

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE TRABAJO A FATIGA EN DUCTOS MARINOS PARA
UNA UNIDAD FLOTANTE DE PRODUCCIÓN, ALMACENAMIENTO
Y DESCARGA (FPSO) USANDO UN SISTEMA PASIVO DE
COMPENSACIÓN DE ROLIDO**

**COMPONENTE: ANÁLISIS ESTÁTICO O CUASIESTÁTICO EN
DUCTOS MARINOS CON ELEMENTOS FINITOS**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

MARIO SEBASTIAN ZAMBONINO SORIA

mario.zambonino@epn.edu.ec

DIRECTOR: WILSON IVÁN GUACHAMÍN ACERO

wilson.guachamin@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2023

CERTIFICACIONES

Yo, MARIO SEBASTIAN ZAMBONINO SORIA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

MARIO SEBASTIAN ZAMBONINO SORIA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARIO SEBASTIAN ZAMBONINO SORIA bajo mi supervisión.

ING. WILSON IVÁN GUACHAMÍN ACERO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MARIO SEBASTIAN ZAMBONINO SORIA

ING. WILSON IVÁN GUACHAMÍN ACERO

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado a toda mi familia, especialmente a mis padres Mario Edgar Zambonino Arias y María Consuelo Soria Catota, quienes, con su apoyo incondicional, sacrificio, y enseñanzas me impulsaron a seguir adelante a pesar de las dificultades y obstáculos. Gracias queridos padres por siempre haber creído en mí, por inculcarme excelentes valores y principios, y por su constante motivación que me permitió culminar una meta más. A mi hermana Marjorie Cristhine Zambonino Soria, quien con sus consejos y palabras de aliento me dio fuerzas y aliento para conseguir este logro tan anhelado.

De manera general a todos mis amigos, profesores y personas especiales, quienes fueron parte de mi proceso formativo y estuvieron apoyándome en todo lo posible. Sin su ayuda nunca hubiera podido realizar este trabajo de titulación.

Mario Sebastian Zambonino Soria

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haber sido mi guía y llenarme de fortaleza necesaria para culminar esta meta. A mis padres quienes con amor supieron enseñarme a luchar por mis sueños y me inculcaron valores para ser una persona de bien, honesta y responsable. Siendo mis mejores guías de vida y que estuvieron siempre a mi lado en los días más difíciles durante mis estudios. Su guía y su gran apoyo en los momentos más difíciles fue fundamental para que pudiera continuar en

A cada uno de los docentes que me impartieron su conocimiento académico y profesional a lo largo de la carrera universitaria, permitiéndome así crecer como ser humano, siendo parte de mi camino universitario.

A mis compañeros de tesis con quienes formamos una gran amistad y nos hemos apoyado a lo largo de la carrera. Agradezco por sus horas compartidas, historias vividas y más que todo se convirtieron en hermanos y cómplices.

En general, a todas aquellas personas que siempre están pendientes de mi bienestar y me han apoyado de la mejor manera a lo largo de toda mi vida universitaria.

Finalmente, mi más sincero agradecimiento a mi tutor por la dedicación y paciencia durante todo este tiempo. Gracias por compartir parte de sus conocimientos a lo largo del presente trabajo, brindándonos apoyo y soluciones a los problemas que se presentaban en el camino. Todos sus consejos fueron útiles y necesarios para lograr desarrollar este trabajo; siendo un aporte profesional para la correcta formación.

Mario Sebastian Zambonino Soria

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	9
1.1 Objetivo general.....	10
1.2 Objetivos específicos	10
1.3 Alcance	10
1.4 Marco teórico	11
1.4.1 Ductos de exportación de petróleo.....	11
1.4.2 Tipos de Risers	11
1.4.3 Material para Risers Rígidos	13
1.4.4 Tipos de Cargas.....	13
1.4.5 Cable Catenaria	15
1.4.6 Esfuerzo de Flexión	17
1.4.7 Método de Elementos Finitos.....	18
2 METODOLOGÍA.....	22
2.1 Recopilación y Análisis de Datos para el Ducto.....	23
2.2 Cálculo y Diseño del Ducto	24
2.2.1 Cálculo del peso sumergido del ducto.....	24
2.2.2 Determinación de la geometría de la catenaria	25
2.2.3 Cálculo de la tensión máxima	25
2.2.4 Cálculo del radio de curvatura.....	26
2.2.5 Cálculo de la tubería del ducto	27
2.3 Resumen de los parámetros del ducto	28
2.4 Análisis Estático Por Elementos Finitos	30
2.4.1 Análisis de fuerzas estáticas y soportes.....	30
2.5 Análisis Cuasi Estático por Elementos Finitos.....	31
2.5.1 Estudio paramétrico en la tensión estática	31
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32

3.1	Resultados	32
3.1.1	Peso sumergido del ducto	32
3.1.2	Geometría de la catenaria	33
3.1.3	Tensión estática máxima.....	34
3.1.4	Radio de curvatura del ducto	34
3.1.5	Diseño preliminar de la tubería del ducto	35
3.1.6	Análisis Estático del Ducto	36
3.1.6.1	Esfuerzos de Von-Mises	38
3.1.6.2	Deformación unitaria.....	39
3.1.7	Análisis Cuasi Estático del Ducto	40
3.1.7.1	Esfuerzos de Von-Mises en cada sección	42
3.1.7.2	Deformaciones unitarias en cada sección.....	44
3.2	Conclusiones	47
3.3	Recomendaciones	48
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

RESUMEN

Las unidades de producción, almacenamiento y descarga de petróleo (FPSO) tienen como objetivo almacenar los hidrocarburos producidos en el fondo marino. Esta unidad flotante contiene risers tipo balcón, que corresponde a tuberías con un punto de sujeción en la parte superior del ducto y punto de contacto con el lecho marino.

En este trabajo se realizó un diseño preliminar de la tubería y un modelo en elementos finitos para una configuración tipo J, en el cual se realizó un análisis estático y cuasi estático. La finalidad de cada análisis mencionado, es encontrar los esfuerzos y las deformaciones producidas en las zonas de curvatura y en el punto superior de sujeción del “riser”.

Para una tensión estática de 0.88 MN, en el punto de sujeción se obtuvo un esfuerzo máximo de 36.51 MPa y una deformación unitaria máxima de 6.4×10^{-4} . En cambio, para la zona de curvatura se obtuvo un esfuerzo máximo de 109 MPa y una deformación unitaria máxima de 9.6×10^{-4} .

Con el estudio paramétrico de la tensión, se obtuvo un caso crítico de estudio. La simulación de este caso crítico se realizó con una tensión de 1.144 MN; donde el punto de sujeción del riser tuvo un esfuerzo máximo de 74.85 MPa y una deformación unitaria máxima de 7.8×10^{-4} . En cambio, para la zona de curvatura se obtuvo un esfuerzo máximo de 134.69 MPa y una deformación unitaria máxima de 1.17×10^{-3} .

Entre el análisis estático y el estudio paramétrico se observó que existe una disminución del 23.5% entre los esfuerzos y las deformaciones unitarias. Además, se indica que la zona de curvatura es la sección más crítica del riser.

PALABRAS CLAVE: riser, esfuerzos, deformaciones, diseño, estático, cuasi estático, curvatura.

ABSTRACT

The production, storage and offloading units (FPSOs) have the objective of store the hydrocarbons produced on the seabed. This floating unit contains balcony risers, which are pipelines with an attachment point at the top of the duct and a contact point in the seabed.

In this project, a preliminary design of the pipeline and a finite element model for a J-type configuration were carried out, which was realized a static and quasi-static analysis. The purpose of each analysis is to find the stresses and strains produced in the curvature zone and attachment point of the riser.

For a static tension of 0.88 MN, a maximum stress of 36.51 MPa and a maximum strain of 6.4×10^{-4} were obtained at the attachment point. On the other hand, a maximum stress of 109 MPa and a maximum strain of 9.6×10^{-4} were obtained at the curvature zone.

With a study where the tension was varied, a critical case was obtained. The simulation of this critical case was carried out with a tension of 1.144 MN; where a maximum stress of 74.85 MPa and a maximum strain of 7.8×10^{-4} were obtained at the attachment point. On the other hand, a maximum stress of 134.69 MPa and a maximum strain of 1.17×10^{-3} were obtained at the curvature zone.

Using results from the static analyses, it observed that the stresses and the unit strains decrease 23.5%. In addition, it indicated that the most critical section of the riser is the curvature zone.

KEYWORDS: riser, stresses, strains, design, static, quasi-static, curvature.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Una unidad flotante para producción, almacenamiento y descarga de petróleo (FPSO) tiene ductos de exportación (risers). Estos risers son elementos que trabajan a fatiga, debido a los movimientos del FPSO y de las olas, por lo que se debe estudiar los esfuerzos y las deformaciones unitarias que se producen en el punto de sujeción y en la zona de curvatura “sagbend”.

En este trabajo se pretende estudiar estos ductos de exportación (risers) mediante el método de elementos finitos. La Figura 1.1 muestra un esquema de un FPSO con “balcony risers”, en donde se identifica las secciones más críticas (Sección A y B) para analizar los respectivos esfuerzos equivalentes y deformaciones unitarias obtenidas.

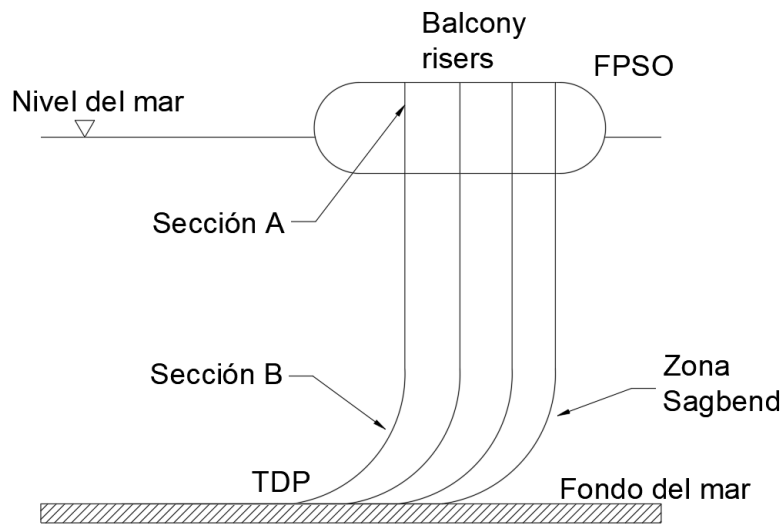


Figura 1.1. Esquema del FPSO y risers tipo balcón con las secciones críticas.

Fuente: Propio

Utilizando los resultados del componente “Análisis Cinemático de un FPSO” (Pazmiño, 2023), se realizará el análisis cuasi estático mediante un estudio paramétrico con algunas variaciones características en la tensión máxima.

Para este componente se utilizará el módulo Statical Strutral del software ANSYS 19.2, donde se realizará el análisis estático y cuasi estático del riser en elementos finitos.

1.1 Objetivo general

Realizar el análisis estático o cuasi estático del modelo estructural de un ducto marino mediante la simulación utilizando el método de elementos finitos.

1.2 Objetivos específicos

1. Recopilar los parámetros necesarios para obtener un diseño preliminar y la geometría correcta del ducto marino.
2. Realizar el análisis estático o cuasi estático del ducto marino utilizando el módulo Statical Structural del programa ANSYS 19.2.
3. Desarrollar un modelo de simulación del “riser” para contrastar las soluciones analíticas y simuladas.
4. Analizar las respuestas de esfuerzos de Von Mises y deformaciones unitarias para el ducto marino.

1.3 Alcance

Este trabajo se enfocará principalmente en el análisis estático o cuasi estático en las zonas más críticas de un ducto marino de acero mediante el método de elementos finitos. Estos resultados obtenidos en las simulaciones serán verificados mediante las soluciones analíticas.

Este componente se limita a analizar los esfuerzos equivalentes y deformaciones unitarias obtenidas de las simulaciones, donde se verificará la zona más crítica del ducto. Adicionalmente, se realizará un estudio paramétrico con variación de la tensión máxima, donde se constatará la tensión y el caso más crítico que trabaja el ducto.

Respecto a las soluciones analíticas no se desarrollará en este trabajo, debido que este análisis será realizado en el componente “Análisis mecánico del sistema de risers de un FPSO” (López, 2023).

1.4 Marco teórico

En este capítulo se revisará el contenido bibliográfico acerca de los ductos de exportación de petróleo. Se revisará todas las definiciones y aspectos importantes de los “risers”; así como varios parámetros indispensables para el diseño de la tubería.

1.4.1 Ductos de exportación de petróleo

Los sistemas de conducción de petróleo o ductos cuentan con varias líneas de exportación compuestas de líneas colectoras, líneas de flujo y tubos ascendentes. Los ductos de acero siempre se encuentran expuestos a las condiciones marinas con la finalidad de resistir tales condiciones de presión y temperatura extremas (Manríquez, 2014).

El ducto de acero debe estar sometido a menor esfuerzo en la zona “sagbend” para prevenir vibraciones, deformación plástica y cualquier otro tipo de falla. (Manríquez, 2014)

En este componente, los ductos de exportación se analizarán especialmente en el aspecto de daño por fatiga localizado en la zona de curvatura y en el punto de sujeción. En la Figura 1.2 se muestra la configuración del ducto en forma de J o colgamiento libre para aguas profundas y otros parámetros del riser.

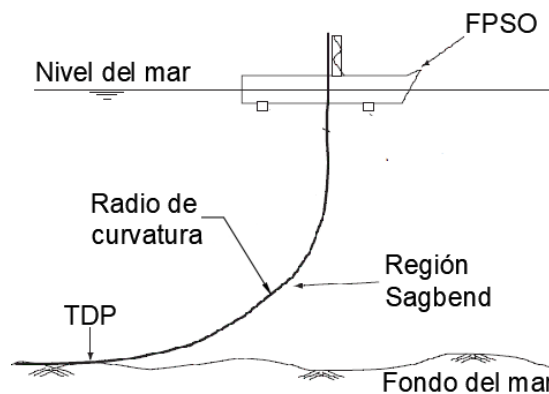


Figura 1.2. Ducto de exportación en colgamiento libre. (Guo & otros, 2014)

Una vez detallado varios aspectos importantes acerca de los ductos de exportación de petróleo, es necesario analizar los tipos de ductos marinos que son adecuados para la producción de petróleo.

1.4.2 Tipos de Risers

Los risers se pueden clasificar en varios tipos de ductos de producción de petróleo. Estos ductos que se utilizan en actividades de producción, almacenaje y descarga de petróleo. A continuación se estudia los 3 tipos de “risers” más utilizados en aguas profundas.

