



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**“DISEÑO DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA EL
PANDEO VERTICAL EN UN DUCTO MARINO CON
CONDICIONES DE ALTA PRESIÓN Y ALTA
TEMPERATURA”**

DESARROLLO DE UN CASO PRÁCTICO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

ROMÁN ARMANDO MATA ARELLANO



ASESOR: M. EN I. MARIO SOSA RODRÍGUEZ

ASESOR (EXTERNO): ING. BERNABÉ RUIZ QUINTANA

MÉXICO 2016.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

*Quiero expresar mi agradecimiento primeramente a **Dios**, por permitirme continuar con vida y haberme dado la oportunidad de cumplir con esta meta.*

*Agradecer a la **Máxima Casa de Estudios**, a mi querida **Universidad Nacional Autónoma de México** por haberme permitido ser parte de ella.*

*Al **Instituto Mexicano del Petróleo** donde he podido desarrollarme profesionalmente y que tantas satisfacciones me ha dado.*

*Un especial agradecimiento a mis asesores **M. en I. Mario Sosa Rodríguez** por haber aceptado este compromiso, por su apoyo y colaboración. **Ing. Bernabé Ruiz Quintana** por sus consejos, asesoría y orientación en la elaboración de este trabajo.*

*A mis **Sinodales** Que se tomaron el tiempo para revisar el presente estudio y por sus valiosas sugerencias.*

*A todos mis **Profesores** desde el nivel básico y hasta el nivel superior, a todos ellos gracias.*

DEDICATORIAS

Dedico este logro con todo amor y cariño a:

A mis padres

Jorge Mata mendoza †

y

Julia Arellano López

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por haberme dado una profesión, por amarme, cuidarme y sobre todo por apoyarme incondicionalmente en todo momento, gracias por todo papá y mamá.

A mi esposa

Alma Rojo Juárez

Quien me alentó e impulsó a terminar este proyecto, por permanecer a mi lado a pesar de las adversidades y por apoyarme para continuar siempre adelante, te amo como mil.

A mis hermanos

Carlos, Nérida, Arturo y Chucho

por estar siempre presentes, los quiero mucho.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. ANTECEDENTES.....	6
Capítulo II. DUCTOS MARINOS Y SUS COMPONENTES.....	8
II.1. Componentes de un ducto marino.....	8
II.1.1. Ducto ascendente.....	9
II.1.2. Curva de expansión.....	10
II.1.3. Línea regular.....	10
Capítulo III. EL FENÓMENO DEL PANDEO EN DUCTOS MARINOS POR CONDICIONES DE ALTA PRESIÓN Y ALTA TEMPERATURA.....	11
III.1. Naturaleza y mecanismo del fenómeno de pandeo en ductos marinos.....	11
III.1.1. Pandeo vertical por levantamiento (UpHeaval Buckling, UHB).....	13
III.2. Fuerza efectiva accionadora de pandeo para ductos marinos totalmente restringidos.....	15
III.3. Resistencia axial del suelo.....	18
III.3.1. Resistencia axial de un suelo cohesivo.....	18
III.3.2. Resistencia axial del suelo friccionante (no cohesivo).....	19
III.3.3. Puntos y longitud de anclaje.....	19
III.4. Estrategias o soluciones para mitigar el pandeo vertical por levantamiento.....	22
III.4.1. Estrategias de diseño basadas en la reducción de la fuerza longitudinal de compresión.....	22
III.4.1.1. Cambio en los parámetros de operación del ducto.....	22
III.4.1.2. Cambio de las características físicas del ducto.....	22
III.4.1.3. Curvas de expansión intermedias (Omegas de expansión).....	23
III.4.2. Estrategias de diseño basadas en mantener la fuerza longitudinal de compresión proporcionando la resistencia al levantamiento.....	24
III.4.2.1. Zanjado y enterrado del ducto marino.....	24
III.4.2.2. Colocación continua o intermitente de peso encima de la línea marina para evitar el pandeo vertical.....	25
III.4.3. Estrategias de diseño enfocadas a permitir el pandeo lateral.....	25
III.4.3.1. Configuración serpenteada o en zig-zag.....	25
III.4.3.2. Colocación de durmientes.....	26

III.4.3.3. Secciones con flotación distribuida.....	27
III.4.4. Estrategias alternativas de diseño.	28
III.4.4.1. Uso de tuberías flexibles.	28
III.4.4.2. Sistema equivalente tubo en tubo.....	29
Capítulo IV. FORMULACIÓN DE LA RESISTENCIA AL LEVANTAMIENTO DE UN DUCTO ENTERRADO.	30
IV.1. Resistencia de la cubierta de suelo o roca de un ducto enterrado.	30
IV.1.1. Ductos marinos instalados en zanja y con relleno del producto de la excavación.	31
IV.1.2. Ductos marinos recubiertos de grava vertida.	32
IV.1.3. Ductos marinos instalados en zanja y cubiertos con grava vertida.	32
IV.2. Resistencia al levantamiento de un ducto enterrado.....	32
IV.2.1. Capacidad última neta al levantamiento de un suelo friccionante (no cohesivo).	33
IV.2.2. Capacidad última neta al levantamiento de un suelo cohesivo.....	35
IV.2.2.1. Zanjado con arado (ploughing).....	35
IV.2.2.2. Zanjado con chorro de agua o aire (jetting).....	36
IV.2.2.3. Modo de falla local.....	37
IV.2.2.4. Modo de falla global.	38
IV.2.3. Contribución del peso sumergido de la tubería en la resistencia al levantamiento.	39
IV.3. Descarga o resistencia al levantamiento requerida en ducto marino enterrado.	40
IV.4. Altura de cubierta de suelo requerida para evitar que se accione el pandeo vertical por levantamiento.	44
Capítulo V. CASO DE ESTUDIO.	46
V.1. Datos.....	46
V.1.1. Características de la tubería.	46
V.1.2. Presión y temperatura.	46
V.1.3. Datos del suelo.....	47
V.2. Desarrollo.	48
V.2.1. Cálculo de la fuerza efectiva accionadora de pandeo.	48
V.2.2. Calculo del peso sumergido de la tubería.....	49

V.2.3.	Cálculo de la resistencia axial del suelo y de la longitud de anclaje natural.	50
V.2.4.	Cálculo de los parámetros de la imperfección.	51
V.2.4.1.	Longitud de la imperfección.	51
V.2.4.2.	Parametro de longitud de la imperfección (ϕ_L).	51
V.2.4.3.	Parametro de descarga máxima (ϕ_w).	52
V.2.4.4.	Resistencia requerida del suelo sobre el ducto (W_u).	52
V.2.5.	Cálculo de la altura de cubierta de suelo requerida.	53
CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Ductos marinos.....	8
Figura 2.2.	Componentes de un ducto marino.....	9
Figura 3.1.	Perfil de carga axial.....	12
Figura 3.2.	Método de instalación “S”.....	13
Figura 3.3.	Pandeo vertical de un ducto marino.....	14
Figura 3.4.	Efectos que propician el pandeo vertical de un ducto marino.....	14
Figura 3.5.	Diagrama de fuerza efectiva axial de un ducto marino “corto”.....	20
Figura 3.6.	Diagrama de fuerza efectiva axial de un ducto marino “largo”.....	21
Figura 3.7.	Omega de expansión.....	23
Figura 3.8.	Zanjado y enterrado del ducto.....	24
Figura 3.9.	Configuración típica de tendido serpenteada.....	26
Figura 3.10.	Visualización de pandeo lateral mediante durmientes.....	27
Figura 3.11.	Módulos de flotación.....	27
Figura 3.12.	Tubería flexible.....	28
Figura 3.13.	Sistema tubo en tubo.....	29
Figura 4.1.	Escenarios de ductos enterrados.....	31
Figura 4.2.	Modelo de planos de cortante vertical para la capacidad al levantamiento de un suelo friccionante.....	34
Figura 4.3.	Modelo de falla local para la capacidad al levantamiento de un suelo cohesivo.....	37
Figura 4.4.	Modelo de falla global para la capacidad al levantamiento de un suelo cohesivo.....	38
Figura 4.5.	Modelo de Viga-Columna utilizado para el análisis del pandeo de un ducto.....	41
Figura 4.6.	Curva de diseño para resistencia al levantamiento requerida.....	43
Figura 4.7.	Diagrama de flujo del proceso de cálculo de la cubierta de suelo.....	45
Figura 5.1.	Alturas de cubiertas de suelo requeridas para imperfecciones de hasta 0.60 m.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla V.1.	Características de la tubería.....	46
Tabla V.2.	Parámetros del ducto marino.....	47
Tabla V.3.	Propiedades del suelo de relleno.....	47
Tabla V.4.	Parámetros de imperfección y resistencia requerida del suelo.....	52
Tabla V.5.	Altura de cubierta de suelo requerida.....	54

INTRODUCCIÓN

Dado que los ductos marinos se instalan en entornos remotos y potencialmente hostiles, el costo de instalación puede ser extremadamente alto. Asimismo, el costo de las reparaciones o trabajos de reparación es igualmente alto. Por lo tanto, los ductos marinos enterrados se deben construir tan rápida y eficazmente como sea posible, manteniendo al mismo tiempo el mayor nivel de seguridad contra fallas durante la duración de su uso (vida útil).

