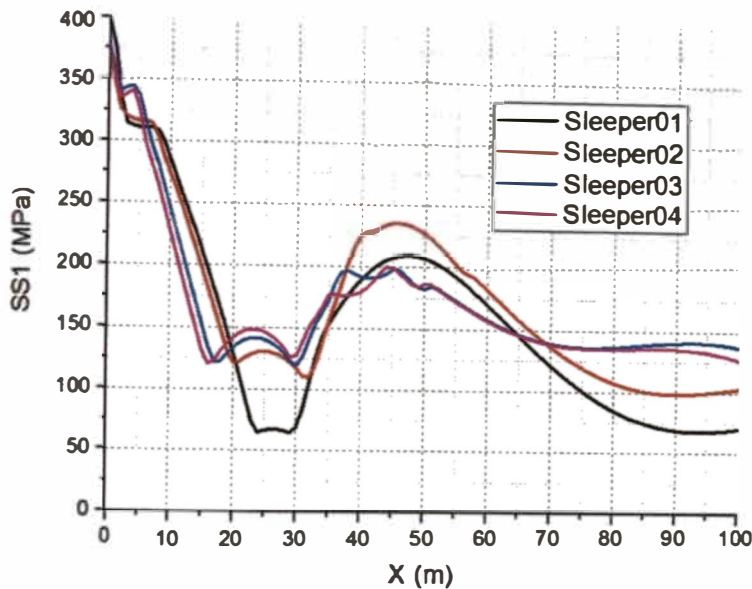


Figura 6.23

Tensión axial en la sección a lo largo del ducto



6.5 Aporte del trabajo tesis

El aporte de esta tesis se constituye en el avance del conocimiento en el campo de la ingeniería submarina, específicamente en lo que concierne al diseño y la operación de ductos submarinos sobre sleepers curvos. A lo largo de este trabajo, se han explorado y analizado diversos aspectos que contribuyen significativamente a la comprensión y mejora de estos sistemas, ofreciendo insights valiosos que impactan en la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las infraestructuras submarinas. A continuación, se detallan los principales aportes de esta investigación:

1. **Mejor comprensión del comportamiento estructural:** Uno de los principales aportes de esta tesis radica en la profundización de la comprensión del comportamiento estructural de los ductos submarinos sobre sleepers curvos. A través de análisis detallados y rigurosos, se han identificado y evaluado los factores clave que influyen en la estabilidad y la integridad de estos sistemas, brindando una visión más clara de sus características y desafíos inherentes.
2. **Optimización del diseño:** Los resultados obtenidos a partir de esta investigación ofrecen información para la optimización del diseño de ductos submarinos y

sleepers curvos. Al comprender mejor cómo diferentes variables, como el diámetro del sleeper o las imperfecciones laterales, afectan el rendimiento del sistema, los ingenieros toman decisiones más informadas durante el proceso de diseño, lo que podría conducir a estructuras más eficientes y rentables.

3. **Identificación de parámetros críticos:** Se han identificado y evaluado una serie de parámetros críticos que influyen en el comportamiento de los ductos submarinos, como la fricción entre el sleeper y el ducto, así como la interacción entre el ducto y el suelo circundante. Al comprender la importancia de estos parámetros, los diseñadores e ingenieros enfocan sus esfuerzos en áreas específicas para mejorar la estabilidad y la seguridad del sistema.
4. **Desarrollo de metodologías de análisis:** Esta tesis ha contribuido al desarrollo de metodologías de análisis más avanzadas y precisas para evaluar el comportamiento de los ductos submarinos sobre sleepers curvos. Los enfoques y técnicas utilizados en esta investigación sirven como base para futuros estudios y proyectos relacionados, proporcionando herramientas y recursos valiosos para la comunidad académica y profesional.
5. **Recomendaciones prácticas:** Basándose en los resultados obtenidos, se han formulado una serie de recomendaciones prácticas para mejorar el diseño, la construcción y la operación de ductos submarinos sobre sleepers curvos. Estas recomendaciones ayudan a los ingenieros y profesionales del sector a abordar de manera más efectiva los desafíos y problemas comunes asociados con estos sistemas, promoviendo así una mayor eficiencia y seguridad en su implementación y uso.
6. **Contribución al cuerpo de conocimientos:** En última instancia, esta tesis ha contribuido significativamente al cuerpo de conocimientos en el campo de la ingeniería submarina, agregando nueva información y perspectivas a la literatura existente. Los hallazgos y conclusiones aquí presentados sirven para investigaciones futuras y debates académicos.

Conclusiones

Siendo la hipótesis general que existen diferencias significativas en el pandeo lateral de los ductos submarinos sobre los sleepers curvos en comparación con los tradicionales, se concluye que los resultados obtenidos respaldan la existencia de diferencias significativas en el pandeo lateral de los ductos submarinos sobre los sleepers curvos en comparación con los tradicionales. Los análisis numéricos revelaron patrones distintivos de comportamiento estructural entre estos dos tipos de soportes, lo que confirma la relevancia de investigar y comprender sus efectos en la integridad de los ductos submarinos.

Se tienen las siguientes conclusiones específicas:

1. La geometría del sleeper (curvo o tradicional) y del ducto submarino afecta significativamente el pandeo lateral del ducto. Los resultados revelaron que los ductos apoyados sobre sleepers curvos experimentaron una menor desviación lateral en comparación con los tradicionales, lo que indica una mayor estabilidad estructural proporcionada por los sleepers curvos.
2. La presión interna y la carga térmica del ducto submarino influyen de manera significativa en el pandeo lateral del ducto. Se observó que las variaciones en la presión y la temperatura generan cambios sustanciales en las deformaciones y tensiones del ducto, destacando la importancia de considerar estas condiciones operativas en el diseño y la evaluación estructural.
3. El modelo de simulación numérica proporciona resultados significativamente diferentes para el pandeo lateral en sleepers curvos y tradicionales. Los análisis

revelaron que la configuración del modelo, incluidos los parámetros de malla y las condiciones de contorno, influye en los resultados del pandeo lateral, lo que subraya la importancia de una modelización precisa para obtener resultados confiables.