Risers Flexibles: Es un “riser” combinado con componentes principales e importantes como las fuerzas y el peso de la tubería. En la Figura 1.3 (a) se indica de mejor manera un esquema, donde se observa la forma de colgamiento sencilla debido que no es necesario sepultarla en el lecho marino. Este “riser” puede cruzar cualquier tipo de obstáculos que se presenten permitiendo los grados de libertad necesarios para su funcionamiento. (Casas, 2012)

Risers Rígidos: Son conocidos también como “risers” en forma de catenaria, que simplemente es una tubería de acero que se encuentra colgada libremente. La Figura 1.3 (b) indica la conexión con la unidad flotante es mediante una junta flexible y la parte final del “riser” descansa en el lecho marino como una viga empotrada. La ventaja de este diseño es la buena capacidad de soportar el tensado entre la unidad flotante y el punto de contacto con el fondo marino. Además, es considerado el más económico de todos los “risers”. (Sánchez & Cabrera, 2009)

Risers Híbridos: Estos “risers” se presentan generalmente como un conjunto de tuberías de acero verticales como se muestra en la Figura 1.3 (c), que están soportadas mediante flotadores externos. Pero también tienen un alto riesgo al momento de su instalación debido al complejo diseño, baja flexibilidad y con alta sensibilidad en altas corrientes marinas. (Sánchez & Cabrera, 2009)

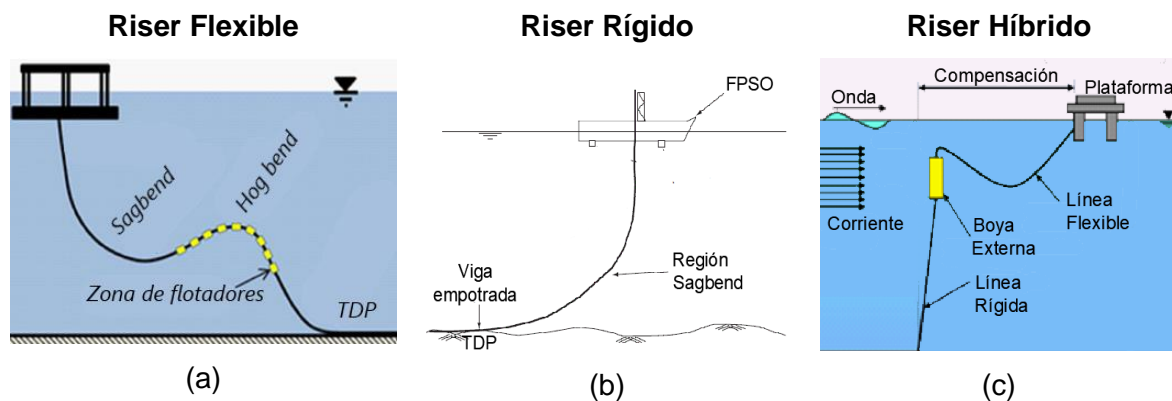


Figura 1.3. Esquemas (a) Riser Flexible; (b) Riser Rígido; (c) Riser Híbrido. (Sánchez & Cabrera, 2009) (Guo & otros, 2014) (J. Vieiro)

Cabe recalcar, que todos estos tipos de “risers” son muy utilizados en instalaciones petroleras a nivel mundial. De la misma forma, se debe estudiar el material que se emplea para fabricar estos ductos de acero.

1.4.3 Material para Risers Rígidos

Para seleccionar de manera eficiente el material de los “risers”, se tiene que tomar en cuenta varios aspectos importantes como son: el fluido interno, el medio ambiente al cual está sometido exteriormente y las fuerzas aplicadas en el ducto. Además, se considera la vida útil de este material y posibles fallas que pueden existir durante sus operaciones.

Para los “risers” rígidos generalmente se utiliza el acero al carbono, por ejemplo, los materiales API x60, x65 y x70. Pero actualmente existen otros materiales con mayor resistencia mecánica como es la aleación de titanio que ofrecen más ventajas debido a la elasticidad y flexibilidad. Sin embargo, debido a costo y otras consideraciones de producción se utiliza el acero API x65 con las propiedades mecánicas que se expone en la Tabla 1.1. (Manríquez, 2014)

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas del material API x65. (Buberg, 2014)

Propiedades mecánicas del material	
Densidad del Acero:	7850 kg/m ³
Grado del Acero:	X65
Módulo de Young:	207000 MPa
Esfuerzo de Fluencia:	448 MPa
Esfuerzo Último a la Tensión:	550 MPa

Para el diseño preliminar óptimo de los “risers”; además del material, es necesario estudiar todas las cargas que actúan a lo largo de todo el ducto marino.

1.4.4 Tipos de Cargas

En este apartado se estudiará todas las cargas más importantes que actúan a lo largo del ducto de acero. Entre ellas se menciona las cargas estáticas y ambientales que son las fuerzas más considerables en este trabajo.

Cargas Estáticas

Peso Propio del Riser: Es una carga fija o muerta constante que no varía en el tiempo, es decir tiene magnitud, dirección y ubicación invariable. Hay que considerar que el peso del equipo, materiales y otros componentes son factores muy importantes para realizar el diseño, debido que la unidad marina deberá soportar todo ese peso. En la Figura 1.4 se presenta la carga de peso propio del riser. (Ferreira, 2018)

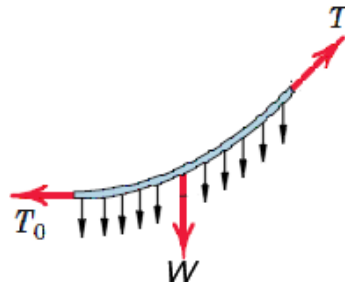


Figura 1.4. Carga de peso propio del riser.

Fuente: Propio

En la figura anterior se observa las tres cargas principales del riser; pero la fuerza que más actúa en el riser es la carga del peso propio del ducto (W).

Cargas Ambientales

Cargas de corrientes marinas: Estas corrientes transportan gran cantidad de agua y energía debido al movimiento continuo del mar. Estas corrientes marinas pueden ser superficiales que se producen por los vientos dominantes del ambiente; mientras que las subsuperficiales se vinculan por la diferencia de densidades y grado de salinidad. (Casas, 2012)

Las corrientes marinas producen una fuerza que actúa directamente sobre la columna vertical del ducto sumergido. La Ecuación 1.1 presenta esta fuerza de arrastre ejercida sobre el ducto con los respectivos términos de cálculo (Ferreira, 2018).

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A_p$$

Ecuación 1.1. Fuerza de arrastre ejercida sobre el “riser”. (Ferreira, 2018)

Dónde:

C_D : Coeficiente de arrastre.

V : Velocidad de flujo.

A_p : Área transversal.

En la Figura 1.5 se indica un esquema de la fuerza de arrastre que actúa en el “riser”.

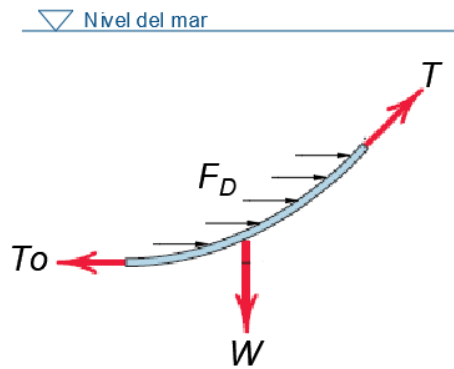


Figura 1.5. Fuerza de arrastre que actúa sobre el ducto.

Fuente: Propio

Para este componente no se tomará en consideración la carga ambiental ya que llega a ser despreciable en comparación con la carga de peso propio. Pero es importante tomar en consideración las corrientes marinas debido que actúan directamente sobre el ducto.

Como siguiente paso se considera factible desarrollar la geometría del ducto submarino donde se pueda obtener la ecuación general de la catenaria.

1.4.5 Cable Catenaria

Para desarrollar las expresiones de cable catenaria, se utiliza la Figura 1.6 que muestra el diagrama de cuerpo libre del cable catenaria y el triángulo de fuerzas en equilibrio.

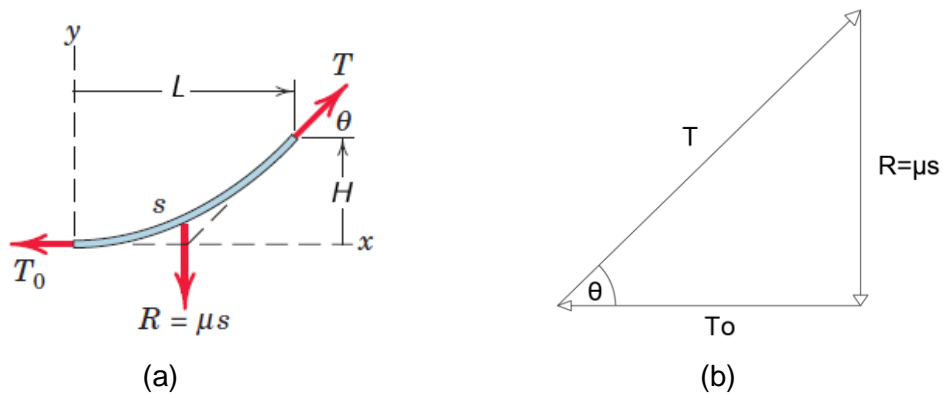


Figura 1.6. (a) Diagrama de cuerpo libre de cable catenaria (J.L. Meriam, 2006); (b) triángulo de fuerzas. **Fuente:** Propio

Con ayuda del diagrama de cuerpo libre y el triángulo de fuerzas de la figura anterior, se utiliza la siguiente notación:

T : Tensión máxima en la parte superior de la catenaria.

T_0 : Tensión horizontal de la catenaria.

μ : Peso específico del cable.

L : Longitud horizontal total del cable.

H : Altura total del cable.

s : Longitud de arco del cable.

La Ecuación 1.2 muestra la longitud de arco de la catenaria y la Ecuación 1.3 indica la tensión en el punto más alto del cable. Estas dos expresiones serán las más importantes para generar las demás ecuaciones del cable catenaria.

$$s = \frac{T_o}{\mu} \sinh \left(\frac{\mu L}{T_o} \right)$$

Ecuación 1.2. Longitud de arco de la catenaria. (J.L. Meriam, 2006)

$$T^2 = \mu^2 s^2 + T_o^2$$

Ecuación 1.3. Tensión en términos de peso específico y longitud de arco. (J.L. Meriam, 2006)

Al realizar combinaciones entre las ecuaciones anteriores, se obtiene la Ecuación 1.4 que es una expresión mejor desarrollada para la tensión.

$$T = T_o \cosh \left(\frac{\mu L}{T_o} \right)$$

Ecuación 1.4. Tensión en términos de la longitud horizontal. (J.L. Meriam, 2006)

La Ecuación 1.5 indica el ángulo de inclinación entre la tensión máxima y la tensión horizontal de la catenaria.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\mu s}{T_o} \right)$$

Ecuación 1.5. Ecuación de cálculo del ángulo de inclinación. (J.L. Meriam, 2006)

Al solucionar la ecuación diferencial de la catenaria y evaluando las condiciones de frontera se obtiene la ecuación general de la catenaria (Ecuación 1.6).

$$y = \frac{T_o}{\mu} \left(\cosh \left(\frac{\mu x}{T_o} \right) - 1 \right)$$

Ecuación 1.6. Ecuación general de la catenaria. (J.L. Meriam, 2006)

Utilizando todas las ecuaciones de cable catenaria, se realizará el diseño preliminar de la tubería del riser. Después de haber estudiado las definiciones y ecuaciones de la catenaria, también se debe analizar el esfuerzo de flexión que actúa sobre la curvatura “sagbend” del ducto.

1.4.6 Esfuerzo de Flexión

El esfuerzo de flexión en la zona de curvatura se produce debido a la configuración del ducto entre la unidad flotadora y el punto de contacto con el fondo marino. En la Figura 1.7 se muestra la sección del ducto en la cual se genera el radio de curvatura y el esfuerzo de flexión axial.

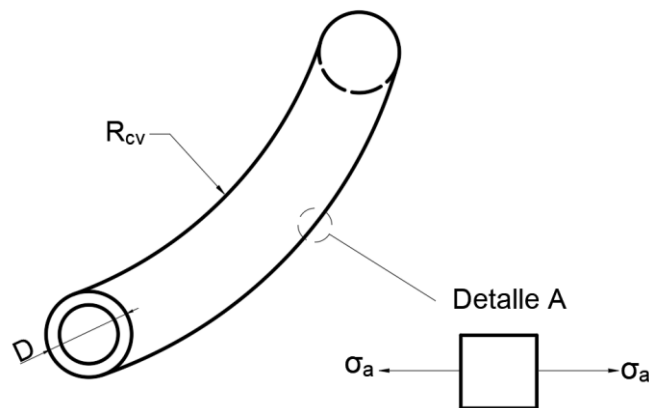


Figura 1.7. Sección del ducto con radio de curvatura y esfuerzo de flexión axial.

Fuente: Propio

Utilizando el esquema anterior, se evidencia que el esfuerzo global de la tubería se genera mediante la combinación entre la tensión axial y el esfuerzo producido en la zona “sagbend”. La Ecuación 1.7 nos permite determinar el esfuerzo de flexión en la curvatura. (Guo & otros, 2014)

$$\sigma_a = \frac{ED}{2R_{cv}}$$

Ecuación 1.7. Esfuerzo de flexión axial. (Guo & otros, 2014)

Dónde:

σ_a : Esfuerzo de flexión axial.

E : Módulo de Elasticidad del Acero (API x65).

D : Diámetro Exterior de la Tubería.

R_{cv} : Radio de curvatura de la tubería.

Según la Ecuación 1.8 se puede determinar el radio de curvatura del ducto de acero.

$$R_{cv} = \frac{ED}{2\sigma_y f_D}$$

Ecuación 1.8. Radio de curvatura del ducto. (Guo & otros, 2014)

Dónde:

σ_y : Esfuerzo de fluencia del acero.

f_D : Factor de diseño, usualmente se utiliza el valor de 0.5 para controlar de mejor manera el esfuerzo de flexión. Es decir, para que esté por debajo del esfuerzo de fluencia.

Con el esfuerzo de flexión y la curvatura producida en la zona “sagbend”; se puede completar el diseño preliminar. Sin embargo, estas definiciones son importantes para estudiar el método de elementos finitos donde se explica las soluciones y los elementos de mallado más utilizados para la simulación.

1.4.7 Método de Elementos Finitos

El análisis por elementos finitos FEA (“Finite Element Analysis”) es un tipo de método que se aplica en soluciones numéricas. Los elementos finitos visualizados en piezas son partes infinitesimales que contienen una simple variación espacial. La variación espacial puede ser descrita mediante expresiones polinómicas en términos de x^2 , xy y y^2 .

La Figura 1.8 muestra los nodos y elementos formados en una pieza de engrane.