Los ductos marinos se instalan con cargas axiales cercanas a cero, a la temperatura ambiente. Cuando un ducto se opera a condiciones de alta temperatura y alta presión interna, las cuales son significativamente mayores a las condiciones ambientales del fondo marino durante el tendido, se tratará de expandir. Los movimientos axiales generados por la expansión del ducto son restringidos por las fuerzas de fricción desarrolladas en la interfase suelo-tubo, generando en consecuencia fuerzas de compresión grandes a lo largo de todo el perfil del ducto, lo que puede causar que se presente el pandeo global si las fuerzas restrictivas son inadecuadas en combinación con la existencia de imperfecciones o una configuración fuera de rectitud (out of straightness, OOS).

Los ductos marinos son requeridos progresivamente a operar a condiciones en las que para lograr flujos mayores, el gas o aceite debe mantenerse a temperatura y presión elevadas, de manera que el pandeo por temperatura se ha convertido en un tema importante para el diseño de ductos marinos con condiciones de alta presión y alta temperatura (AP/AT).

Los ductos marinos tienden a sufrir pandeo con desplazamientos en la dirección de la menor restricción, por lo que los ductos enterrados, debido a que tienen una mayor restricción lateral, tienden a curvarse verticalmente, presentando un pandeo vertical por levantamiento (upheaval buckling, UHB), mientras que los ductos superficiales, o sea tendidos sobre el lecho marino, tienden a pandearse horizontalmente, caracterizando el pandeo lateral. La magnitud del pandeo depende del comportamiento del material del ducto, la forma y las imperfecciones, y las condiciones de la cubierta de suelo.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es mostrar el proceso de diseño de las medidas de mitigación de un ducto marino sometido a pandeo vertical causado por alta presión y alta temperatura (AP/AT), realizando un análisis predictivo para determinar la altura de cubierta de suelo requerida para evitar el fenómeno.

Alcance

El desarrollo del caso práctico se realizará mediante un análisis predictivo simplificado siguiendo la metodología desarrollada por Palmer (1991) y utilizando los lineamientos de la DNV-RP-F110.

- 1) La formulación será aplicable a ductos marinos sometidos a alta presión y alta temperatura.
- 2) La formulación solo considera la solución de pandeo vertical en el escenario de ductos marinos enterrados mediante material granular o roca.

En el capítulo I se presentan los antecedentes del pandeo en ductos marinos causado por alta presión y alta temperatura, se realiza una descripción del fenómeno de pandeo vertical por levantamiento, como se ha tratado de minimizar el problema y que metodologías se han utilizado.

En el capítulo II se describen los principales componentes de los ductos marinos; ducto ascendente, curva de expansión y línea regular. Además se menciona la clasificación de los ductos marinos de acuerdo a su servicio.

En el capítulo III se describe la naturaleza y mecanismo del pandeo vertical por levantamiento; las causas del fenómeno y las estrategias y soluciones para mitigarlo.

En el capítulo IV se presentan las formulaciones utilizadas para determinar la resistencia al levantamiento provista por una cubierta de suelo y para realizar el análisis predictivo del fenómeno de pandeo vertical levantamiento, los parámetros y las variables que intervienen para el desarrollo del mismo.

En el capítulo V se muestra el desarrollo del caso práctico utilizando datos reales como son: las características de la tubería y parámetros del suelo basándose en la formulación descrita en el capítulo anterior.

Finalmente con base a los resultados obtenidos, se emiten conclusiones y recomendaciones para este caso estudio.

Símbolos y abreviaturas

α	Coeficiente lineal de expansión térmica.
δ	Altura de la imperfección.
ΔP_i	Diferencial de presión interna con respecto a la presión de instalación.
ΔT	Diferencial de temperatura (operación – instalación).
ε_L	Deformación longitudinal de la tubería.
γ'	Peso volumétrico sumergido del suelo.
γ_{acero}	Peso volumétrico del acero de la tubería.
γ_{fluido}	Peso específico del contenido por transportar.
γ_{lastre}	Peso volumétrico del concreto para el lastre.
γ_w	Peso específico del agua de mar.
ν	Relación de Poisson.
ϕ	Ángulo de fricción interna del suelo o material de relleno.
Φ_L	Parámetro adimensional de longitud de imperfección.
Φ_w	Parámetro adimensional de descarga.
A_i	Área interna de la tubería.
A_s	Área transversal del acero.
D	Diámetro exterior de la tubería, incluyendo lastre de concreto.
D_o	Diámetro exterior de la tubería.
DNV	Det Norske Veritas, sociedad de clasificación de ámbito mundial con sede en Noruega y fundada en 1864.
E	Módulo de elasticidad del acero de la tubería.
EI	Rigidez a la flexión de la tubería.
f	Factor de resistencia al levantamiento del suelo.
H	Profundidad de enterrado al lomo superior del ducto.

H_c	Profundidad de enterrado al centro del ducto.
I	Momento de inercia de la sección transversal de la tubería.
K_0	Coeficiente de presión lateral del suelo en reposo.
L	Longitud de la imperfección.
LAN	Longitud de anclaje natural.
N	Fuerza efectiva accionadora de pandeo para ductos totalmente restringidos.
N_c	Coeficiente de capacidad de carga.
OOS	Fuera de rectitud (Out Of Straightness).
P_i	Presión interna.
P_u	Resistencia axial del suelo.
R	Resistencia al levantamiento del suelo por unidad de longitud de la tubería.
S_H	Esfuerzo circunferencial en la tubería.
S_L	Esfuerzo longitudinal en la tubería.
$SMYS$	Esfuerzo de fluencia mínimo especificado (Specified Minimum Yield Strength).
S_u	Resistencia al esfuerzo cortante del suelo.
t	Espesor de pared de la tubería.
t_{lastre}	Espesor de lastre de concreto de la tubería.
T_R	Tensión residual debido al tendido.
UHB	Pandeo vertical por levantamiento (UpHeaval Buckling).
W	Fuerza de descarga por unidad de longitud, necesaria para mantener el equilibrio en la posición deformada.
W_S	Peso sumergido de la tubería por unidad de longitud.
W_u	Capacidad última neta al levantamiento del suelo por unidad de longitud.
W_T	Peso de la tubería en el aire por unidad de longitud.
W_w	Peso del volumen de agua de mar desalojada por unidad de longitud.



Capítulo I. ANTECEDENTES.

El pandeo global lateral en ductos expuestos, es decir, instalados superficialmente en el lecho marino fue identificado como un problema potencial por Palmer (1974). Por mucho tiempo éste fue considerado como un problema meramente académico, o posiblemente relevante para “ductos calientes”. Siendo común entender que caliente era por lo menos 50°C por encima de la temperatura ambiente y que el pandeo no era un tema para las grandes ductos marinos. En estos días se sabe que muchos de los ductos marinos existentes han sufrido pandeo. Aunque es verdad que esos pandeos son largos suaves y no han comprometido la integridad de los ductos.

El pandeo vertical por levantamiento (upheaval buckling, UHB), se considera un efecto estructural inducido térmicamente y es un tema común en el diseño de ductos marinos enterrados que se presenta cuando las fuerzas de compresión axial altas inducidas por las condiciones extremas de operación en combinación con las curvaturas o imperfecciones en el perfil del ducto o una configuración fuera de rectitud (out of straightness, OOS) causan que el ducto se levante a través del relleno de suelo pandeándose en el plano vertical, de ahí el nombre de pandeo vertical por levantamiento.

Una vez que se inicia el pandeo, un movimiento ascendente adicional del ducto generaría una reducción en la fuerza de compresión axial, al mismo tiempo que se incrementaría la curvatura en la imperfección, haciendo más fácil que el ducto sufra el pandeo por lo que la estabilidad del ducto depende de la interacción de estos dos efectos. Por lo que la respuesta del ducto puede llegar a ser inaceptable en términos de desplazamientos verticales si el tubo sobresale de la cubierta de suelo o se sale de la zanja en que fue instalado, o bien, si se genera el exceso de fluencia del material, debido a los efectos de segundo orden de la carga, e incluso si se presentan ambos.

Con objeto de prevenir el pandeo vertical por levantamiento, se considera como medida de mitigación que el ducto se tenga que enterrar de manera que la cubierta de suelo sea suficiente para proporcionar la resistencia al levantamiento necesaria. Por lo que mediante el análisis de las imperfecciones en el perfil del ducto junto con uno apropiado del suelo se debe determinar la altura de la cubierta de suelo o cubierta de



roca necesaria para mitigar el pandeo vertical por levantamiento en toda la longitud del ducto procurando al mismo tiempo mantener el mayor nivel de seguridad contra fallas durante la vida útil del ducto.

El pandeo vertical por levantamiento involucra una respuesta general de tipo columna sin la distorsión general de la sección transversal de la tubería, por lo que ha sido analizado a partir de las bases establecidas en trabajos inicialmente desarrollados para analizar el comportamiento estructural del pandeo de los rieles de ferrocarril soldados de forma continua (Martinet, 1956, Kerr, 1979) y rieles continuos de grúa (Marek, 1971). Hobbs (1984) presentó una revisión de estas metodologías, que puede ser extremadamente útiles en la fase de diseño. Sin embargo, después de varias fallas de pandeo vertical por levantamiento en líneas de flujo de diámetro pequeño en el Mar del Norte, se inició una amplia investigación relacionada al fenómeno del pandeo vertical por levantamiento (Guijt, 1990).