Recomendaciones

Las recomendaciones que se desprenden del trabajo de investigación son:

1. Complementar este trabajo de investigación con estudios experimentales en condiciones controladas de laboratorio o en campo para validar los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas. Esto permitiría una validación más robusta de los modelos propuestos y una mayor confianza en las conclusiones alcanzadas.
2. Dada la importancia del diseño de los sleepers en la estabilidad de los ductos submarinos, se recomienda explorar el uso de nuevos materiales y tecnologías de fabricación para mejorar la eficiencia y la durabilidad de los sleepers curvos. Investigar la viabilidad de materiales compuestos, recubrimientos protectores avanzados y técnicas de fabricación innovadoras podría conducir al desarrollo de sleepers más livianos, resistentes y económicos, lo que tendría un impacto significativo en la industria de la infraestructura submarina.

Referencias Bibliográficas

- Amaechi C. V., Reda, A., Shahin, M. A., Sultan, I. A., Beddu, S. B., & Ja'e, I. A. (2023). State-of-the-art review of composite marine risers for floating and fixed platforms in deep seas. *Applied Ocean Research*, 138(103624), 103624. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103624>
- API (2004). Specification for Line Pipe. API Specification 5L. 43rd Edition.
- Bai, Q., Qi, X., & Brunner, M. S. (2009). Global buckle control with dual sleepers in HP/HT pipelines. In *Offshore Technology Conference* (pp. OTC-19888). OTC
- Boer, S., Hulsbergen, C. H., Richards, D. M., Klok, A., & Biaggi, J. P. (1986, May). Buckling considerations in the design of the gravel cover for a high-temperature oil line. In *Offshore Technology Conference* (pp. OTC-5294). OTC.
- Bruton, D., Carr, M., Crawford, M., & Poiate, E. (2005, November). The safe design of hot on-bottom pipelines with lateral buckling using the design guideline developed by the safebuck joint industry project. In *Proceedings of the Deep Offshore Technology Conference, Vitoria, Espirito Santo, Brazil*.
- Guo, L., Liu, R., Yang, A., & Hou, J. (2016). Lateral Buckling Analysis of Submarine Pipeline with one arch Initial Imperfection. *ELECTRONIC JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING*, 21(5), 1735-1744.
- Hobbs, R. E. (1984). In-service buckling of heated pipelines. *Journal of transportation engineering*, 110(2), 175-189.

- Hong, Z., Liu, R., Liu, W., & Yan, S. (2015). Study on lateral buckling characteristics of a submarine pipeline with a single arch symmetric initial imperfection. *Ocean engineering*, 108, 21-32.
- Kerr, A. D. (1976). *Analysis of thermal track buckling in the lateral plane* (No. DOT-TSC-FRA-76-17). United States. Federal Railroad Administration.
- Keuper, L. B. (2006). *Análise Teórica e Experimental de Flambagem Vertical de Dutos Submetidos a Carregamento Térmico* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO).
- Liu, R., & Yan, S. (2013). Brief history of upheaval buckling studies for subsea buried pipeline. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 4(3), 170-183.
- Liu, Y. (2013). Overview of Submarine Pipeline Global Buckling. 2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation. doi:10.1109/icdma.2013.212
- Liu, H., Wang, Y., He, M., Shi, Y., & Waisman, H. (2015). *Strength and ductility performance of concrete-filled steel tubular columns after long-term service loading*. *Engineering Structures*, 100, 308–325. doi:10.1016/j.engstruct.2015.06.024
- Mendonça Belmont, G. (2006). *Uma metodologia para o estudo da flambagem de dutos aquecidos* (Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco).
- Solano, R. F., & Vaz, M. A. (2006). Thermal post-buckling of slender elastic rods with different boundary conditions. *Revista de Engenharia Térmica*, 5(2), 50-57.
- Song, X., & Song, X. (2012, September). Study of Lateral Buckling of Submarine Pipeline. In *2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology* (pp. 562-565). Atlantis Press.
- Taylor, N., & Gan, A. B. (1986). Submarine pipeline buckling—imperfection studies. *Thin-Walled Structures*, 4(4), 295-323.

- Tianfeng, Z., & Xianhong, F. (2015). Upheaval buckling solution for submarine pipelines by segmented ditching and hot water flushing. *Ocean engineering*, 102, 129-135.
- Tveråmo, C. (2013). *Pipeline Walking of High Pressure/Temperature Flowlines* (Master's thesis, Institutt for marin teknikk).
- Wang, J., & Jukes, P. (2008, January). An Integrated Design Approach to the Use of Sleepers as Vertical Upsets for Thermal Buckle Management. In *International Pipeline Conference* (Vol. 48579, pp. 181-188).
- White, D. J., & Cheuk, C. Y. (2008). Modelling the soil resistance on seabed pipelines during large cycles of lateral movement. *Marine structures*, 21(1), 59-79.
- Zeng, X., & Duan, M. (2014). Mode localization in lateral buckling of partially embedded submarine pipelines. *International Journal of Solids and Structures*, 51(10), 1991-1999.
- Zeng, X., Duan, M., & Che, X. (2014). Critical upheaval buckling forces of imperfect pipelines. *Applied Ocean Research*, 45, 33-39.
- Zhang, X., & Duan, M. (2015). Prediction of the upheaval buckling critical force for imperfect submarine pipelines. *Ocean Engineering*, 109, 330-343.