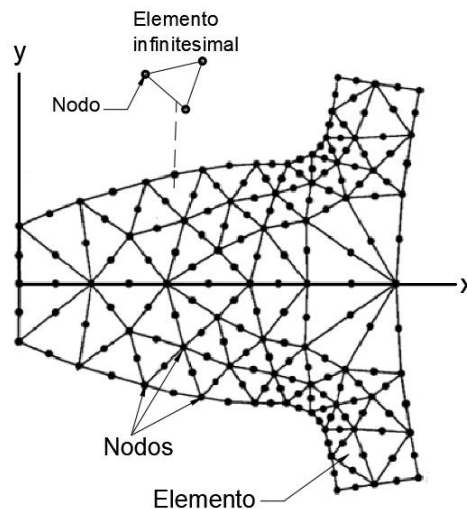


Figura 1.8. Nodos y elementos formados en una cara de la pieza. (Cook & otros, 2002)

La figura anterior indica todos los elementos que están conectados en varios puntos llamados nodos; que forman una estructura que son usadas para definir una cara, cuerpo o región. (Cook & otros, 2002)

En el ducto se puede formar varios tipos de mallas en sus caras o planos como son: triangulares, cuadriláteros, rectangulares o a su vez una combinación entre ellos. (Cook & otros, 2002)

Por otra parte, en este apartado se tiene que: x y y , son valores de las coordenadas en el plano; mientras que a_1, a_2, a_3, \dots son valores constantes indefinidos. (Cook & otros, 2002)

Triángulo Cuadrático:

Este elemento presenta 6 grados de libertad debido a la flexión pura que se genera y por las deformaciones producidas en sus curvas cuadráticas. En la Figura 1.9 se muestra el ducto con los grados de libertad con los respectivos vectores y modos de desplazamiento. (Cook & otros, 2002)

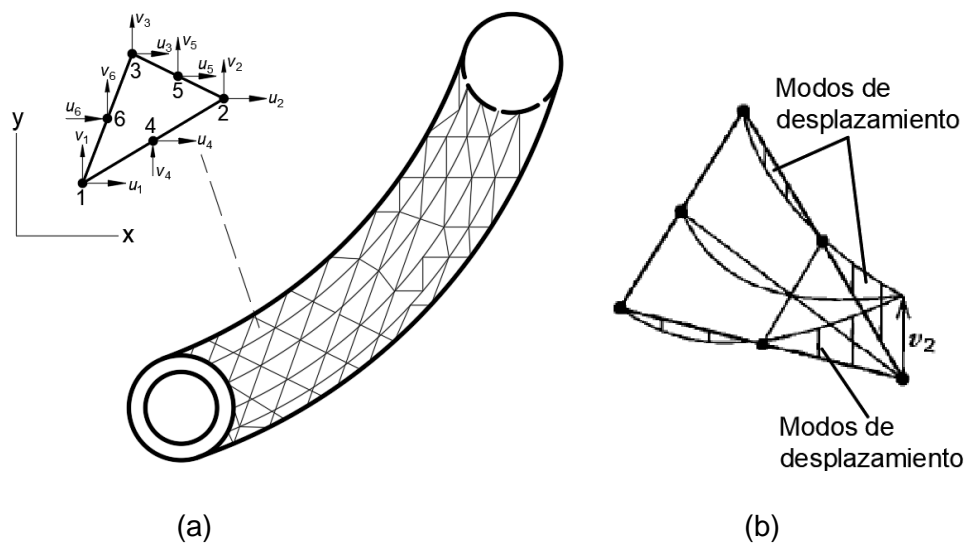


Figura 1.9. (a) Grados de libertad en el elemento del ducto; (b) Modos de desplazamiento en el nodo 2 (Cook & otros, 2002). **Fuente:** Propio

La Ecuación 1.9 presenta las ecuaciones de desplazamiento para un elemento que tiene un campo cuadrático. Por otra parte, en la Ecuación 1.10 se presenta las ecuaciones de deformaciones lineales que se forma en los elementos del ducto. (Cook & otros, 2002)

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2$$

$$v = a_7 + a_8x + a_9y + a_{10}x^2 + a_{11}xy + a_{12}y^2$$

Ecuación 1.9. Componentes de desplazamiento para cada elemento. (Cook & otros, 2002)

$$\varepsilon_x = a_2 + 2a_4x + a_5y \quad \varepsilon_y = a_9 + a_{11}x + 2a_{12}y$$

$$\gamma_{xy} = (a_3 + a_8) + (a_5 + 2a_{10})x + (2a_6 + a_{11})y$$

Ecuación 1.10. Deformaciones lineales de los elementos. (Cook & otros, 2002)

Estas dos ecuaciones representan los desplazamientos y las deformaciones que se producen en cada elemento del ducto; dependiendo de los grados de libertad del elemento.

Rectángulo Bilineal:

En la Figura 1.10 (a) se muestra los 4 grados de libertad y los vectores de desplazamiento que presenta el elemento rectangular en el ducto. Estos grados de libertad se originan por las interpolaciones y productos de Lagrange. Es decir, son elementos de Lagrange bidimensionales con nodos de borde. En la Figura 1.10 (b) se muestra el ángulo de deformación y los momentos flectores que se generan debido a los esfuerzos. (Cook & otros, 2002)

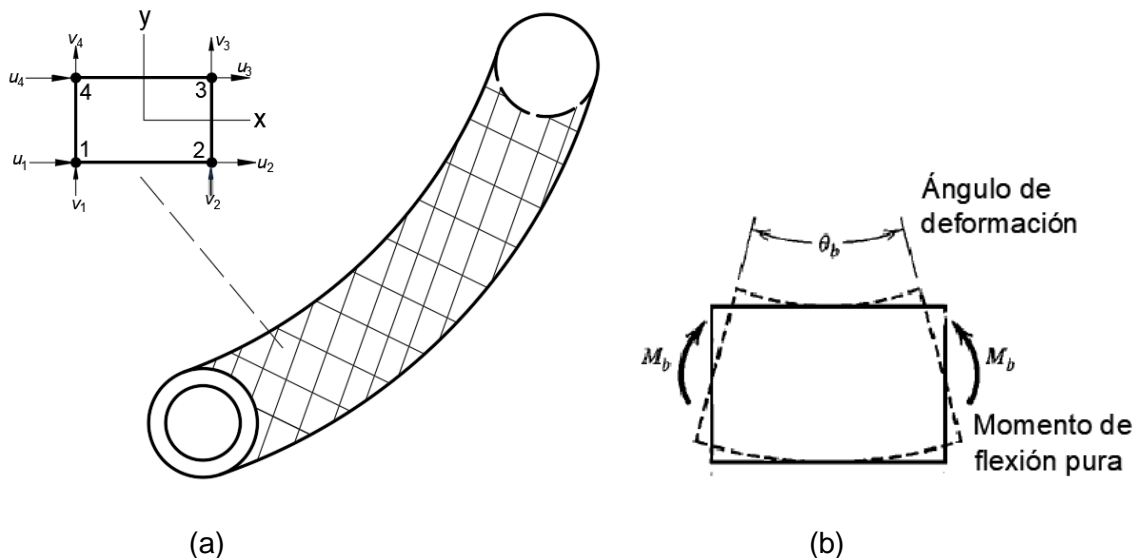


Figura 1.10. (a) Grados de libertad en el elemento del ducto; (b) Momento de flexión y ángulo de deformación del elemento (Cook & otros, 2002). **Fuente:** Propio

La Ecuación 1.11 muestra los componentes de desplazamiento y deformación que se asocia directamente al elemento plano. (Cook & otros, 2002).

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy$$

$$v = a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy$$

$$\varepsilon_x = a_2 + a_4y$$

$$\varepsilon_y = a_7 + a_8x$$

$$\gamma_{xy} = (a_3 + a_6) + a_4x + a_8y$$

Ecuación 1.11. Desplazamientos y deformaciones de los elementos. (Cook & otros, 2002)

En el elemento rectangular se producen desplazamientos y deformaciones lineales, en el cual se producen momentos de flexión pura.

Rectángulo Cuadrático:

Este elemento se obtiene al añadir nodos laterales en un rectángulo lineal, hasta llegar a ser un elemento cuadrilátero con lados curvos. En la Figura 1.11 se explica los 8 grados de libertad en términos generalizados y las deformaciones asociadas con los nodos dentro del ducto estudiado. (Cook & otros, 2002)

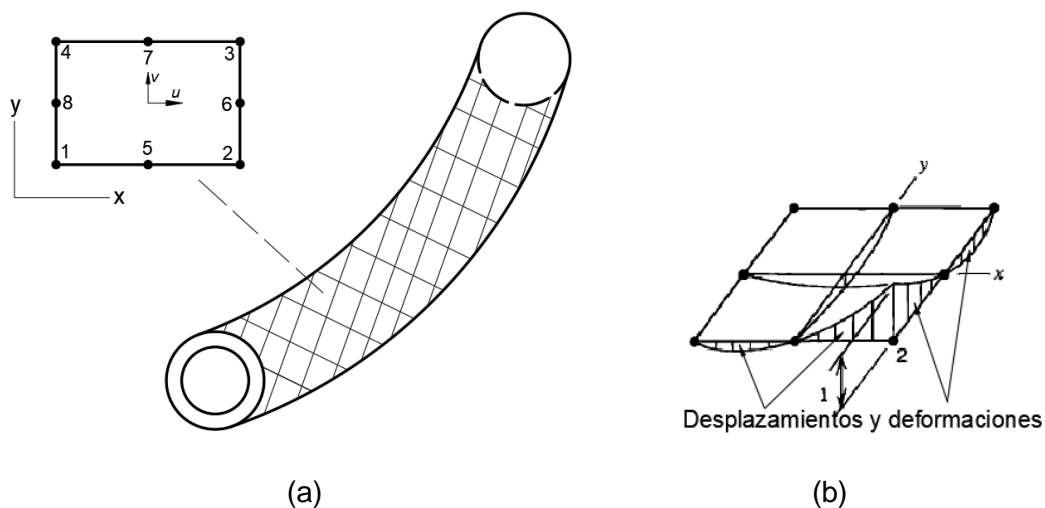


Figura 1.11. (a) Grados de libertad o nodos; (b) Desplazamientos y deformaciones del nodo 2 (Cook & otros, 2002). **Fuente:** Propio

Las Ecuaciones 1.12 y 1.13 representan los desplazamientos y deformaciones cuadráticas que se generan en los 8 nodos indicados en la figura anterior. Estas ecuaciones se asocian directamente con los grados de libertad del elemento. (Cook & otros, 2002)

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7x^2y + a_8xy^2$$

$$v = a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}x^2 + a_{13}xy + a_{14}y^2 + a_{15}x^2y + a_{16}xy^2$$

Ecuación 1.12. Componentes de desplazamiento de los elementos. (Cook & otros, 2002)

$$\varepsilon_x = a_2 + 2a_4x + a_5y + 2a_7xy + a_8y^2 \quad ; \quad \varepsilon_y = a_{11} + a_{13}x + 2a_{14}y + a_{15}x^2 + 2a_{16}xy$$

$$\gamma_{xy} = (a_3 + a_{10}) + (a_5 + 2a_{12})x + (2a_6 + a_{13})y + a_7x^2 + 2(a_8 + a_{15})xy + a_{16}y^2$$

Ecuación 1.13. Deformaciones cuadráticas de los elementos. (Cook & otros, 2002)

En resumen, la herramienta computacional ANSYS 19.4 genera cada uno de los elementos y métodos explicados anteriormente para el análisis de elementos finitos. Pero los elementos más utilizados para generar la malla son los elementos triangulares cuadráticos y rectángulos cuadráticos. Sin embargo, para mejorar la calidad de malla se utiliza la combinación entre elementos triangulares y rectángulos cuadráticos.

2 METODOLOGÍA

En esta sección se describe el diseño preliminar, planteamientos, parámetros y ecuaciones que se utilizarán para generar el riser. Además, se realizará el modelo estructural del ducto, el cual nos permitirá desarrollar el análisis estático o cuasi estático dependiendo el caso de estudio. En cuanto a las ecuaciones a utilizarse se detallará de manera clara y concisa, en la cual pueda ser interpretada fácilmente.

En la Figura 2.1 se indica la metodología y todos los pasos generales que se utilizará para desarrollar el diseño preliminar y el modelo en elementos finitos del ducto de acero.

Como primer paso se tiene la recopilación de información y análisis de datos del ducto. El segundo paso es realizar el cálculo y diseño del ducto; que se divide en cálculo del peso sumergido, determinar la geometría de la catenaria, cálculo de la tensión máxima, cálculo del radio de curvatura y cálculo de la tubería del ducto.

Como siguiente paso se tiene un resumen general de los parámetros obtenidos para realizar el modelo en elementos finitos del riser. A continuación, se realiza el análisis estático por elementos finitos, en el cual se indica el análisis de fuerzas estáticas y soportes que se utilizarán en el modelo de elementos finitos.

El paso final será realizar el análisis cuasi estático por elementos finitos en donde se mostrará el estudio paramétrico realizado en la tensión máxima calculada, en este paso se mostrará las variaciones necesarias para realizar la simulación del ducto.

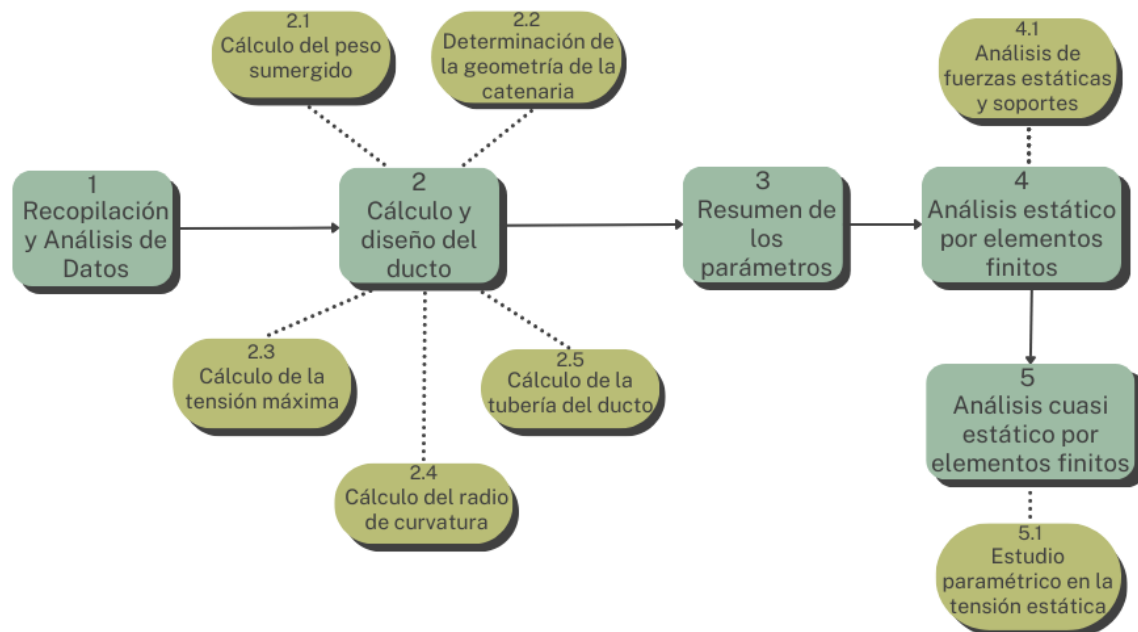


Figura 2.1. Metodología para el diseño preliminar y el modelo en elementos finitos.