Puesto que para los proyectos de ductos marinos, el proceso de instalación y las medidas correctivas subsecuentes son costosas, se ha hecho necesario contar con estimaciones confiables de las profundidades de excavación de la zanja y de las alturas de cubierta necesarias como medida de mitigación del pandeo vertical por levantamiento. Por ello se han desarrollado un número considerable de modelos para predecir la resistencia al movimiento ascendente que proporcionan el suelo y el ducto.

Debido al interés y de las necesidades de la industria en el tema del pandeo vertical por levantamiento, se han desarrollado un número de modelos para predecir la resistencia al movimiento ascendente que proporcionan el suelo y el ducto. La comprensión actual de la resistencia a levantamiento se basa en los análisis y trabajos experimentales (Vesic, 1971; Rowe y Davis, 1982; Hobbs, 1984; Randolph y Houlsby, 1984; Trautmann et al, 1985; Palmer et al, 1990; Schaminée et al, 1990; Dickin, 1994; Croll, 1997; Moradi y Craig, 1998; Baumgard, 2000; White et al, 2001; Bransby et al, 2001; y Cheuk, 2005) de los investigadores en los frentes estructural y geotécnico.



Capítulo II. DUCTOS MARINOS Y SUS COMPONENTES.

Un ducto marino es una estructura formada por tubos y accesorios, los cuales están unidos en sus extremos. Su función es transportar los hidrocarburos de una plataforma a otra, de una plataforma a instalaciones terrestres o a monoboyas, ver figura 2.1.

Por su servicio los ductos pueden clasificarse en:

- Oleoductos
- Gasoductos
- Oleogasoductos

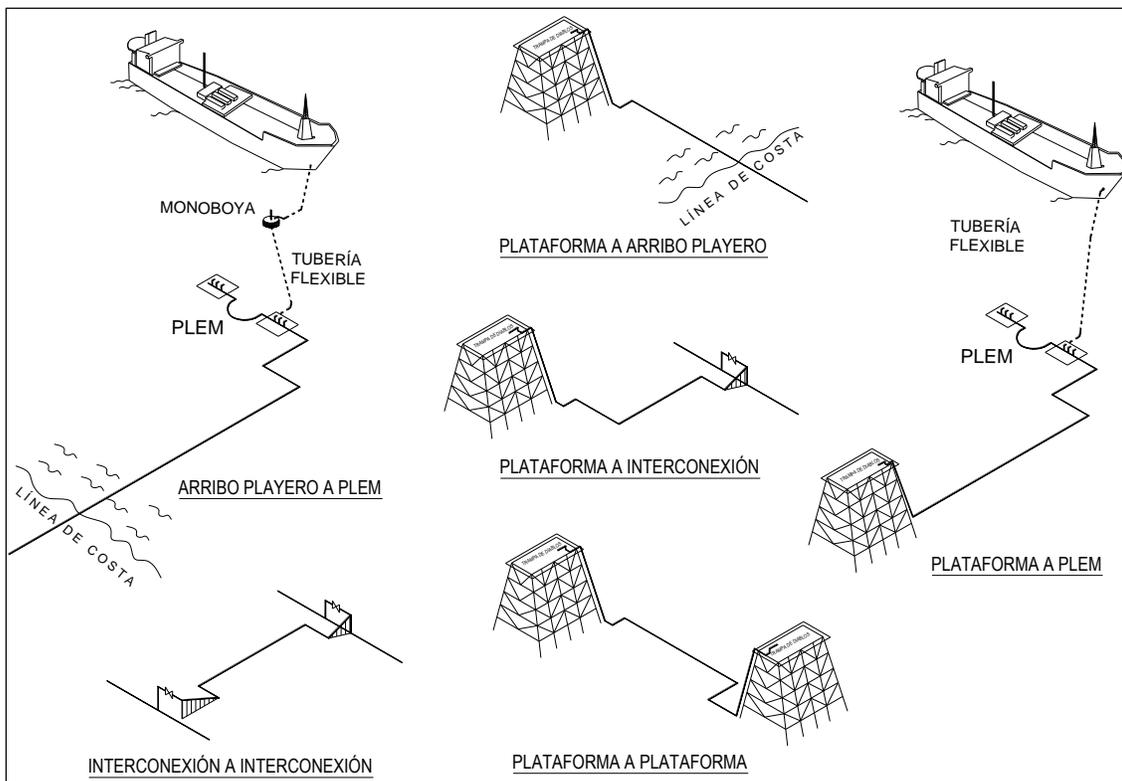


Figura 2.1. Ductos marinos.

II.1. Componentes de un ducto marino.

Un ducto marino está formado de tres partes principales, ver figura 2.2, las cuales son:

- Ducto ascendente
- Curva de expansión
- Línea regular

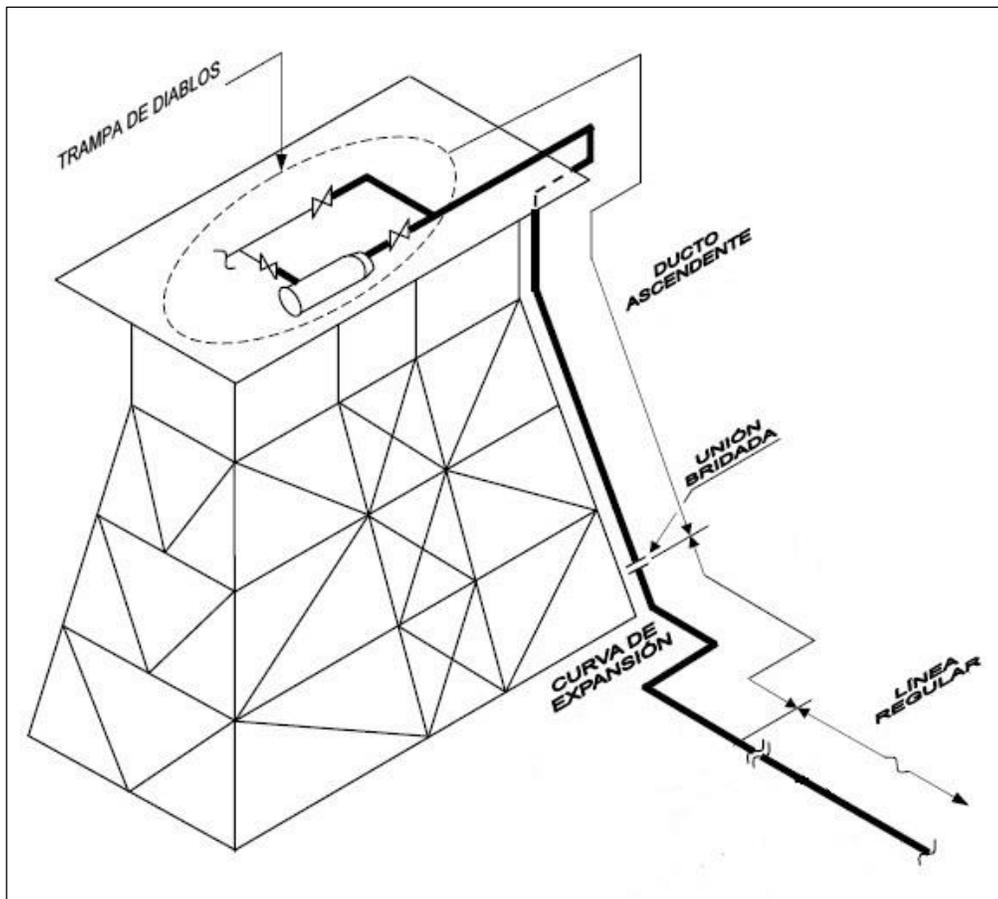


Figura 2.2. Componentes de un ducto marino.

II.1.1. Ducto ascendente.

Se conoce como ducto ascendente o *riser* a la tubería marina vertical en su fase inicial y final (origen – destino) localizada en las plataformas. El ducto ascendente inicia en la unión con la curva de expansión, esta unión se realiza por lo general con un elemento mecánico como una brida de anillo giratorio (brida swivel) y termina en la trampa de diablos o tubería de cubierta, ver figura 2.2.

Las plataformas están construidas con elementos estructurales como elementos tubulares, es el caso de las piernas o patas de las plataformas, las cuales sirven de guía y soporte para el ducto ascendente. El ducto ascendente se mantiene fijo a la plataforma mediante abrazaderas sujetas en un extremo a la pierna de la plataforma y en el otro a la tubería del ducto ascendente.



II.1.2. Curva de expansión.

Se conoce como curva de expansión al tramo horizontal de tubería que une al ducto ascendente con la línea regular. La unión de la curva de expansión con la línea regular se hace por medio de soldadura y la unión de la curva de expansión con el ducto ascendente se realiza mediante una brida swivel. Las curvas de expansión pueden ser diseñadas en forma de “L” o “Z”, su geometría obedece a la trayectoria de llegada de la línea regular a cada plataforma, los cambios de dirección de la curva de expansión se realizan mediante codos. El nombre de la curva de expansión se debe a que la función de este elemento es absorber las expansiones generadas en la línea regular debidos a las condiciones de operación y también absorber los desplazamientos generados en la plataforma debidos a una condición de tormenta.