Fuente: Propio

Después de haber realizado una pequeña explicación acerca de los pasos que se debe seguir para determinar el diseño preliminar del ducto y el modelo en elementos finitos, se procede con la descripción detallada de cada paso indicado anteriormente.

2.1 Recopilación y Análisis de Datos para el Ducto

Para recopilar los datos más importantes sobre el ducto marino, se revisó varios estudios realizados sobre los “risers” y sobre la producción submarina de petróleo. Es así que se obtuvo varios parámetros para diseñar y modelar el ducto de acero en elementos finitos.

Se determinó el lugar apropiado en la cual se podrá realizar el respectivo análisis del “riser”. De esta manera, el país más eficiente para nuestro estudio es Brasil, el cual es uno de los principales productores de petróleo en aguas profundas y son permisibles a los 300 metros de profundidad que se estudia en este proyecto. (Risks, 2017)

Para el diseño preliminar del ducto de acero se toma en consideración las definiciones y parámetros de “risers” rígidos y las ecuaciones de cable catenaria. Estas tuberías son utilizadas en la producción de petróleo debido que soportan todas las cargas de tensión y peso propio (Casas, 2012). Además, este ducto de acero puede operar en aguas profundas

y logra soportar los movimientos marítimos sin deformación plástica en la tubería (Buberg, 2014).

Por otro lado, el material más eficiente para estos ductos submarinos es el acero API x65 ya que sus propiedades mecánicas son permisibles para este trabajo como se indicó en la Tabla 1.1. Después de revisar varios datos acerca del riser, se desarrolla los respectivos cálculos para el diseño del “riser”.

2.2 Cálculo y Diseño del Ducto

En este capítulo se explicará de manera detallada todos los pasos que se debe seguir para realizar el diseño preliminar óptimo para la tubería del riser. En general, se explicará todos los parámetros, definiciones y ecuaciones que se utilizarán en este apartado.

2.2.1 Cálculo del peso sumergido del ducto

En la Figura 2.2 se muestra un esquema del área transversal del ducto con el respectivo material y el fluido presente en el interior de la tubería. Estos parámetros serán importantes para determinar el peso sumergido a lo largo del ducto considerando la densidad del acero y del petróleo.

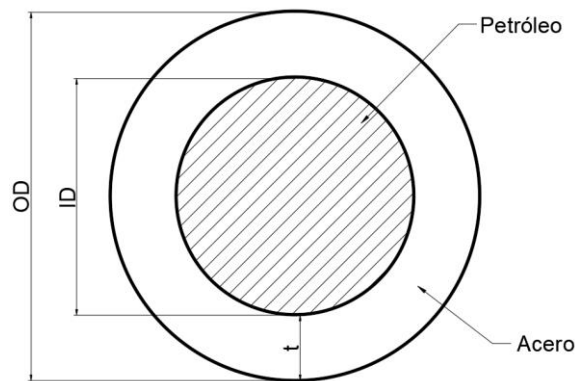


Figura 2.2. Material y fluido que actúan sobre el ducto.

Fuente: Propio

Para el cálculo del peso sumergido se debe estimar valores para los diámetros del ducto y así determinar el área transversal. Por este motivo se considera varias opciones de diámetros óptimos para estimar un valor inicial de área transversal.

Con respecto al peso sumergido, la Ecuación 2.1 expresa la forma de determinar el peso sumergido del acero y del petróleo.

$$\mu = \rho * A$$

Ecuación 2.1. Forma general de cálculo del peso sumergido. (Terán, s.f.)

Como se explicó anteriormente se debe suponer los diámetros óptimos para lograr calcular el peso sumergido total del ducto. Según el artículo “Straked Riser Design using VIVA” (D. Deka, 2010), los “risers” generalmente se diseñan con el diámetro exterior de 16 pulgadas.

Según la Tabla 2.1 se supone los diámetros $OD = 16'' = 0.406\text{ m}$; $ID = 0.3552\text{ m}$ y el espesor un valor de $t = 25.4\text{ mm}$.

Tabla 2.1. Datos de diámetros óptimos. (D. Deka, 2010)

SCR	OD [m]	Espesor de la tubería [mm]	Densidad del fluido [kg/m ³]
8 inch GAS	0,21	12,70	200
16 inch OIL	0,406	25,40	914
18 inch OIL	0,45	28,60	914
20 inch OIL	0,51	31,80	914
GAS: Gas Exportation			
OIL: Oil Exportation			

Después de realizar el cálculo del peso sumergido, se considera importante determinar la geometría de la catenaria explicada a continuación.

2.2.2 Determinación de la geometría de la catenaria

En este apartado se determinará la ecuación general de la catenaria utilizando los resultados del componente “Estudio del comportamiento mecánico del sistema de risers de un FPSO usando métodos numéricos” (López, 2023). Los datos obtenidos del componente mencionado anteriormente son: $H = 300\text{ m}$; $L = 161.74\text{ m}$; $T_{TDP} = 141.93\text{ kN}$.

Con ayuda de las ecuaciones del apartado 1.4.5, se obtendrá la forma de la catenaria. En otras palabras, se calculará la tensión horizontal en el “Touch Down Point” (TDP) y se compara con la tensión obtenida (T_{TDP}) en el componente anterior.

Al obtener la geometría correspondiente al ducto, se procede con el cálculo de la tensión estática máxima que actúa en la parte de sujeción entre ducto y el FPSO.

2.2.3 Cálculo de la tensión máxima

Después de haber calculado la tensión horizontal, se procede a determinar la tensión máxima que actúa en el punto más alto del ducto. En la Figura 2.3 se presenta el esquema del ducto con la tensión máxima que debe ser calculada.

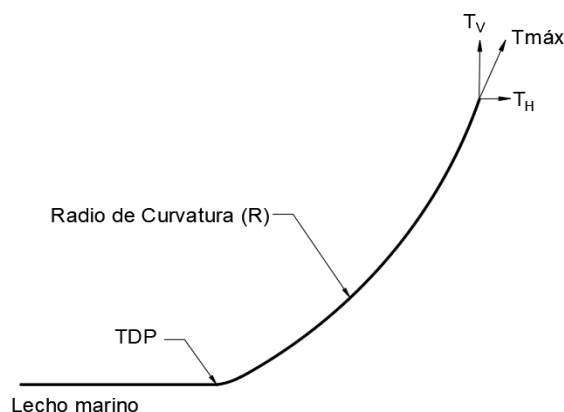


Figura 2.3. Esquema del ducto con la tensión máxima a calcularse.

Fuente: Propio

Después de calcular la tensión máxima, se puede determinar los demás componentes y también se puede realizar el cálculo del radio de curvatura.

2.2.4 Cálculo del radio de curvatura

Se considera que el radio de curvatura del riser se aplica precisamente para la región de sobre flexión del ducto. Esta definición se puede usar debido a los parámetros y definiciones de la configuración J del riser. La Figura 2.4 detalla la zona de sobre flexión del ducto, donde se verifica el cumplimiento de este fundamento para el ducto de estudio.

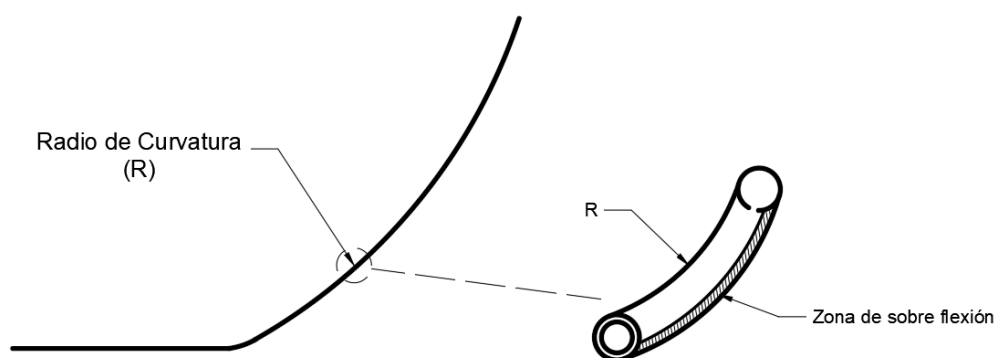


Figura 2.4. Radio de curvatura y región de sobre flexión del ducto.

Fuente: Propio

Para determinar el radio de curvatura del ducto de acero, se utiliza las ecuaciones del apartado 1.4.6 de esfuerzo de flexión.

Con ayuda del estudio del radio de curvatura, se puede realizar el cálculo de la tubería para determinar el espesor óptimo de la tubería.

2.2.5 Cálculo de la tubería del ducto

El objetivo de este apartado es determinar el espesor y el diámetro interno de la tubería para generar el modelo en elementos finitos del riser. El diseño de esta tubería empieza por el cálculo de la deformación admisible. La Ecuación 2.2 nos permite determinar la deformación unitaria admisible.

$$\varepsilon_{adm} = \frac{OD}{2R_{cv}}$$

Ecuación 2.2. Deformación unitaria admisible. (Herdiyanti, 2013)

Con la deformación obtenida se debe calcular el esfuerzo admisible que actúa sobre el ducto. La Ecuación 2.3 permite determinar dicho esfuerzo.

$$\sigma_{adm} = \varepsilon_{adm}E$$

Ecuación 2.3. Definición de esfuerzo admisible del ducto.

Con la ecuación de diseño (Ecuación 2.4) se debe determinar el área transversal en dónde actúa el esfuerzo axial del ducto.

$$\sigma_a \leq \sigma_{adm}$$

Ecuación 2.4. Ecuación de diseño para el ducto.

Con el área calculada anteriormente, se procede a calcular el diámetro interno del ducto utilizando la Ecuación 2.5.

$$A = \frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2)$$

Ecuación 2.5. Área transversal del ducto.

Con los diámetros exterior e interior calculados, se estima el valor de espesor de la tubería.

La Figura 2.5 presenta el área transversal que debe ser calculada.

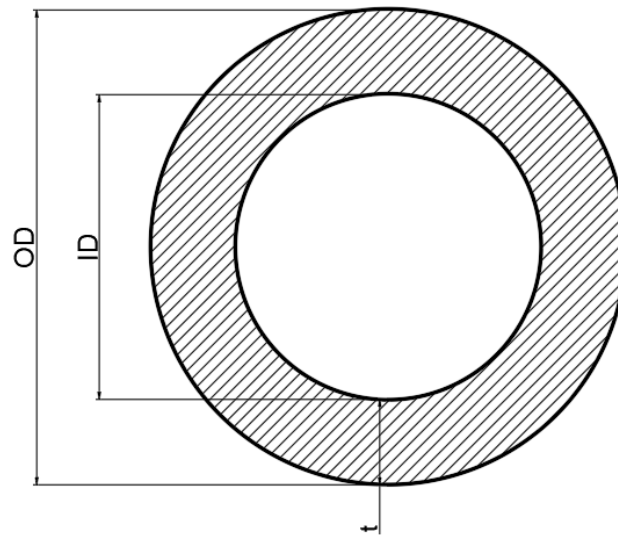


Figura 2.5. Esquema del área transversal del ducto.

Fuente: Propio

Después de haber desarrollado el respectivo diseño preliminar de toda la tubería, se indica todo lo explicado en una tabla de resumen con todos los parámetros básicos obtenidos.

2.3 Resumen de los parámetros del ducto

En la Tabla 2.2 se presenta los parámetros principales que deben ser tomados en cuenta al momento de realizar el modelo en elementos finitos (simulación).

Tabla 2.2. Parámetros principales del riser.

Parámetros básicos del "Riser"	
Ecuación del Riser	$y=68,24 (\cosh(x/68,24)-1)$
Diámetro Externo	16" (0,406 m)
Material del Riser	API 5L x65
Tipo de Riser	Riser Rígido
Profundidad	300 m
Longitud Horizontal	161,74 m
Longitud Total del Riser	361,86 m
Ángulo de inclinación	79,3°

La Figura 2.6 muestra un esquema general de los parámetros y la geometría del "riser" obtenidos anteriormente.

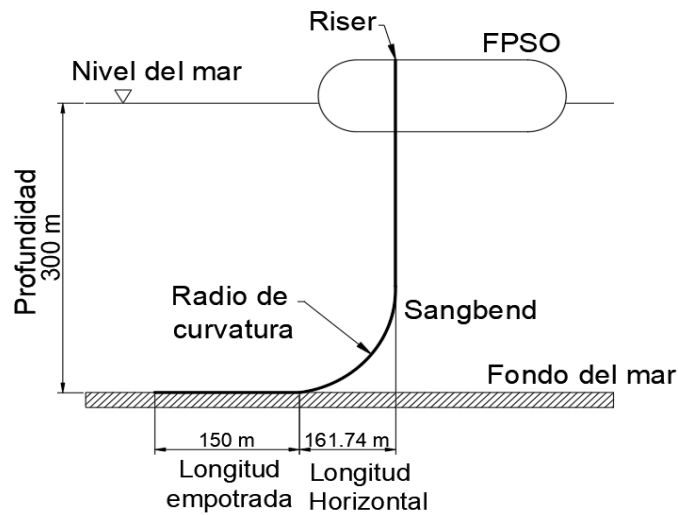


Figura 2.6. Esquema general del "riser".

Fuente: Propio

En el esquema de la figura anterior se nota claramente las longitudes más importantes de estudio como son la profundidad de 300 m, el radio de curvatura y las demás longitudes importantes.

En la Figura 2.7 se presenta la sección transversal del ducto. Aquí se muestra los diámetros, el espesor de pared del tubo y el material seleccionado.

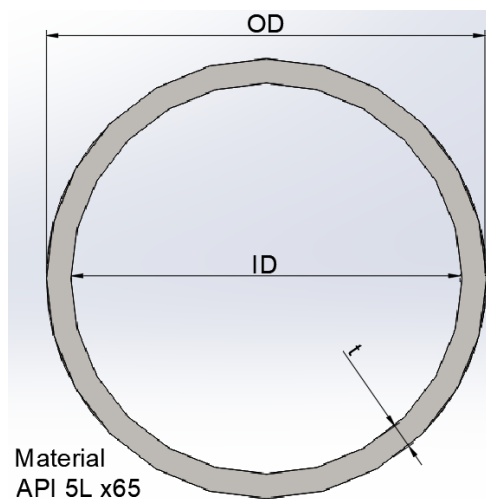


Figura 2.7. Sección del "riser" con los diámetros y material.

Fuente: Propio

Una vez determinado todos los parámetros que se utilizarán para generar el modelo en elementos finitos del ducto, como siguiente paso se realiza el respectivo análisis estático del ducto por elementos finitos.

2.4 Análisis Estático Por Elementos Finitos

Para realizar el análisis estático se debe tomar en consideración las fuerzas estáticas y soportes que se debe emplear al momento de modelar y simular el ducto. A continuación, se explica algunos factores importantes para el análisis estático del ducto.

2.4.1 Análisis de fuerzas estáticas y soportes

A continuación, se indica las fuerzas y soportes que se utilizan al momento de desarrollar el modelo de simulación. En general, se explica los aspectos más importantes que se debe tomar en cuenta al momento de generar la simulación.

Fuerzas estáticas aplicadas en el ducto: En primer lugar, para este análisis se utiliza la carga estática de peso propio del material; en ANSYS no es necesario colocar esta fuerza ya que el programa reconoce esa opción al momento de colocar el material.

Para las cargas ambientales como la presión del mar, carga de oleaje o de corrientes marinas; son fuerzas que no se consideran en este análisis. Este tipo de fuerzas son estimadas como cargas despreciables respecto a fuerzas del peso propio o de la tensión máxima debido a que no producen ningún efecto sobre el ducto.

Soportes y otras condiciones: Como soporte del “riser” se colocará un soporte rígido o fijo en la parte inferior del “riser” (“Touchdown Point”). Este soporte representará las juntas fijas que se colocan en toda la longitud del lecho marino. En la parte superior del ducto no se situará ningún soporte fijo o empotramiento, más bien se colocará la tensión máxima que permitirá obtener los resultados adecuados de esfuerzos y deformaciones.

La Figura 2.8 muestra el ducto simulado donde se indica el soporte fijo del lecho marino y la tensión estática aplicada en la parte superior del ducto de acero.

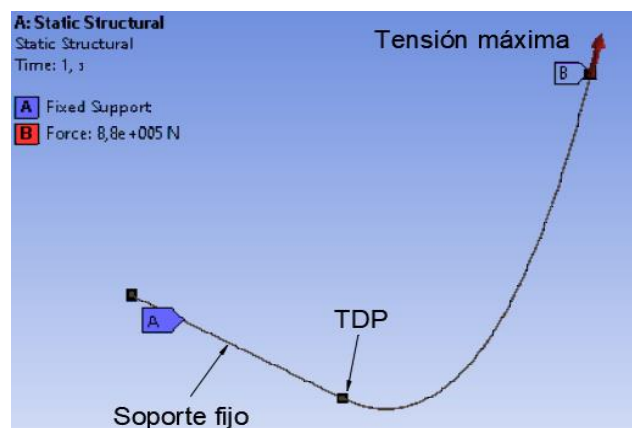


Figura 2.8. Ducto de acero con el soporte fijo y la tensión aplicada. (Fuente: Propio)

Al realizar la simulación con la tensión estática, se debe continuar con el análisis cuasi estático del mismo ducto, pero con algunas variaciones paramétricas en la tensión.

2.5 Análisis Cuasi Estático por Elementos Finitos

Para este análisis se toma en consideración la tensión máxima aplicada en la parte superior del ducto, donde se aplicará una variación porcentual para verificar el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones en las secciones más críticas. En la Figura 2.9 se presenta el esquema del ducto con la tensión máxima y un elemento diferencial donde se indica el incremento o disminución que se aplicará en la magnitud de la tensión.

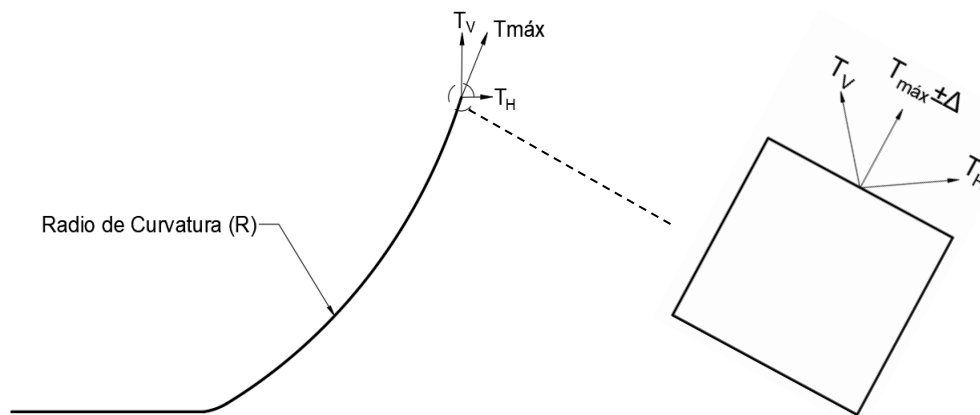


Figura 2.9. Esquema del ducto con la variación de la tensión máxima.

Fuente: Propio

Al aplicar un incremento y una reducción en la tensión estática al momento de realizar la simulación del ducto, también se debe efectuar un estudio de los efectos producidos en esta tensión como se indica a continuación.

2.5.1 Estudio paramétrico en la tensión estática

En este apartado se realizará algunas variaciones paramétricas en la tensión máxima, donde se obtendrá diferentes magnitudes de tensiones que permitirán generar las simulaciones del riser. Las variaciones que se utilizarán son de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ y $\pm 30\%$ de la tensión estática.

El estudio paramétrico se realizará en el análisis cuasi estático, debido que el ducto trabaja bajo una tensión máxima puede llegar a aumentar o disminuir dependiendo del comportamiento de las olas y el movimiento del FPSO que se analiza en el componente "Análisis Cinemático de un FPSO" (Pazmiño, 2023). Por este motivo se realiza variaciones

porcentuales que son valores apropiados para estudiar cualquier caso crítico que trabaje el ducto.

La Ecuación 2.6 presenta un ejemplo de los valores de las tensiones con la variación del 10%.

$$T1 = T_{m\acute{a}x} + 10\%T_{m\acute{a}x}$$

$$T2 = T_{m\acute{a}x} - 10\%T_{m\acute{a}x}$$

Ecuación 2.6. Tensiones con la variación del 10%.

Se realiza las demás variaciones en la tensión utilizando el mismo procedimiento mostrado en la ecuación anterior.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

A continuación, se muestra todos los cálculos que se realiza para el diseño preliminar del ducto y todos los resultados obtenidos de la simulación del ducto para el análisis estático y cuasi estático.

3.1.1 Peso sumergido del ducto

Utilizando la Ecuación 2.5 se calcula las áreas transversales del acero y del petróleo, respectivamente.

$$A_{acero} = \frac{\pi}{4}(OD^2 - ID^2) = \frac{\pi}{4}(0.406^2 - 0.3552^2) = 0.030 \text{ m}^2$$

$$A_{petr\acute{o}leo} = \frac{\pi}{4}(ID^2) = \frac{\pi}{4}(0.3552^2) = 0.01 \text{ m}^2$$

Mediante la Ecuación 2.1 se calcula el peso sumergido del acero y del petróleo. A continuación, se muestra el peso sumergido del acero:

$$\mu_{acero} = 7850 \frac{kg}{m^3} * 0.030 \text{ m}^2 = 235.5 \frac{kg}{m}$$

En cuanto al peso sumergido del petróleo que se encuentra al interior de la tubería, se puede hacer una suposición que la densidad del petróleo es igual a la densidad del agua, por lo tanto:

$$\mu_p = 1025 \frac{kg}{m^3} * 0.01 m^2 = 10.25 \frac{kg}{m}$$

El peso sumergido total del “riser” por unidad de longitud será:

$$\mu_s = \mu_{acero} + \mu_p = 235.5 + 10.25 = 245.75 \frac{kg}{m}$$

$$\mu = \mu_s g = 245.75 \frac{kg}{m} (9.8 m/s^2) = 2408.35 \frac{N}{m}$$

Después de calcular el peso sumergido del ducto de acero, es factible determinar la geometría de la catenaria que nos permita observar la forma que tendrá el riser.

3.1.2 Geometría de la catenaria

Utilizando la Ecuación 1.6 del apartado de cable catenaria, los datos obtenidos del apartado 2.2.2 y el resultado del peso sumergido calculado anteriormente; se calcula la tensión horizontal del cable.

$$H = \frac{T_o}{\mu} \left(\cosh \left(\frac{\mu L}{T_o} \right) - 1 \right)$$

$$300 = \frac{T_o}{2408.35} \left(\cosh \left(\frac{2408.35(161.74)}{T_o} \right) - 1 \right)$$

$$\therefore T_o = 164\ 347\ N$$

Como se puede observar, la tensión horizontal obtenida de $T_o = 164\ 347\ N$ y el dato $T_{TDP} = 141.93\ kN$ obtenido de la sección 2.2.2 son valores aproximados. Sin embargo, se puede mencionar que existe una pequeña variación debido a las aproximaciones que se realiza al momento de calcular el peso sumergido.

Mediante la Ecuación 1.6 se genera la ecuación que gobierna la catenaria.

$$y = \frac{T_o}{\mu} \left(\cosh \left(\frac{\mu x}{T_o} \right) - 1 \right)$$

$$y = \frac{164\ 347}{2408.35} \left(\cosh \left(\frac{(2408.35)x}{164\ 347} \right) - 1 \right)$$

$$y = 68.24 \left(\cosh \left(\frac{x}{68.24} \right) - 1 \right)$$

La Figura 3.1 muestra la forma de la catenaria obtenida mediante la ecuación general del cable calculada anteriormente.

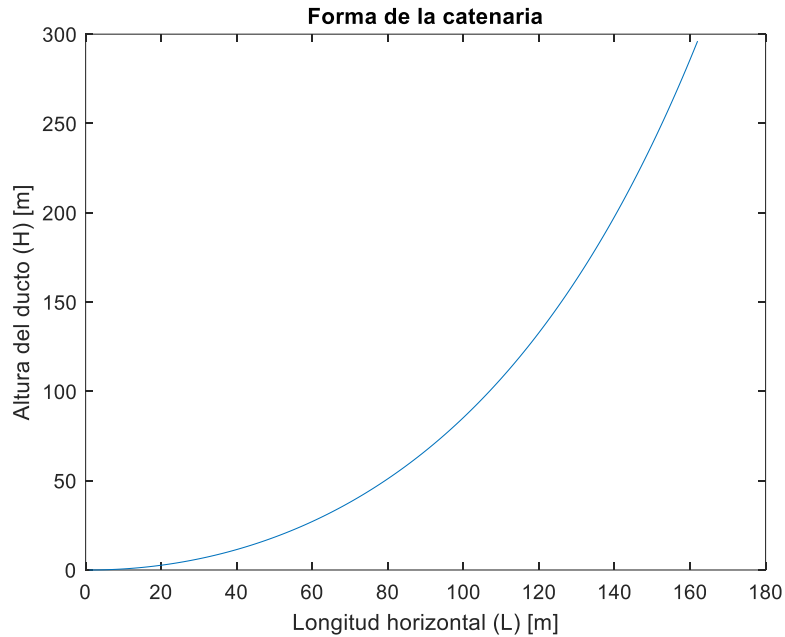


Figura 3.1. Forma de la catenaria.

Fuente: Propio

Después de obtener la forma de la catenaria, se puede determinar la tensión máxima que actúa en el punto de sujeción del riser.

3.1.3 Tensión estática máxima

Para calcular la tensión máxima en el punto de sujeción del ducto, se utiliza la Ecuación 1.4 de la sección de cable catenaria y el resultado de la tensión horizontal obtenida en el apartado 3.1.2.

$$T_{m\acute{a}x} = 164347 \cosh\left(\frac{(2408.35)(161.74)}{164\ 347}\right)$$

$$T_{m\acute{a}x} = 886\ 852 [N] = 0.88 [MN]$$

Con la tensión máxima obtenida, se procede a realizar el cálculo del radio de curvatura que tendrá el ducto.

3.1.4 Radio de curvatura del ducto

Con ayuda de las propiedades del material que se mencionó en la Tabla 1.1 y utilizando la Ecuación 1.8 del apartado de esfuerzo de flexión, se calcula el radio de curvatura que tiene el ducto de acero.

$$R_{cv} = \frac{ED}{2\sigma_y f_D} = \frac{(207000 \text{ MPa})(0.406 \text{ m})}{2(448 \text{ MPa})(0.5)} = 187.6 \text{ m}$$

Al calcular el radio de curvatura, se realiza el diseño preliminar de la tubería donde se obtendrá el espesor óptimo del "riser".

3.1.5 Diseño preliminar de la tubería del ducto

Para comenzar con el diseño de la tubería, se utiliza la Ecuación 2.2 que permite calcular la deformación admisible.

$$\varepsilon_{adm} = \frac{0.406}{2(187.6)} = 1.08 \times 10^{-3}$$

Utilizando la Ecuación 2.3, se calcula el esfuerzo admisible:

$$\sigma_{adm} = \varepsilon_{adm} E = 1.08 \times 10^{-3} (207000 \text{ MPa}) = 224 \text{ MPa}$$

Con la Ecuación 2.4 del diseño de la tubería, se determina el área transversal de diseño para el ducto.

$$\begin{aligned} \sigma_a &\leq \sigma_{adm} \\ \sigma_a &\leq \sigma_{adm} = \frac{T}{A} \leq \sigma_{adm} \\ A &\geq \frac{T}{\sigma_{adm}} = \frac{0.88 \times 10^6 \text{ N}}{224 \times 10^6 \text{ Pa}} \\ A &\geq 0.004 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Con el área calculada anteriormente y la Ecuación 2.5 se procede a calcular el diámetro interno de la tubería.

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2) \\ 0.004 &= \frac{\pi}{4} (0.406^2 - ID^2) \\ \therefore ID &\leq 0.38 \text{ m} \end{aligned}$$

Con los diámetros externo e interno, se puede estimar el valor de espesor de la tubería mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{OD - ID}{2} = \frac{0.406 - 0.38}{2} = 0.013m$$

$$t \geq 0.013 \text{ mm}$$

Debido a que el diámetro interno y el espesor son valores estimados, se debe tomar un valor óptimo para obtener un buen diseño del ducto. Por lo tanto, para el diámetro interno de la tubería se toma el valor de $ID = 0.36m$.

Con el resultado del diámetro interno mencionado anteriormente, se determina el espesor real del tubo.

$$t = \frac{OD - ID}{2} = \frac{0.406 - 0.36}{2} = 0.023m$$

$$t = 23 \text{ mm}$$

En la Figura 3.2 se presenta el área transversal del ducto calculado.