II.1.3. Línea regular.

Es el elemento de mayor longitud que tienen los ductos marinos, y va regularmente de curva de expansión a curva de expansión. La línea regular puede ir superficial o enterrada en el fondo marino.



Capítulo III. EL FENÓMENO DEL PANDEO EN DUCTOS MARINOS POR CONDICIONES DE ALTA PRESIÓN Y ALTA TEMPERATURA.

III.1. Naturaleza y mecanismo del fenómeno de pandeo en ductos marinos.

Para lograr flujos altos en los ductos marinos, el gas o aceite debe mantenerse a temperatura y presión elevadas. Normalmente, los ductos marinos se instalan con cargas axiales cercanas a cero, a la temperatura ambiente, permaneciendo únicamente una tensión residual efectiva del tendido cuya magnitud es usualmente pequeña en comparación con las fuerzas que se desarrollan en la operación. Cuando la presión interna y la temperatura se incrementan a las condiciones de operación, el ducto tiende a expandirse pero esta expansión es restringida por la resistencia axial entre la tubería y el lecho marino. Esta restricción causa una fuerza axial de compresión en el ducto.

Usualmente los extremos de un ducto marino, por la instalación de las curvas de expansión, pueden expandirse libremente, de manera que la fuerza axial en los extremos es cero, ver figura 2.2 y 3.1. Sin embargo, como la resistencia axial acumulativa incrementa con la distancia a partir de los extremos libres, la fuerza puede incrementarse a la condición de “totalmente restringida”, tal como se muestra en la figura 3.1.

La fuerza efectiva de restricción total mostrada en la figura 3.1 es la fuerza axial efectiva máxima que puede presentarse en un ducto. Esta fuerza de restricción total controla la expansión axial y la respuesta estructural. La fuerza efectiva está constituida de la fuerza en la pared de la tubería y la fuerza axial inducida por la presión en el fluido. Debido a que la presión y la temperatura varían a lo largo de la longitud del ducto, la fuerza de restricción total también varía con la longitud conforme el ducto se enfría (debido a la pérdida de calor con el ambiente). Esto se muestra en la figura 3.1 mediante la caída ligera en la fuerza de restricción a lo largo del ducto.

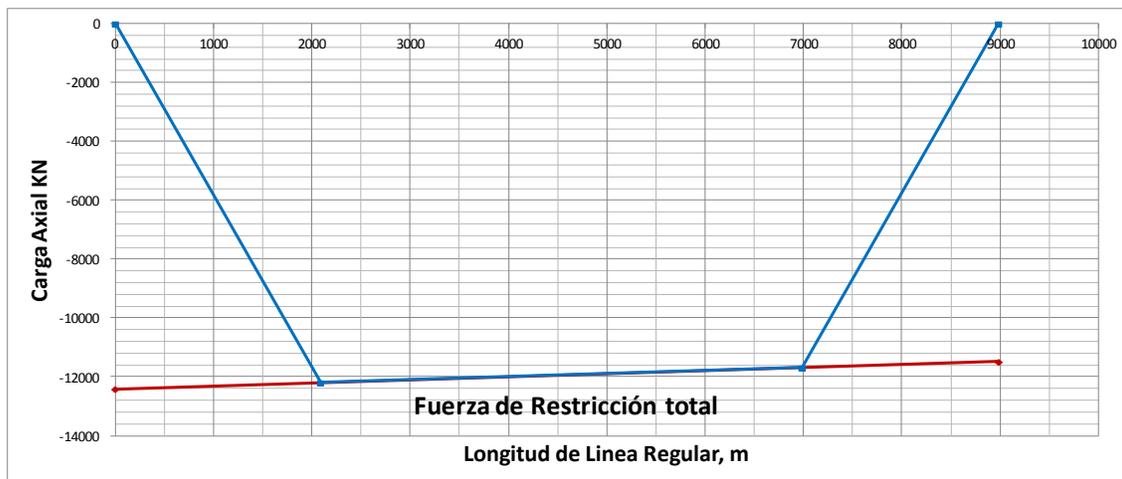


Figura 3.1. Perfil de carga axial.

El incremento gradual en la fuerza axial efectiva desde cero en los extremos libres hasta el valor de restricción total es debido totalmente a la restricción axial acumulativa que proporciona el lecho marino. La pendiente de la línea es igual a la fuerza de restricción axial por unidad de longitud, la cual es modelada típicamente como “friccionante”. Este perfil de fuerza axial es fundamental para la respuesta del ducto.

La fuerza de compresión axial efectiva en un ducto depende de las condiciones de operación y de la fricción axial. Si la fuerza axial es lo suficientemente grande entonces el ducto es susceptible a sufrir pandeo. La susceptibilidad está presente cuando la fuerza axial excede la “fuerza crítica de pandeo” por encima de la cual el ducto llega a ser inestable.

Por otra parte debido al proceso de instalación, normalmente, un ducto marino no es perfectamente recto, si no que experimenta algunas imperfecciones a lo largo de su trayectoria. En dichas imperfecciones, la fuerza axial crea una componente lateral o vertical que trata de pandear globalmente al ducto para liberar la fuerza axial mediante deflexión.

El método de instalación más común para tirantes menores a 100 metros es el método “S” llamado así por la configuración de la tubería al ser tendida, es decir, depositada en el lecho marino, ver figura 3.2. Este método es el más común en México y consiste en ir uniendo tramos de tubería de 12 metros para formar la línea regular.

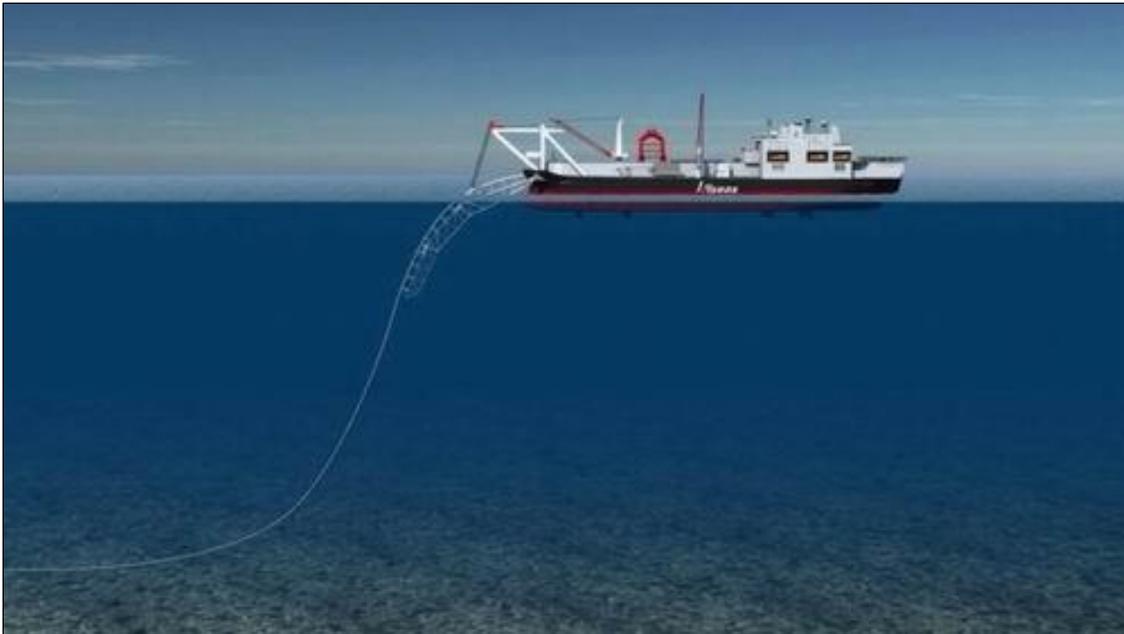


Figura 3.2. Método de instalación “S”.

Fuente: <http://www.2b1stconsulting.com/pipelay-vessel/>

Los ductos marinos enterrados, debido a que tienen una mayor restricción lateral, tienden a curvarse verticalmente, presentando un pandeo vertical por levantamiento (upheaval buckling, UHB), mientras que los ductos superficiales, es decir, tendidos sobre el lecho marino tienden a pandearse horizontalmente, caracterizando el pandeo lateral.

III.1.1. Pandeo vertical por levantamiento (UpHeaval Buckling, UHB).

El pandeo vertical por levantamiento es un efecto estructural inducido térmicamente que se presenta cuando las fuerzas axiales generadas por la restricción de la expansión del ducto a causa de las cargas de presión y temperatura en combinación con las curvaturas o imperfecciones en el ducto generen condiciones para que las fuerzas restrictivas de la capa de suelo sean inadecuadas y el ducto se curve hacia arriba a través del relleno de suelo, es decir, el pandeo vertical por levantamiento ocurre cuando la fuerza ejercida por la tubería en el suelo excede la resistencia vertical del mismo. El ducto se mueve verticalmente hacia arriba conduciendo a una posible inaceptable deformación plástica local, el colapso o se hace vulnerable ante las actividades de pesca y otras actividades por terceras partes.