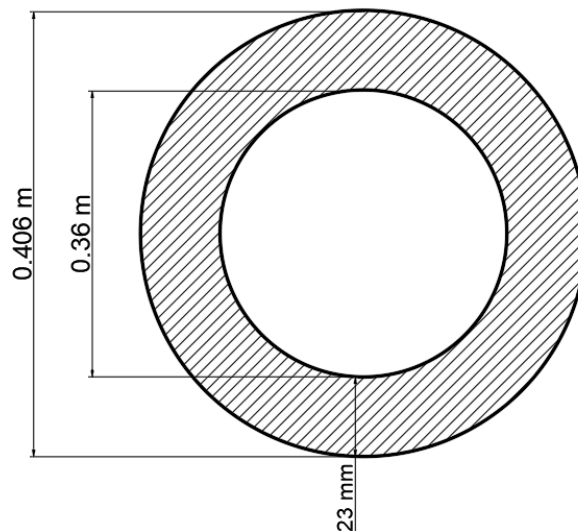


Figura 3.2. Esquema del área transversal del ducto.

Fuente: Propio

Con este diseño se puede realizar el respectivo modelo en elementos finitos y generar las simulaciones en el módulo Statical Structural del programa ANSYS 19.2. Ahora se realiza el respectivo análisis estático del ducto en elementos finitos.

3.1.6 Análisis Estático del Ducto

En este análisis se desarrollará el modelo en elementos finitos con la tensión estática máxima de 0.88 MN determinada en el apartado 3.1.3. En la Figura 3.3 se indica el ducto con las secciones más críticas (Sección A y B) que se van a estudiar.

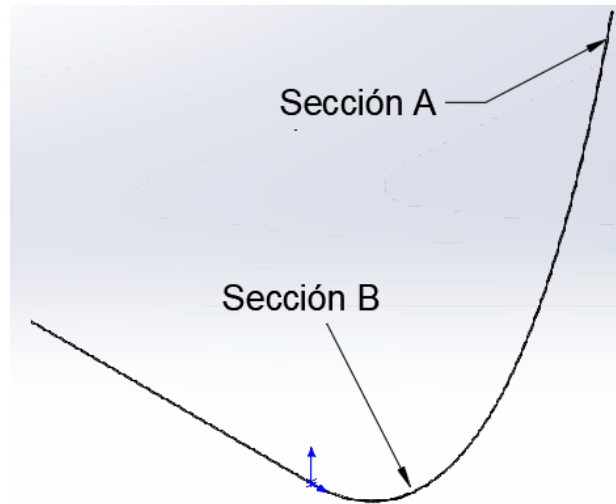


Figura 3.3. Secciones críticas en el “riser”.

Fuente: Propio

Para cada zona crítica (curvatura y punto de sujeción) se analizará los esfuerzos y las deformaciones obtenidas en la simulación.

En las Tablas 3.1 y 3.2 se indica los resultados de esfuerzos y deformaciones unitarias obtenidas de la simulación. Además, se muestra los valores máximos, mínimos y promedio de estos resultados.

Tabla 3.1. Resultados de Esfuerzos de Von-Mises.

Esfuerzo Máximo	Esfuerzo Promedio	Esfuerzo Mínimo
[MPa]	[MPa]	[KPa]
109.43	60.82	59.26

Tabla 3.2. Resultados de Deformaciones Unitarias.

Deformación Máxima	Deformación Promedio	Deformación Mínima
0.95×10^{-3}	0.53×10^{-3}	1.06×10^{-5}

En la Figura 3.4 se observa todos los valores de esfuerzos y deformaciones obtenidas de la simulación a lo largo de todo el ducto de acero.

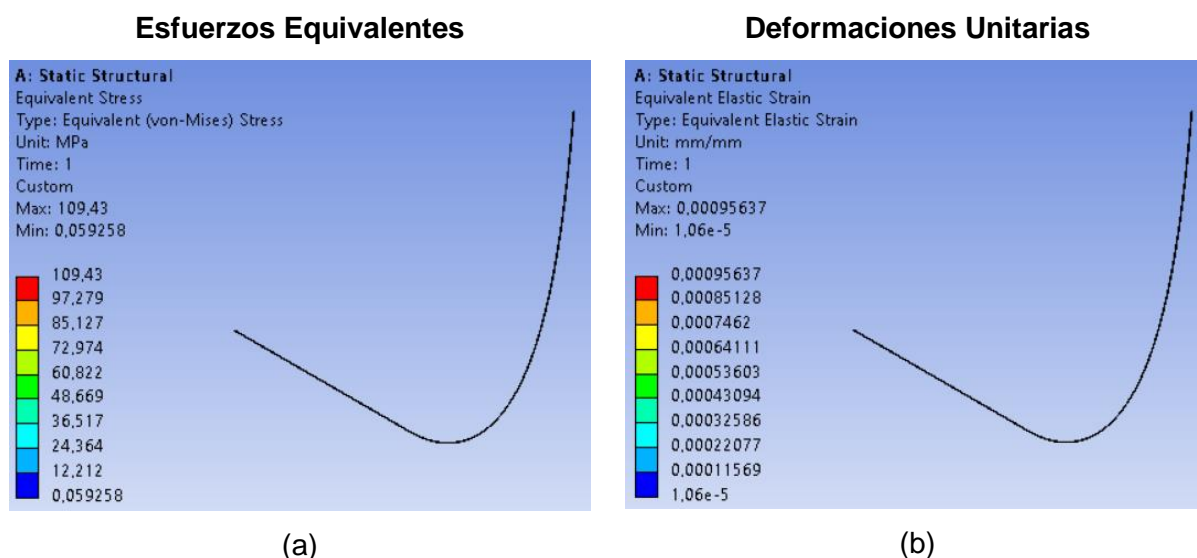


Figura 3.4. Resultados (a) Esfuerzos equivalentes; (b) Deformaciones unitarias.

Fuente: Propio

En la figura anterior se puede observar los valores máximos y mínimos de esfuerzos (109.43 MPa y 59.25 KPa) y deformaciones unitarias (9.5×10^{-4} y 1.06×10^{-5}). Con esto, se puede estudiar los esfuerzos equivalentes de Von-Mises para las secciones críticas.

3.1.6.1 Esfuerzos de Von-Mises

En este apartado se mostrará los resultados obtenidos de esfuerzos equivalentes de Von-Mises para cada sección crítica. En la Tabla 3.3 se resume los valores de esfuerzos equivalentes obtenidos para cada sección mencionada anteriormente.

Por otra parte, para verificar que el ducto está correctamente diseñado, los esfuerzos obtenidos en la simulación no deben superar el esfuerzo admisible de 224 MPa calculado en el apartado 3.1.5 de Diseño preliminar de la tubería.

Tabla 3.3. Resultados de Esfuerzos de Von-Mises por secciones.

Esfuerzos Equivalentes [MPa]	
Sección A	Sección B
0.059	60.82
12.21	72.97
36.51	97.27
	109

La Figura 3.5 indica de mejor manera los valores de esfuerzos equivalentes obtenidos de la simulación en varios puntos críticos.

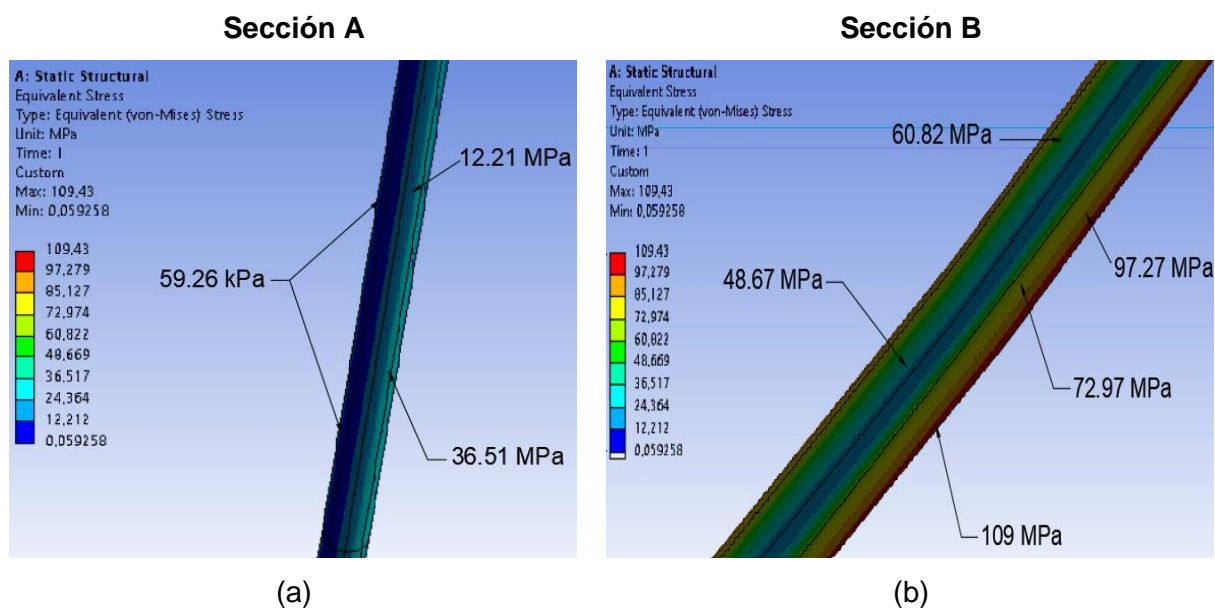


Figura 3.5. Esfuerzos equivalentes obtenidos. (a) Sección A; (b) Sección B.

Fuente: Propio

Como se observa en las figuras anteriores, se verifica que la sección B del ducto presenta mayores esfuerzos sin superar el valor de esfuerzo admisible calculado. Ahora, se realiza el mismo procedimiento para estudiar las deformaciones unitarias en cada sección.

3.1.6.2 Deformación unitaria

En la Tabla 3.4 se resume los valores de deformaciones unitarias obtenidas de la simulación para cada sección.

Para verificar el diseño de la tubería, las deformaciones unitarias obtenidas de la simulación no deben superar la deformación admisible de 1.08×10^{-3} calculada en apartado 2.2.3.

Tabla 3.4. Resultados de deformaciones unitarias por secciones.

Deformaciones Unitarias	
Sección A	Sección B
1.1×10^{-4}	3.2×10^{-4}
4.3×10^{-4}	5.3×10^{-4}
6.4×10^{-4}	7.4×10^{-4}
	9.6×10^{-4}

En la Figura 3.6 se logra identificar todas las deformaciones unitarias obtenidas de la simulación en elementos finitos a lo largo de las secciones A y B.

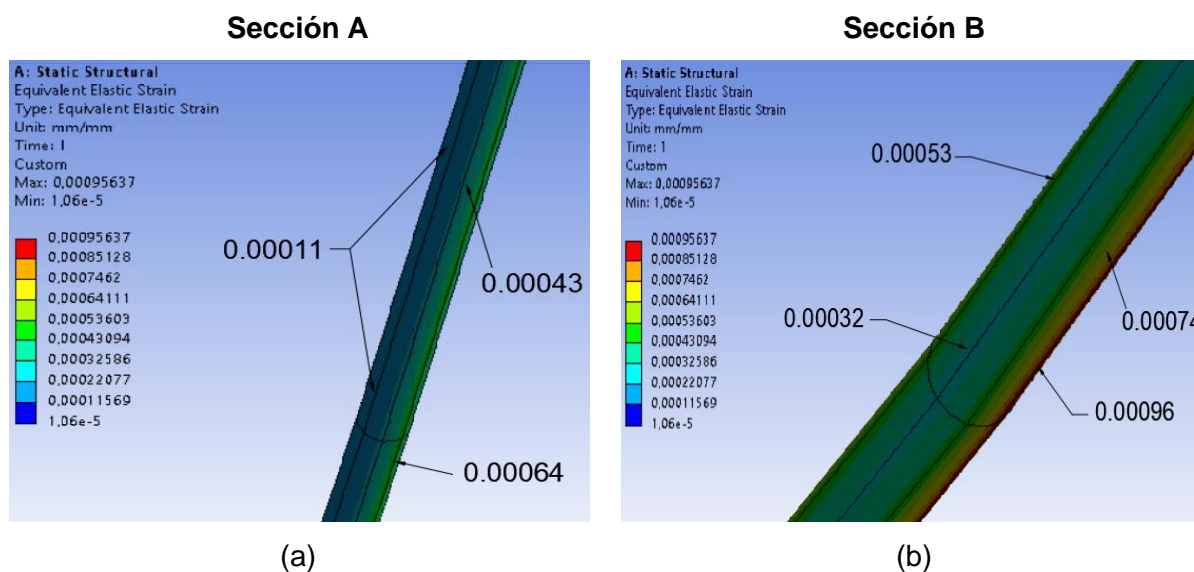


Figura 3.6. Deformaciones unitarias obtenidas. (a) Sección A; (b) Sección B.

Fuente: Propio

En las figuras anteriores se observa que la sección B del ducto presenta mayores deformaciones y no supera la deformación admisible. Por ende, esta zona de curvatura es la sección más crítica con una deformación unitaria de 0.00096.

Una vez concluido el análisis estático, se procede con el análisis cuasi estático donde se realizará el estudio paramétrico de la tensión máxima.

3.1.7 Análisis Cuasi Estático del Ducto

Utilizando los parámetros y definiciones mencionados en el apartado 2.5.1, se realiza las variaciones paramétricas en la tensión máxima, donde se obtiene 6 casos de estudio que permitirán simular los efectos de un sistema de compensación de rido. Utilizando como ejemplo la Ecuación 2.6 se puede determinar las demás tensiones con sus respectivas variaciones porcentuales.

En la Tabla 3.5 se resume los 6 casos más críticos mencionados anteriormente, donde se aplica las variaciones del 10%, 20% y 30%. Por otra parte, al generar estos casos de estudio se puede evidenciar los resultados obtenidos de las simulaciones, ya que permiten suponer las tensiones que se generan debido a las aceleraciones del FPSO.

Estas suposiciones se pueden realizar con ayuda de los resultados obtenidos del componente "Análisis Cinemático del FPSO" (Pazmiño, 2023).

Tabla 3.5. Casos críticos de simulación y tensiones para simular.

	Variación (Δ)	Casos críticos	Tensiones para simular [MN]
Casos para estudiar	±10%	Caso 1	0,968
		Caso 2	0,792
	±20%	Caso 3	1,056
		Caso 4	0,704
	±30%	Caso 5	1,144
		Caso 6	0,616

Con estas tensiones cuasi estáticas se realiza las respectivas simulaciones para cada caso crítico. En la Figura 3.7 se muestra los resultados obtenidos de esfuerzos y deformaciones del caso 1 utilizando una tensión de 0.968 MN.