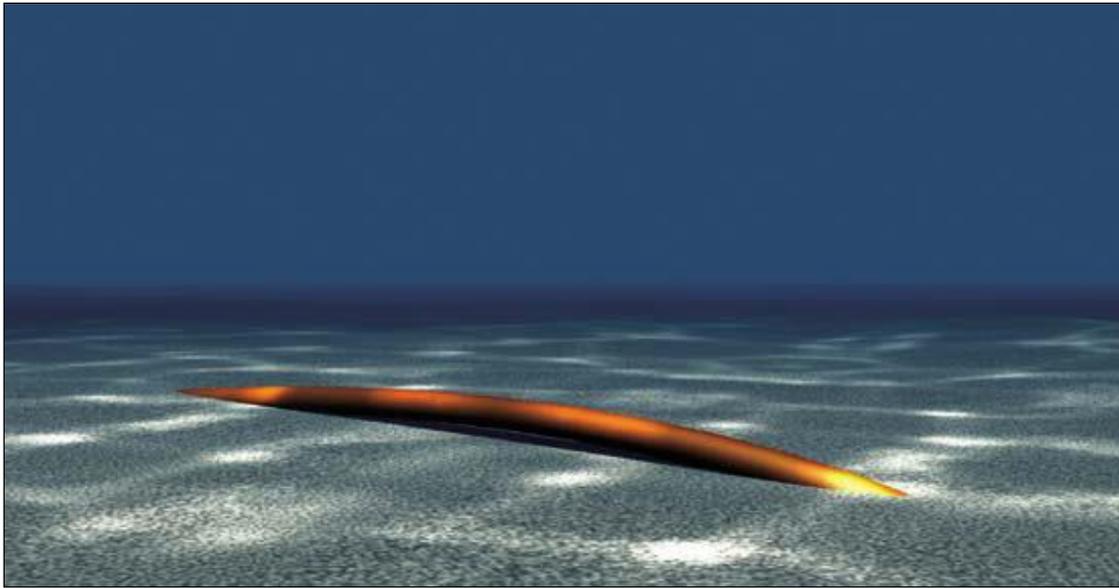


Figura 3.3. Pandeo vertical de un ducto marino.

Una vez que se ha iniciado el pandeo vertical por levantamiento, el movimiento ascendente adicional del ducto conducirá a una reducción en la fuerza de compresión axial. Al mismo tiempo, se incrementa la curvatura en la imperfección, haciendo más fácil que el ducto sufra el pandeo. Por lo tanto, la estabilidad del ducto dependerá de la interacción de estos dos efectos, ver figura 3.4.

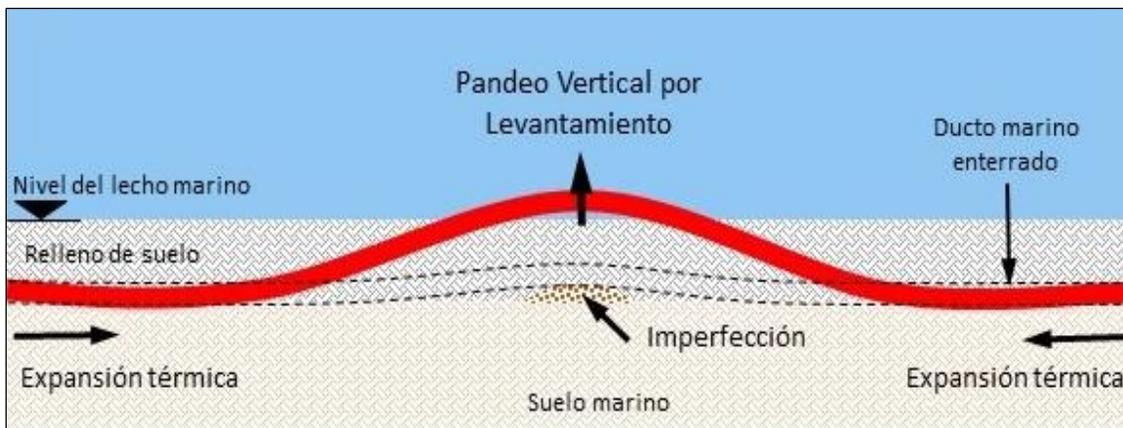


Figura 3.4. Efectos que propician el pandeo vertical de un ducto marino.

Para el diseño seguro en estas situaciones, la fuerza vertical hacia arriba generada por el pandeo vertical por levantamiento debe ser compensada adecuadamente por la resistencia al levantamiento proporcionada la cubierta de suelo. En los casos en que



esta resistencia no sea suficiente, es necesaria una capa adicional roca depositada como material de relleno secundario.

III.2. Fuerza efectiva accionadora de pandeo para ductos marinos totalmente restringidos.

La fuerza accionadora de pandeo es la fuerza longitudinal de compresión en el espesor de pared de la tubería y en el fluido contenido. En general la fuerza tiene los componentes de presión y temperatura puesto que el componente debido a la fuerza de tensión residual es usualmente tan pequeño que se desprecia. Si el ducto es libre de moverse en la dirección longitudinal, la fuerza longitudinal resultante que actúa en la sección transversal es igual a cero, teniendo en cuenta de manera conjunta la pared de la tubería y el fluido contenido, puesto que la fuerza longitudinal de compresión en el fluido es equilibrada por una fuerza longitudinal de tensión igual y de sentido opuesto actuando en la pared de la tubería. Por otra parte, si el ducto no es totalmente libre de moverse en dirección longitudinal, la resultante de las fuerzas no necesariamente es nula.

Un incremento en la temperatura de la pared de la tubería causa que el material de la tubería se expanda, si está libre para hacerlo. Si el movimiento longitudinal se restringe o impide, el material se somete a esfuerzos de compresión, de manera que la fuerza longitudinal de compresión es el valor del esfuerzo de compresión en la pared de la tubería multiplicado por el área de sección transversal de dicha pared.

Un incremento en la presión interna induce un esfuerzo circunferencial de tensión en el espesor de tubería y su correspondiente deformación circunferencial de tensión. Si no existe la presencia de esfuerzos longitudinales y si la tubería fuese libre de moverse longitudinalmente, el efecto de Poisson causaría una deformación longitudinal de compresión. Si el movimiento longitudinal se restringe o impide, el material se somete a tensión, y la fuerza longitudinal de tensión es el producto del valor de esfuerzo de tensión en la pared de la tubería multiplicado por el área de sección transversal de dicha pared. Sin embargo, adicionalmente a la fuerza de tensión en la pared de la tubería se presenta una fuerza longitudinal de compresión en el contenido de la tubería igual al producto de la sección transversal de ese contenido (área interna de la tubería)



y la presión. La fuerza longitudinal de compresión en los contenidos es más grande que la fuerza longitudinal de tensión en la pared, de manera que la fuerza longitudinal resultante es de compresión. Por esta razón, la presión interna de manera individual puede conducir al pandeo vertical o lateral. La teoría ha sido confirmada mediante experimentos presentados por Palmer & Baldry (1974) y por la experiencia de campo.

La explicación realizada en los párrafos anteriores se presenta de manera analítica. En el análisis se trata a la tubería como un tubo cilíndrico de pared delgada compuesta de un material elástico e isotrópico, inicialmente sin fuerza longitudinal, sin presión externa ni restricción en dirección circunferencial. Este caso resulta adecuado para la mayoría de los propósitos prácticos.

La temperatura de referencia es la temperatura a la cual el esfuerzo longitudinal es cero cuando la presión interna es cero, y es usualmente la temperatura de instalación. En el análisis siguiente, las deformaciones y esfuerzos de tensión son considerados positivos, adoptando la convención de signos de la mecánica de materiales.

El esfuerzo circunferencial en la pared de la tubería está dado por:

$$S_H = \frac{P_i D_o}{2t} \quad (3.1)$$

La expresión general para la deformación longitudinal es:

$$\varepsilon_L = \frac{S_L}{E} - \nu \frac{S_H}{E} + \alpha \Delta T \quad (3.2)$$

Los dos primeros términos en el miembro derecho se refieren a las deformaciones inducidas por esfuerzos: el primero es la deformación inducida por el esfuerzo longitudinal y el segundo es la deformación inducida por el esfuerzo circunferencial debido al efecto de Poisson. El tercer término es la deformación inducida por el cambio de temperatura.

Si el movimiento longitudinal es restringido totalmente:



$$\varepsilon_L = 0 \quad (3.3)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.1) y (3.3) en (3.2) y re arreglando

$$S_L = \frac{\nu P_i D_o}{2t} - E\alpha\Delta T \quad (3.4)$$

Multiplicando por el área de sección transversal de la pared del tubo $\pi D_o t$, la fuerza longitudinal en la pared de la tubería es:

$$F_{LW} = \nu P_i \frac{\pi}{2} D_o^2 - \pi D_o t E\alpha\Delta T \quad (3.5)$$

La fuerza longitudinal en el contenido está dada por:

$$F_{LF} = -P_i \frac{\pi}{4} D_o R^2 \quad (3.6)$$

Sumando la fuerza en la pared y la fuerza en el contenido, la fuerza longitudinal sobre la sección transversal total es:

$$-(1 - 2\nu)P_i \pi \frac{D_o^2}{4} - \pi D_o t E\alpha\Delta T \quad (3.7)$$

El primer término corresponde a la fuerza longitudinal inducida por la presión y siempre es negativa y por lo tanto de compresión, debido a que ν es menor que 0.5. El segundo término es la fuerza longitudinal inducida por la temperatura y es usualmente negativa y de compresión, debido a que la temperatura de operación es mayor que la temperatura de referencia.

La ecuación (3.7) puede describirse de manera similar a la presentada en la DNV RP-F110:

$$N = T_R - \Delta P_i A_i (1 - 2\nu) - A_s E\alpha\Delta T \quad (3.8)$$



Donde:

- T_R Tensión axial residual debido al tendido.
- ΔP_i Diferencial de presión interna con respecto a la presión de instalación.
- A_i Área de la sección transversal interna de la tubería $= \frac{\pi}{4} (D_o - 2t)^2$
- D_o Diámetro exterior de la tubería.
- t Espesor de pared de la tubería.
- ν Relación de Poisson del acero de la tubería.
- A_s Área de acero de la sección transversal de la tubería $= \pi t (D_o - t)$
- E Módulo de elasticidad del acero de la tubería.
- α Coeficiente lineal de expansión térmica del acero de la tubería.
- ΔT Diferencial de temperatura (operación – instalación), considerado como positivo si la temperatura de operación es mayor que la temperatura de instalación.

III.3. Resistencia axial del suelo.

Los ductos marinos que operan a presiones y a temperaturas por encima de las condiciones del ambiente tenderán a expandirse, debido a la carga térmica y de presión. Si el ducto está restringido, ya sea parcial o totalmente, se desarrollará en la tubería una fuerza de compresión axial. La magnitud de la fuerza de compresión depende de la restricción aplicada a oponerse a la expansión. Para un ducto marino enterrado, la restricción axial depende de la fricción del suelo del fondo marino y/o de la flexibilidad en los extremos (curvas de expansión).

La fuerza axial última del suelo por unidad de longitud que puede transmitirse al ducto, se puede obtener aplicando las ecuaciones establecidas en el documento “Design Analysis Guidelines for Offshore Pipeline Risers”, (Battelle, 1983).

III.3.1. Resistencia axial de un suelo cohesivo.

La resistencia axial máxima para un suelo cohesivo se calcula con la siguiente expresión:

$$P_u = \alpha S_u \pi D \quad (3.9)$$



Donde:

- D Diámetro exterior total del tubo, incluyendo el lastre de concreto (m).
- α Factor de adherencia (para concreto = 1).
- S_u Resistencia al esfuerzo cortante (kPa).

III.3.2. Resistencia axial del suelo friccionante (no cohesivo).

La resistencia axial máxima para un suelo friccionante se calcula con la siguiente expresión:

$$P_u = \left(\frac{\pi}{2}\right) D H_c \gamma' (1 + k_0) \tan \delta \quad (3.10)$$

Donde:

- D Diámetro exterior total del tubo, incluyendo el lastre de concreto (m).
- H_c Profundidad de enterrado al centro del ducto (m).
- γ' Peso unitario sumergido del suelo (kg/m^3).
- K_0 Coeficiente de presión lateral del suelo en reposo, $K_0 = (1 - \sin \phi)$.
- δ Ángulo de interfase suelo-ducto = $f\phi$.
- ϕ Ángulo de fricción interna del suelo o material de relleno.
- f Factor de fricción entre el recubrimiento del ducto y el suelo (para concreto = 1).

III.3.3. Puntos y longitud de anclaje.

A los ductos marinos enterrados se les proporciona flexibilidad en los extremos por medio de la instalación de curvas de expansión, de manera tal que se expandan en direcciones opuestas. Si la longitud del ducto es tal que la fuerza de restricción acumulativa del suelo no alcanza a restringirlo totalmente, se genera una ubicación en la que la expansión axial cambia de dirección, la cual se denomina punto de anclaje virtual, la que caracteriza a un ducto marino "corto". En la figura 3.5 se muestra un diagrama típico de la fuerza axial efectiva a lo largo de un ducto de este tipo. A la longitud desde el extremo del ducto al punto de anclaje virtual se le conoce como longitud de anclaje virtual.

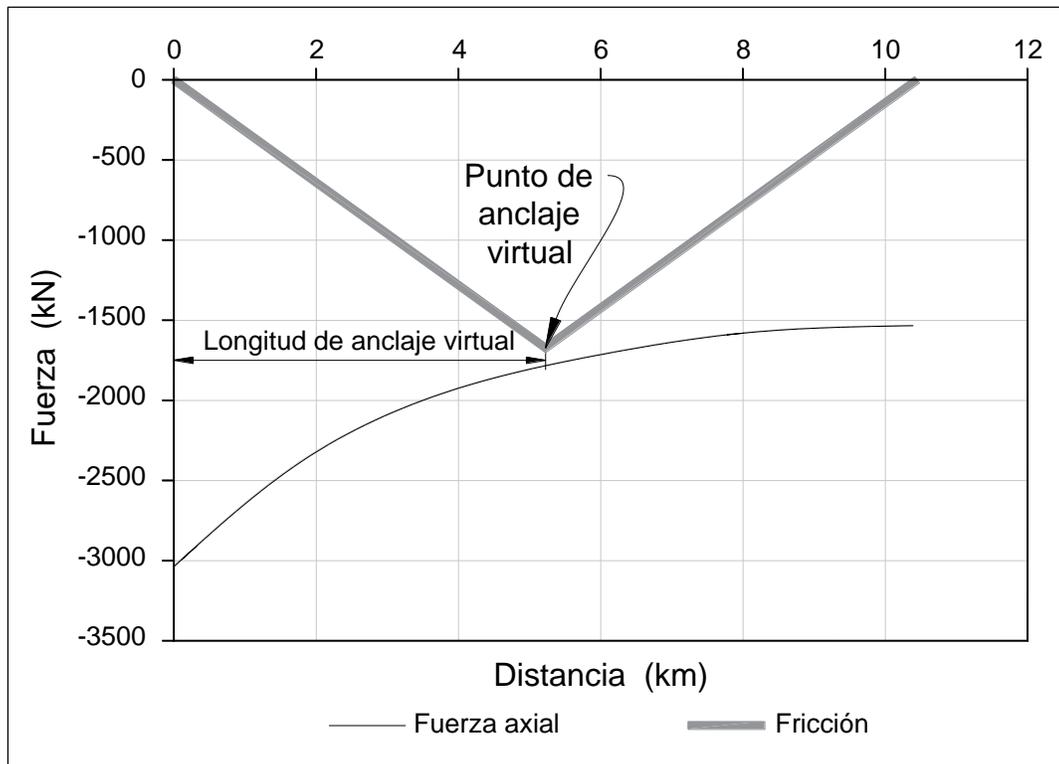


Figura 3.5. Diagrama de fuerza efectiva axial de un ducto marino “corto”.

Para un ducto con longitud suficiente, la acumulación de la resistencia del suelo será la necesaria para restringir totalmente al ducto, causando que cierto tramo del ducto este totalmente restringido, es decir, con desplazamiento axial nulo, mientras que las otras secciones están libres para expandirse, pero permaneciendo en compresión debido a la resistencia del suelo. En este caso se desarrollan dos ubicaciones de anclaje natural, tal como se observa en la figura 3.6. A la longitud desde el extremo del ducto al punto de anclaje se le conoce como longitud de anclaje natural (LAN), a este tipo de ductos marinos se les denomina “largo”.

Por lo tanto, en un fondo marino relativamente plano o uniforme, un ducto bajo cargas de presión y temperatura siempre estará sometido a compresión como resultado de la resistencia del suelo que limita su libre expansión. Sin embargo, puede desarrollarse una fuerza efectiva positiva (tensión), si el fondo marino es bastante irregular o si ocurre hundimiento del fondo marino. De manera que desde este enfoque los ductos pueden dividirse en dos grupos:



- Ductos largos: aquellos en los cuales se desarrolla la fuerza de restricción axial total.
- Ductos cortos: aquellos en los que nunca se desarrolla la fuerza de restricción axial total.