Caso 1

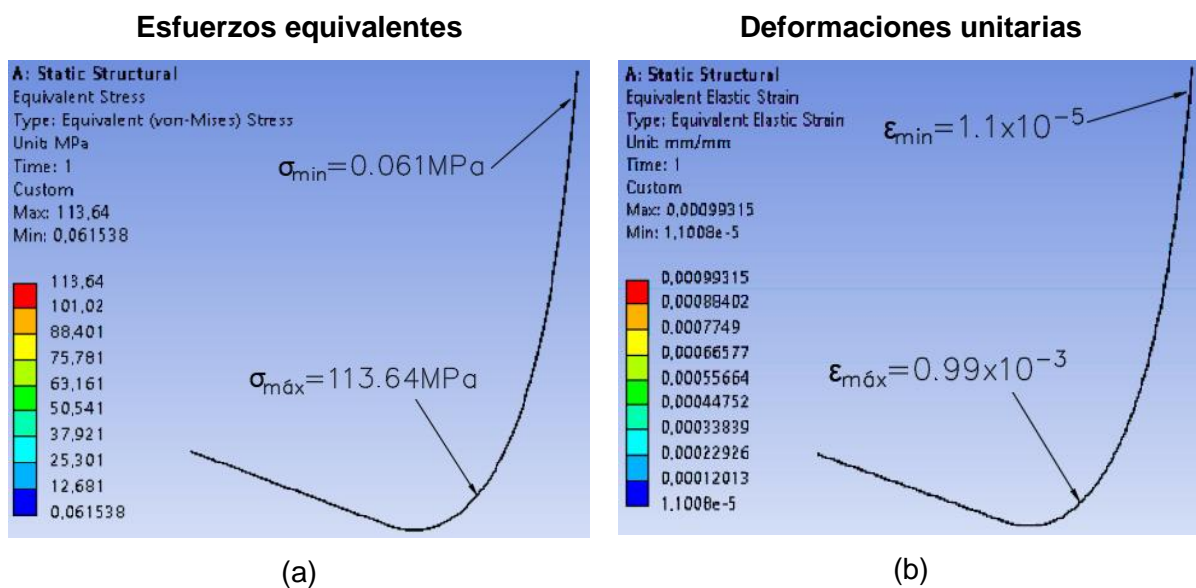


Figura 3.7. Resultados del caso 1 (a) Esfuerzos equivalentes; (b) Deformaciones unitarias.

Fuente: Propia

La Tabla 3.6 presenta un resumen de resultados de esfuerzos equivalentes y deformaciones unitarias obtenidas al realizar las simulaciones con los demás casos de estudio con sus respectivas variaciones porcentuales.

Tabla 3.6. Resultados de esfuerzos y deformaciones máximas por caso.

Casos de estudio	Esfuerzos Equivalentes Máximos [MPa]	Deformaciones Unitarias Máximas
Caso 1	113.64	0.00099
Caso 2	107.75	0.00094
Caso 3	117.85	0.00103
Caso 4	101.01	0.00088
Caso 5	134.69	0.00117
Caso 6	92.6	0.00081

Al observar estos resultados, se puede evidenciar que existen grandes esfuerzos y deformaciones, especialmente en los casos 3 y 5. Ahora, se procede con el estudio de los esfuerzos equivalentes en cada sección.

3.1.7.1 Esfuerzos de Von-Mises en cada sección

En este apartado se muestra los resultados de esfuerzos de Von-Mises para cada sección (Sección A y B) para cada caso de estudio. La Figura 3.8 indica los resultados de esfuerzos obtenidos de la simulación para las secciones A y B del caso 1.

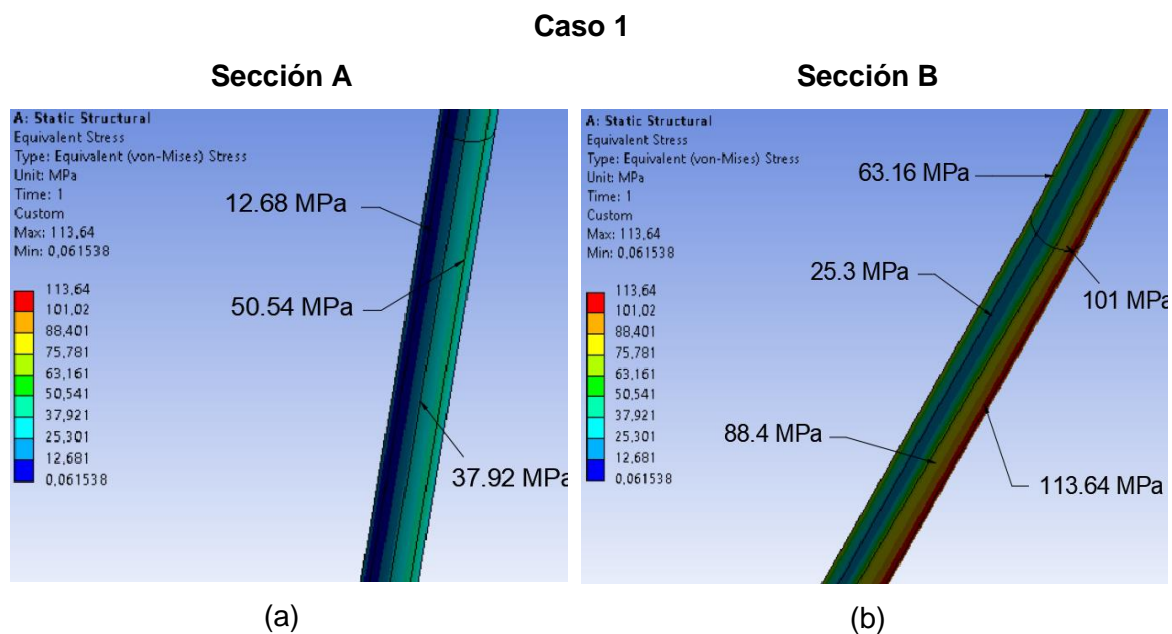


Figura 3.8. Esfuerzos equivalentes en el caso 1. (a) Sección A; (b) Sección B.

Fuente: Propia

Aplicando la misma metodología de simulación, se presenta la Tabla 3.7 que muestra los valores de esfuerzos máximos y mínimos obtenidos de la simulación de las secciones A y B para los 6 casos de estudio.

Tabla 3.7. Resultados de esfuerzos máximos y mínimos en cada sección crítica.

Casos de estudio	Tensión a simular [MN]	Esfuerzos Equivalentes de Von Mises [MPa]			
		Sección A		Sección B	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Caso 1	0.968	60.54	12.68	113.64	25.3
Caso 2	0.792	59.8	12.02	107.75	23.98
Caso 3	1.056	65.5	13.64	117.85	39.32
Caso 4	0.704	56.14	11.27	101.01	22.49
Caso 5	1.144	74.85	15.03	134.69	44.95
Caso 6	0.616	51.46	10.33	92.6	20.61

Para comprender de mejor manera los resultados expuestos en la tabla anterior, las Figuras 3.9 y 3.10 presentan los diagramas de barras que indican los esfuerzos obtenidos en cada sección crítica (Sección A y B) dependiendo del caso de estudio simulado.

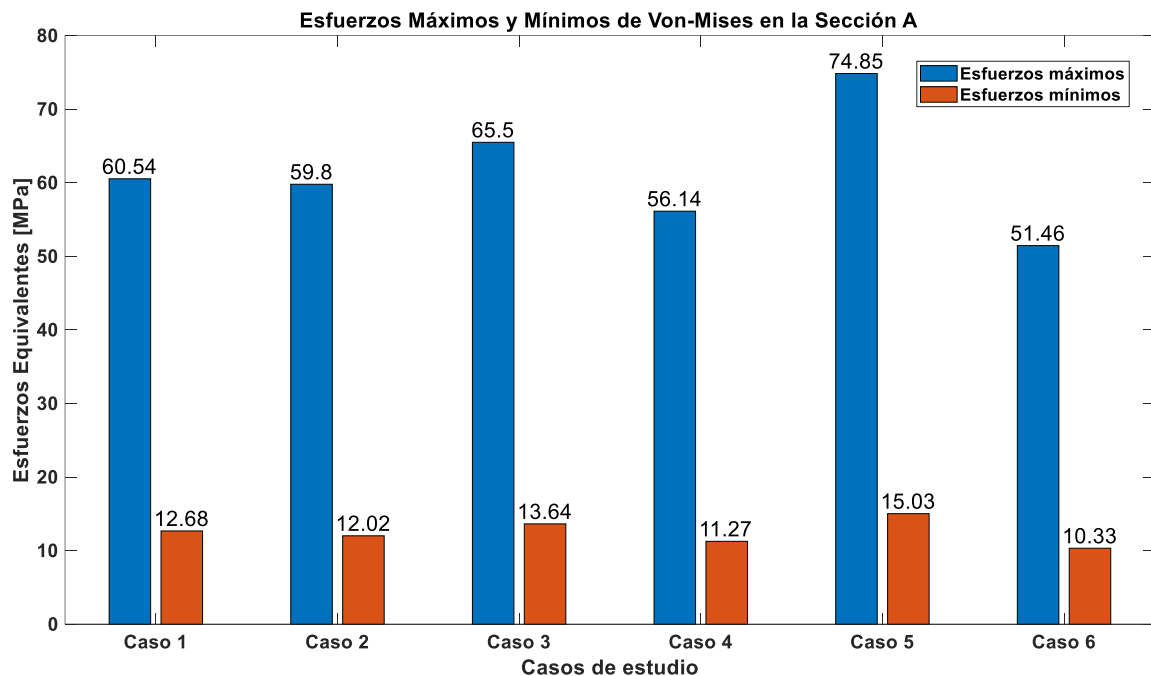


Figura 3.9. Esfuerzos máximos y mínimos en la Sección A de los 6 casos de estudio.

Fuente: Propia

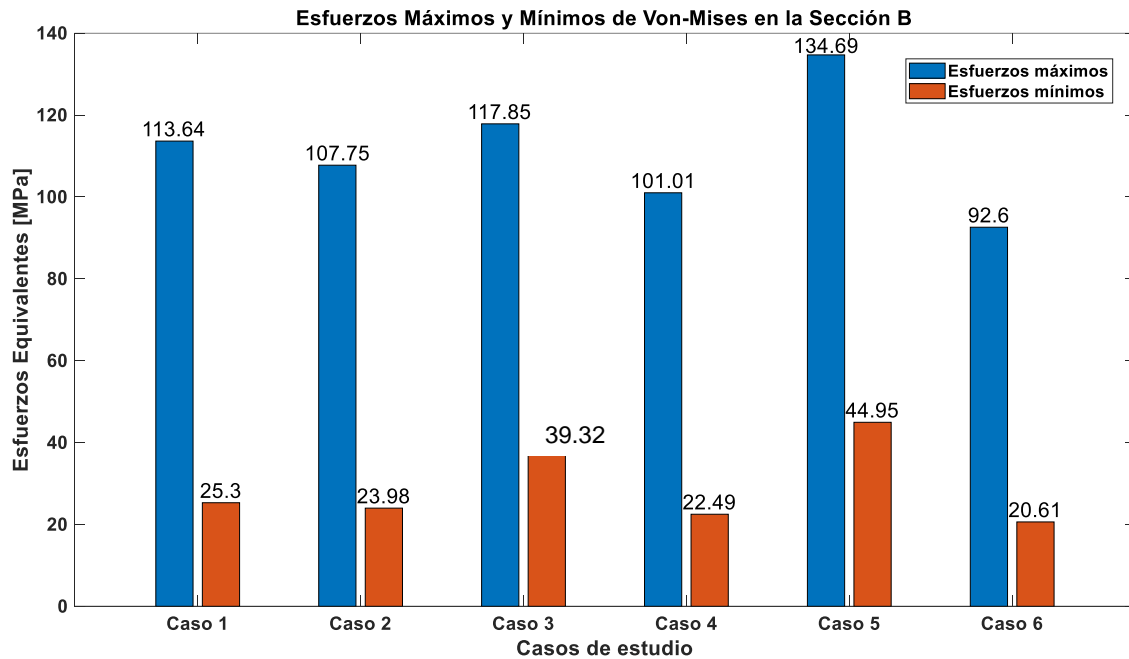


Figura 3.10. Esfuerzos máximos y mínimos en la Sección B de los 6 casos de estudio.

Fuente: Propia

Como se observa en las figuras anteriores, los casos 3 y 5 tienen los esfuerzos más grandes de 117.85 MPa y 134.69 MPa, respectivamente. De la misma manera, sucede con los esfuerzos mínimos de 39.32 MPa y 44.95 MPa. Además, se verifica que la sección B (zona de curvatura) presenta mayores esfuerzos máximos y mínimos; siendo así la sección más crítica del ducto.

Después de analizar los esfuerzos producidos en cada sección crítica, se considera pertinente estudiar las deformaciones unitarias siguiendo el mismo procedimiento de este apartado.

3.1.7.2 Deformaciones unitarias en cada sección

Utilizando el mismo procedimiento del apartado anterior, se observa los valores obtenidos de deformaciones y se verifica si en realidad la zona de curvatura presenta mayores deformaciones.

La Figura 3.11 muestra un ejemplo de deformaciones unitarias obtenidas en las secciones A y B para el caso 1, donde se evidencia los resultados de deformaciones en cada zona crítica.

Caso 1

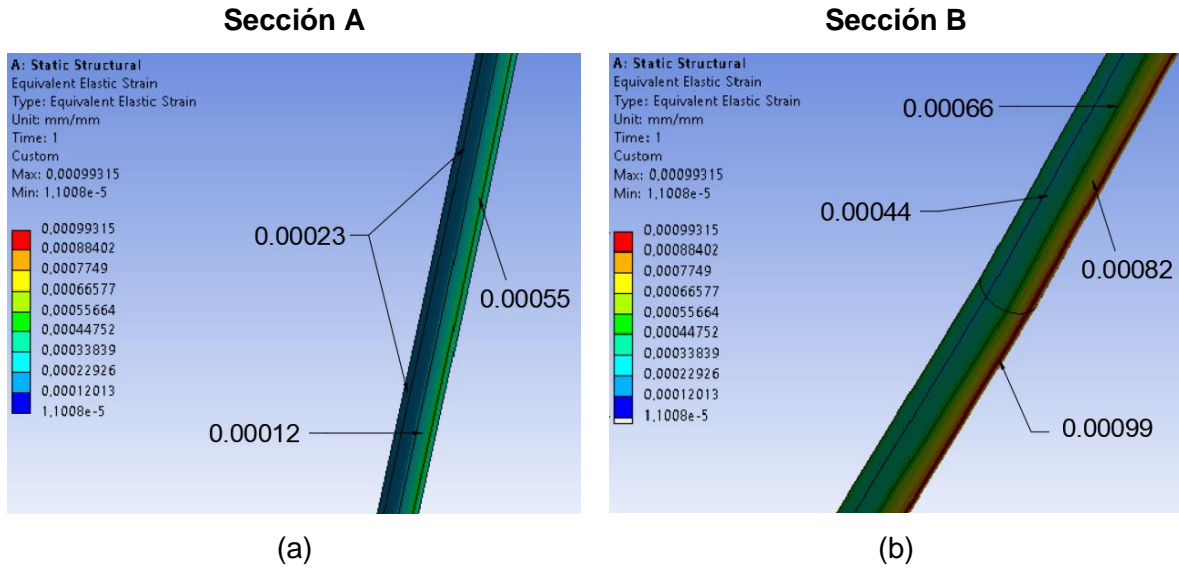


Figura 3.11. Deformaciones unitarias en el caso 1. (a) Sección A; (b) Sección B.