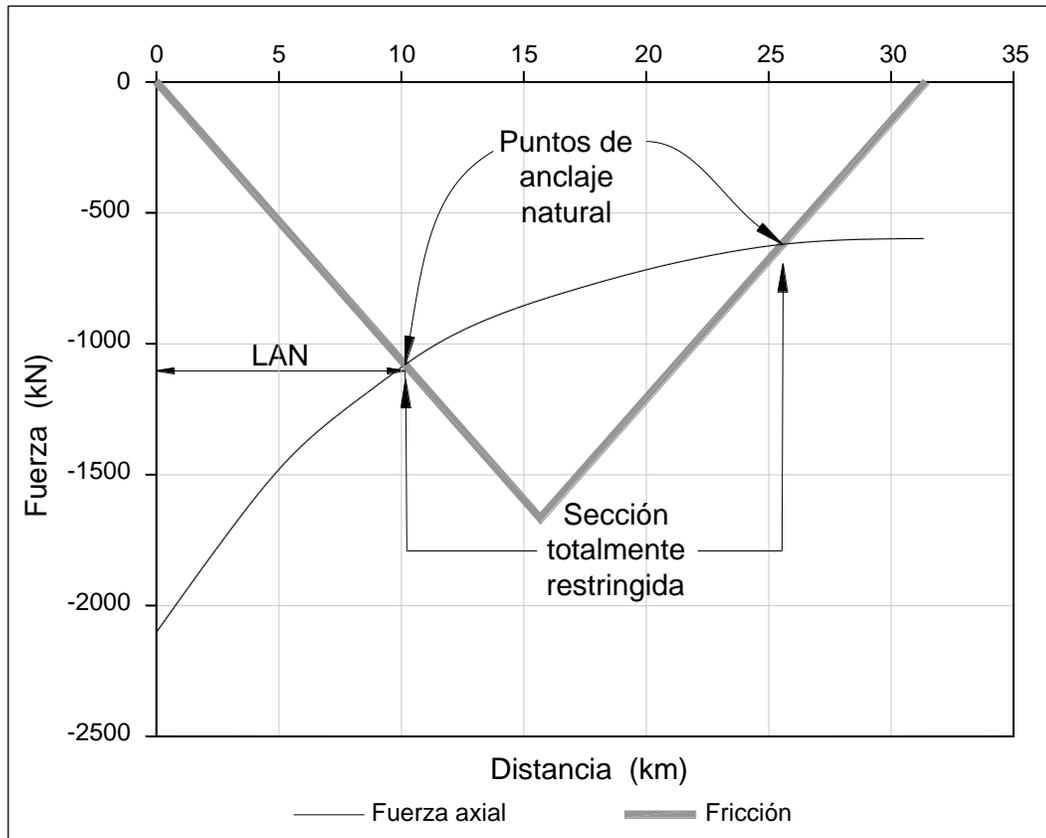


Figura 3.6. Diagrama de fuerza efectiva axial de un ducto marino “largo”.

La longitud de anclaje natural se calcula con la siguiente expresión:

$$LAN = \frac{N}{P_u} \quad (3.11)$$

Donde:

LAN Longitud de anclaje natural (m).

N Fuerza efectiva accionadora de pandeo para ductos totalmente restringidos (N).

P_u Resistencia axial del suelo (N/m).



III.4. Estrategias o soluciones para mitigar el pandeo vertical por levantamiento.

Existen dos soluciones principales para el problema potencial de pandeo global debido a las fuerzas de expansión en ductos de acero al carbono de alta resistencia:

- a) restringir al ducto proporcionando la resistencia necesaria, o
- b) permitirle liberar la fuerza de expansión mediante un pandeo global controlado.

La forma más sencilla y directa de estabilizar un ducto contra el pandeo vertical por levantamiento o pandeo lateral es enterrarlo, sin embargo, esta opción es a menudo costosa y difícil de realizar, por ejemplo, en aguas profundas, lo cual llevó a la búsqueda de alternativas para disminuir el riesgo por pandeo vertical por levantamiento. Las estrategias de mitigación pueden ser clasificadas en los grupos siguientes.

- a) Estrategias de diseño basadas en la reducción de la fuerza longitudinal de compresión (fuerza impulsora).
- b) Estrategias de diseño basadas en mantener la fuerza longitudinal de compresión, proporcionando la resistencia al levantamiento requerida.
- c) Estrategias de diseño enfocadas a permitir el pandeo lateral.
- d) Estrategias alternativas de diseño.

III.4.1. Estrategias de diseño basadas en la reducción de la fuerza longitudinal de compresión.

Dentro de las estrategias de esta categoría, se pueden considerar las siguientes:

III.4.1.1. Cambio en los parámetros de operación del ducto.

La primera y más obvia opción para reducir la fuerza longitudinal de compresión durante el diseño, es reducir la presión de operación y la temperatura.

III.4.1.2. Cambio de las características físicas del ducto.

El término de temperatura en la ecuación de la fuerza impulsora, es proporcional al espesor de pared del ducto; esto indica que resulta benéfico reducir el espesor de pared al mínimo posible.



Reducir el espesor de pared reduce la fuerza impulsora. Para llevar a cabo dicha reducción, se deben considerar los conceptos siguientes:

- Incremento en el grado de acero de la tubería.
- Incremento en el diámetro de la tubería.
- Seleccionar un factor de diseño más alto.
- Adoptar un diseño basado en deformación permisible.

III.4.1.3. Curvas de expansión intermedias (Omegas de expansión).

Para el caso de ductos marinos, el valor de la fuerza compresiva longitudinal puede ser reducido buscando no restringirlo completamente, permitiendo que ocurran movimientos de expansión. Esto se puede realizar con curvas de expansión intermedias (omegas de expansión) adicionales a las colocadas en los extremos del ducto. En este caso se deben calcular los movimientos para asegurar que en la tubería no ocurrirá una flexión o torsión excesiva, particularmente si una sección cercana del ducto en esta zona está anclada o restringida contra movimientos laterales o longitudinales.

Con esta alternativa de diseño, el ducto tendrá mayor libertad para moverse longitudinalmente, reduciendo así su nivel de fuerzas compresivas actuantes, ver figura 3.7.

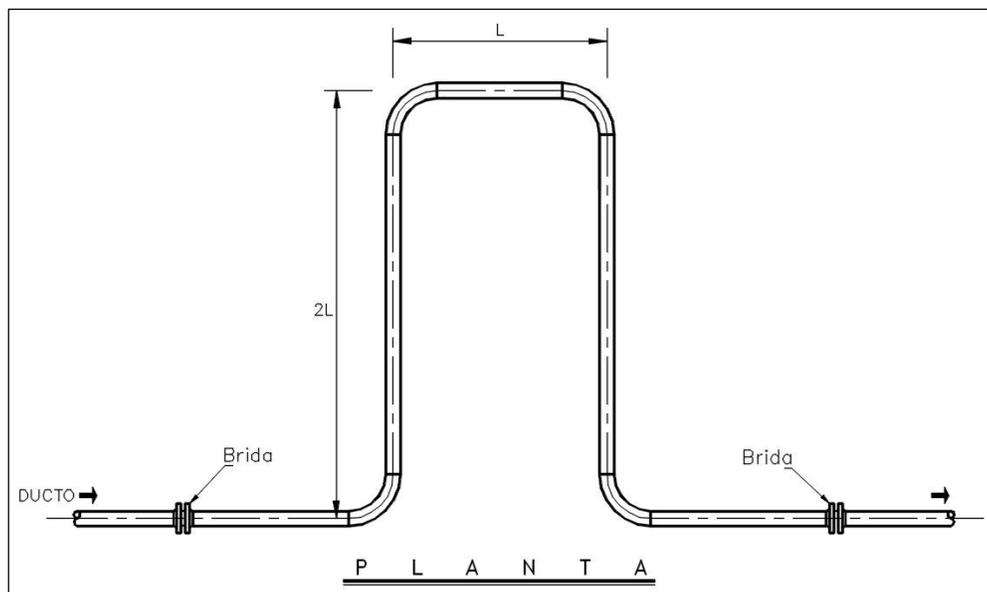


Figura 3.7. Omega de expansión.



III.4.2. Estrategias de diseño basadas en mantener la fuerza longitudinal de compresión proporcionando la resistencia al levantamiento.

Estas estrategias pueden ser las siguientes:

III.4.2.1. Zanjado y enterrado del ducto marino.

El método más común para prevenir el pandeo vertical es el enterrado del ducto para restringir el movimiento horizontal y vertical del mismo. Se debe proveer de un relleno o material de aporte con la altura y resistencia suficiente para prevenir el pandeo vertical. El relleno puede ser material producto de la excavación de la zanja o material de banco que puede ser material rocoso, ver figura 3.8.

En esta opción se deben considerar: la incertidumbre en la consolidación natural del relleno, la disponibilidad de roca y grava debidamente graduada en grandes cantidades y los costos. Asimismo es importante considerar que el suelo marino con baja resistencia hace ineficiente el depósito de roca o grava directamente sobre este tipo de suelo.