Fuente: Propia

Al realizar las demás simulaciones para los 5 casos restantes, se resume estos resultados obtenidos de la simulación en la Tabla 3.8; la cual explica las deformaciones unitarias máximas y mínimas de cada sección crítica (Sección A y B).

Tabla 3.8. Resultados de deformaciones unitarias máximas y mínimas en cada sección.

Casos de estudio	Tensión a simular [MN]	Deformaciones Unitarias			
		Sección A		Sección B	
		Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
Caso 1	0.968	0.00055	0.00012	0.00099	0.00044
Caso 2	0.792	0.00052	0.00011	0.00094	0.00032
Caso 3	1.056	0.00069	0.00015	0.00103	0.00046
Caso 4	0.704	0.00049	0.00011	0.00088	0.0003
Caso 5	1.144	0.00078	0.00027	0.00117	0.00065
Caso 6	0.616	0.00045	0.000098	0.00081	0.00027

Las Figuras 3.12 y 3.13 ilustran de mejor manera las deformaciones mostradas en la tabla anterior. Estas figuras presentan los diagramas de barras los cuales indican las deformaciones unitarias máximas y mínimas en cada sección crítica; mostrando los casos de estudio donde se presentan mayores y menores deformaciones en el ducto.

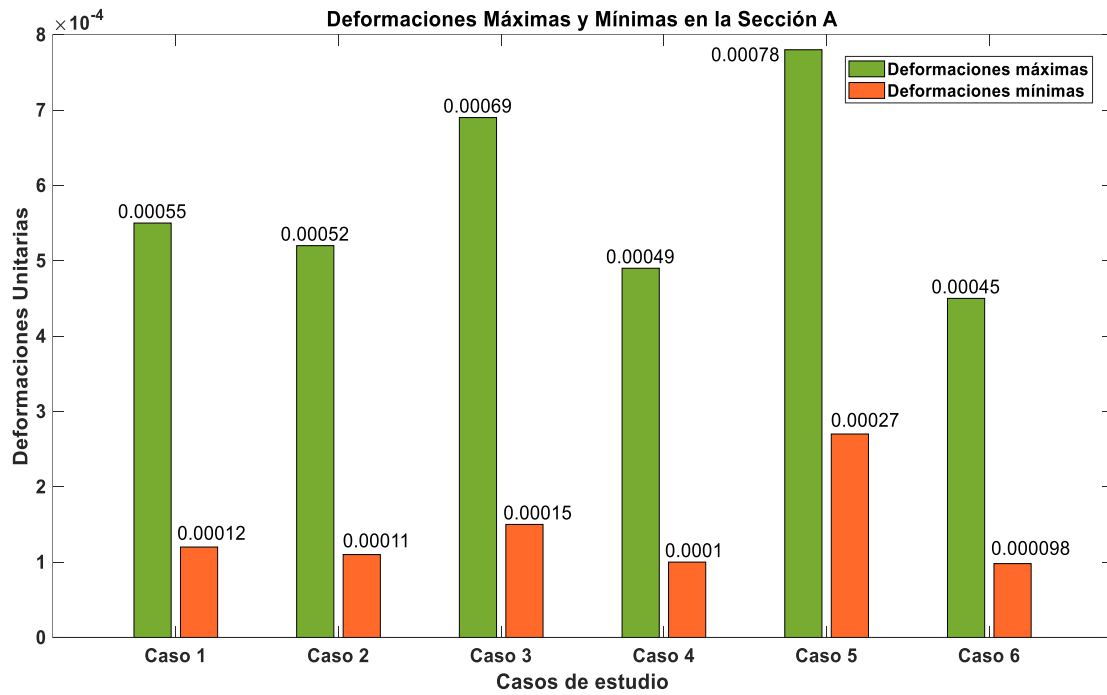


Figura 3.12. Deformaciones máximas y mínimas en la Sección A en cada caso.

Fuente: Propia

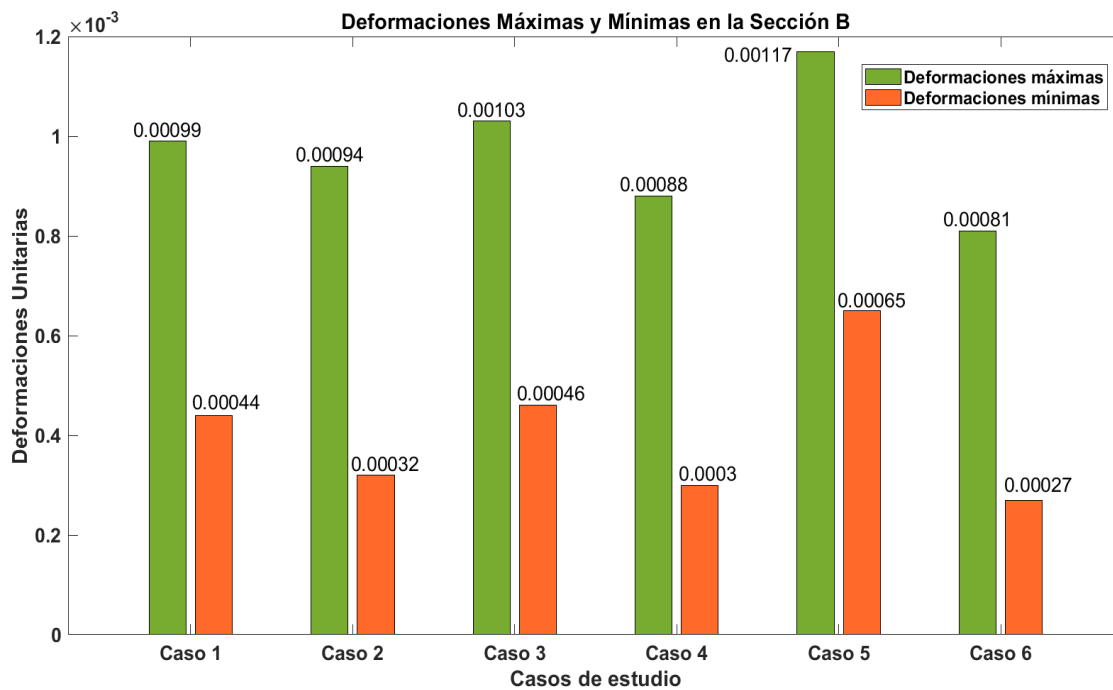


Figura 3.13. Deformaciones máximas y mínimas en la Sección B en cada caso.

Fuente: Propia

En las figuras anteriores se observa también que los casos 3 y 5 tienen las deformaciones unitarias más grandes de 0.00103 y 0.00117 para la sección B. De la misma manera, sucede con las deformaciones unitarias mínimas de 0.00046 y 0.00065. Además, se verifica que la sección B (zona de curvatura) presenta mayores deformaciones unitarias máximas; siendo así la sección más crítica del ducto.

Para finalizar este apartado de resultados, tal como se indicó en las figuras anteriores (ver Figuras 3.9, 3.10, 3.12 y 3.13) se verifica que la sección B (zona de curvatura del riser) presenta mayores esfuerzos y deformaciones máximas que la sección A (punto de sujeción del riser). Por ende, se concluye que la sección B (zona de curvatura) es la sección más crítica de las dos secciones analizadas.

De los 6 casos de estudio obtenidos, se muestra que los casos 3 y 5 son los casos con tensiones más grandes, las cuales generan mayores esfuerzos y deformaciones en el riser; siendo el caso 5 el más crítico.

3.2 Conclusiones

Tras el análisis realizado en este componente, se obtuvo algunas conclusiones que se mencionan a continuación:

- En este trabajo se realizó un modelo en elementos finitos para un riser configuración tipo J, donde se realizó el análisis estático y cuasi estático para encontrar los esfuerzos equivalentes y las deformaciones unitarias en el punto de sujeción y en el punto de curvatura máxima.
- Se realizó el análisis estático utilizando una tensión de 0.88 MN, en la cual se obtuvo los resultados de esfuerzos equivalentes y deformaciones unitarias máximas en las secciones más críticas del ducto.
- Para el punto de sujeción del riser se obtuvo un esfuerzo máximo de 36.51 MPa y una deformación unitaria máxima de 6.4×10^{-4} . En cambio, para la zona de curvatura se obtuvo un esfuerzo máximo de 109 MPa y una deformación unitaria máxima de 9.6×10^{-4} .
- En el análisis cuasi estático se realizó las variaciones paramétricas en la tensión máxima, donde se obtuvo que los casos de estudio 3 y 5 son los más críticos.

- Para el tercer caso de estudio, el cual se simuló el ducto con una tensión de 1.056 MN. Para el punto de sujeción del riser se obtuvo un esfuerzo máximo de 65.5 MPa y una deformación unitaria máxima de 6.9×10^{-4} . En cambio, para la zona de curvatura se obtuvo un esfuerzo máximo de 117.85 MPa y una deformación unitaria máxima de 1.03×10^{-3} .
- Para el caso de estudio con la mayor tensión, es decir, la tensión de 1.144 MN el cual se simuló el ducto. Para el punto de sujeción del riser se obtuvo un esfuerzo máximo de 74.85 MPa y una deformación unitaria máxima de 7.8×10^{-4} . En cambio, para la zona de curvatura se obtuvo un esfuerzo máximo de 134.69 MPa y una deformación unitaria máxima de 1.17×10^{-3} .
- Con los resultados obtenidos del análisis estático y cuasi estático; y utilizando el rango de variación de la tensión, existe una disminución de los esfuerzos y deformaciones hasta un 23.5%.
- Con estos resultados obtenidos se concluyó que el caso simulado con una tensión de 1.144 MN del análisis cuasi estático es el caso más crítico que trabaja el riser. Además, se verificó que la sección más crítica y donde existen los mayores esfuerzos y deformaciones unitarias es en la sección de curvatura (Sección B) del ducto.

3.3 Recomendaciones

Como recomendaciones para realizar trabajos futuros, se puede mencionar lo siguiente:

- Desarrollar otros ductos de acero que puedan trabajar en otras condiciones ambientales y en otras profundidades. Por ejemplo, se puede realizar un estudio bajo otras condiciones de corrientes marítimas, utilizando efectos de vorticidad, etc.
- Se puede realizar simulaciones de un ducto en aguas más profundas. Es decir, se puede analizar un ducto en profundidades de hasta 1000 m; dependiendo del lugar de trabajo que se desee estudiar.
- Realizar otro estudio paramétrico de las tensiones a simularse, para observar los resultados de esfuerzos y deformaciones, es decir, si existe un aumento o disminución.

- Se recomienda realizar un análisis dinámico del comportamiento del ducto de acero utilizando la tensión dinámica obtenida mediante el movimiento del FPSO.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3DCadPortal. (s.f.). *3DCadPortal*. Recuperado el 13 de 04 de 2023, de <https://www.3dcadportal.com/ansys.html>
- Brewer, T., Endo, T., Kamata, M., Fox, P. J., Goldberg, D., Myers, G., . . . Rack, F. (2005). Perforación de pozos profundos en los océanos con fines científicos: Revelación de los secretos de la Tierra. *Oilfield Review*, 16.
- Buberg, T. (2014). Design and Analysis of Steel Catenary Riser Systems for Deep Waters. Norway: NTNU-Trondheim (Norwegian University of Science and Technology).
- Carvajal, L. (2006). *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado* (28 ed.). Santiago de Cali: U.S.C.
- Casas, Ó. S. (2012). Explotación de Campos Petroleros en Aguas Profundas. México.
- Cook, R., & otros. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. Wisconsin: John Wiley & Sons, Inc.
- Cruz, A. (s.f.). Desarrollo de Campos de Aguas Profundas. Recuperado el 12 de 04 de 2023
- D. Deka, M. C. (2010). Straked Riser Design using VIVA. *OMAE*, 12.
- Ferreira, P. S. (2018). Análisis de Riser Rígido Utilizando Método de Elementos Finitos. Río de Janeiro.
- Guo, B., & otros. (2014). *Design, Installation and Maintenance Offshore Pipelines*. Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA: Elsevier.
- Herdiyanti, J. (2013). Comparisons Study of S-Lay and J-Lay Methods for Pipeline Installation in Ultra Deep Water. Norway.
- J. Vieiro, A. A. (s.f.). Two-way coupled fluid-structure interaction of gas-liquid slug flow in a flexible riser: small-scale experiments and simulations. Norway.
- J.L. Meriam, L. K. (2006). Catenaria Cable. En *Statics* (pág. 550). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Joselyn Jiménez, J. O. (2018). Análisis de Esfuerzos de Riser de Perforación. Ciudad de México.
- López, W. J. (2023). Estudio del comportamiento mecánico del sistema de risers de un FPSO usando métodos numéricos. Quito.
- Manríquez, C. S. (2014). Conceptos de Diseño de Tuberías Verticales (Risers). México.
- NG, E.-B. (2020). Potential Failure Modes and Considerations for Reel-Lay Method of Installation. *Oilman Magazine*, 3.

- Paulo Pereira, C. M. (2006). Análisis Sistemático de un Proyecto para un riser Híbrido de Uso en Aguas Ultraprofundas . Rio de Janeiro: Rio Oil & Gas.
- Pazmiño, R. (2023). Análisis Cinemático de un FPSO. Quito.
- Risks, M. G. (2017). *MAPFRE Global Risks*. Obtenido de MAPFRE Global Risks: <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/offshore-colosos-en-el-mar/>
- Sánchez , P., & Cabrera, J. (2009). Sistemas de Producción Submarinos para Campos en Aguas Profundas. México.
- Shell. (s.f.). *Shell*. Recuperado el 11 de 04 de 2023, de <https://www.shell.com.co/energia-e-innovacion/aguas-profundas.html>
- STENFLEX. (s.f.). *STENFLEX*. Recuperado el 14 de 04 de 2023, de <https://www.stenflex.com/es/productos/compensadores-de-acero.html>
- Terán, L. V. (s.f.). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Obtenido de Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/m4.html>