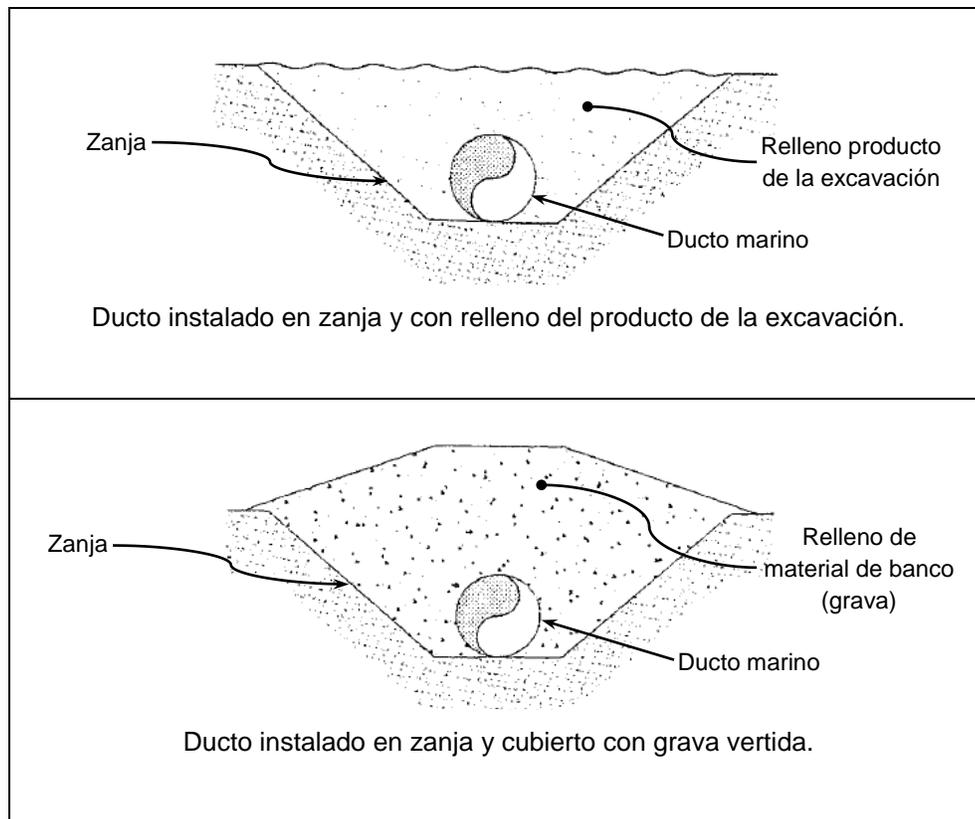


Figura 3.8. Zanjado y enterrado del ducto.



III.4.2.2. Colocación continua o intermitente de peso encima de la línea marina para evitar el pandeo vertical.

La colocación continua o intermitente de peso encima del ducto, es una medida de mitigación común para prevenir el levantamiento de una tubería. Este peso adicional puede ser a través de suelo del sitio, grava, roca, matrices de concreto, entre otras.

La colocación continua de peso se puede considerar cuando no se pueden identificar con certeza las ubicaciones críticas, teniendo en cuenta que es una opción práctica pero costosa.

III.4.3. Estrategias de diseño enfocadas a permitir el pandeo lateral.

A continuación se mencionan algunas estrategias con este enfoque:

III.4.3.1. Configuración serpenteada o en zig-zag.

Una opción para permitir el pandeo lateral, es construir deliberadamente el ducto con una configuración fuera de rectitud (OOS) mediante curvas de radio pequeño para inducirlo a flexionarse lateralmente hasta mitigar la aparición de fuerzas axiales de compresión grandes y con ello los problemas asociados con el pandeo. Normalmente esta opción aplica para ductos instalados superficiales dado que un ducto enterrado no se puede mover significativamente sin salirse de la zanja.

Cada curva se comporta como una omega de expansión amplia, suponiendo una deflexión lateral uniforme pero limitada. De esta forma, la carga de pandeo inicial se libera debido a la expansión axial de la tubería dentro de la curva, suponiendo un efecto de flexión limitado.

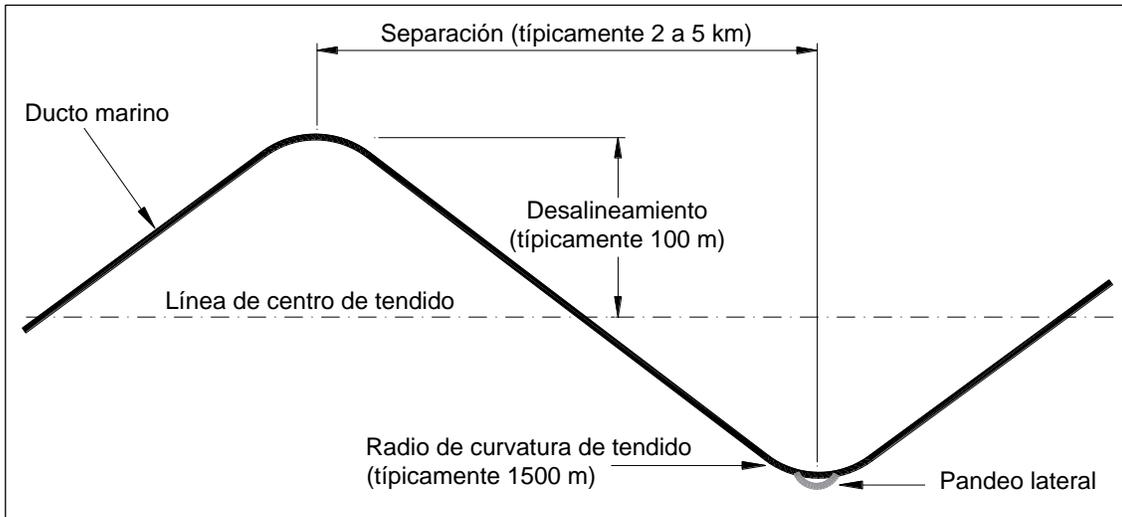


Figura 3.9. Configuración típica de tendido serpenteada.

III.4.3.2. Colocación de durmientes.

Esta opción considera el uso de desalineadores verticales para iniciar un pandeo lateral. Un durmiente pre-instalado cruzando la ruta del ducto, lo levanta y soporta fuera del lecho marino. Esto crea una configuración fuera de rectitud (OOS) que iniciará el pandeo. Adicionalmente, la tubería en la corona de la curva vertical es elevada por encima del lecho marino causando una reducción en la resistencia lateral, reduciendo las incertidumbres de la interacción lateral tubo-suelo.

Los durmientes disminuyen la fuerza crítica de pandeo, por lo tanto, crean una curva vertical con niveles de deformación bajos en la parte alta de la curva. Esto permite proveer mayor capacidad térmica dentro de los sitios de pandeo permitiendo también incrementar el espaciamiento entre curvas y reducir el número de pandeos requeridos.

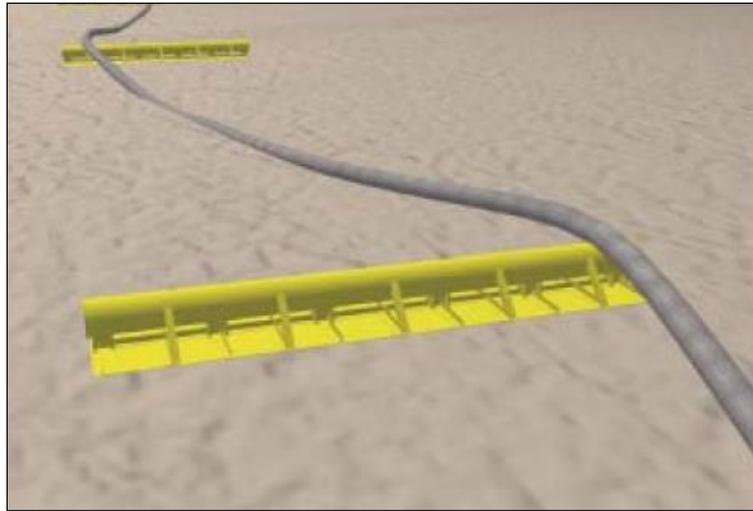


Figura 3.10. Visualización de pandeo lateral mediante durmientes.

Fuente: Offshore Technology Conference 19504

III.4.3.3. Secciones con flotación distribuida.

Se basa en incrementar la flotación de ciertas ubicaciones específicas a lo largo de la trayectoria del ducto marino, disminuyendo la resistencia lateral del suelo generando un mecanismo detonador de pandeo y de alivio de los esfuerzos. Esto se logra mediante la sujeción de módulos de flotación en una longitud determinada, la longitud de cada sección con flotación distribuida es un parámetro clave para controlar el comportamiento del pandeo lateral.



Figura 3.11. Módulos de flotación.

Fuente: International Society of Offshore and Polar Engineers, 253-2012



III.4.4. Estrategias alternativas de diseño.

Estas estrategias son utilizadas en menor medida y su uso está limitado a diseños con características especiales.

III.4.4.1. Uso de tuberías flexibles.

Esta opción es una alternativa radical al problema de levantamiento y tiene implicaciones que deben ser consideradas.

Las tuberías flexibles están sujetas a pandeo por levantamiento, pero su levantamiento está determinado principalmente por el término de presión en la ecuación de la fuerza impulsora y la temperatura influye en una pequeña parte solamente. La magnitud de este término es ampliamente dependiente de los detalles de construcción de su flexibilidad.

La tendencia al pandeo en servicio puede ser reducida por el tendido o el zanjado bajo presión interna o modificando la forma de la estructura interna de la línea bajo un diseño “balanceado”, de tal manera que se produzca una tubería que tienda a contraerse axialmente cuando sea cargada por presión interna.



Figura 3.12. Tubería flexible.

Fuente: Offshore Technology Conference 20518



III.4.4.2. Sistema equivalente tubo en tubo.

En este sistema equivalente, la tubería conductora se localiza dentro de una tubería externa. La tubería interna del sistema desarrolla fuerzas axiales compresivas en operación, pero esas fuerzas son balanceadas por fuerzas de tensión en la tubería externa a través de protectores intermedios y en los extremos, que previenen los movimientos relativos. Así, el sistema tiene una expansión longitudinal, que es resistida por la fricción del suelo marino.

La fuerza resultante a través del sistema es de tipo compresiva, pero el pandeo generalmente no ocurre debido a la alta rigidez flexionante provista por la tubería externa.

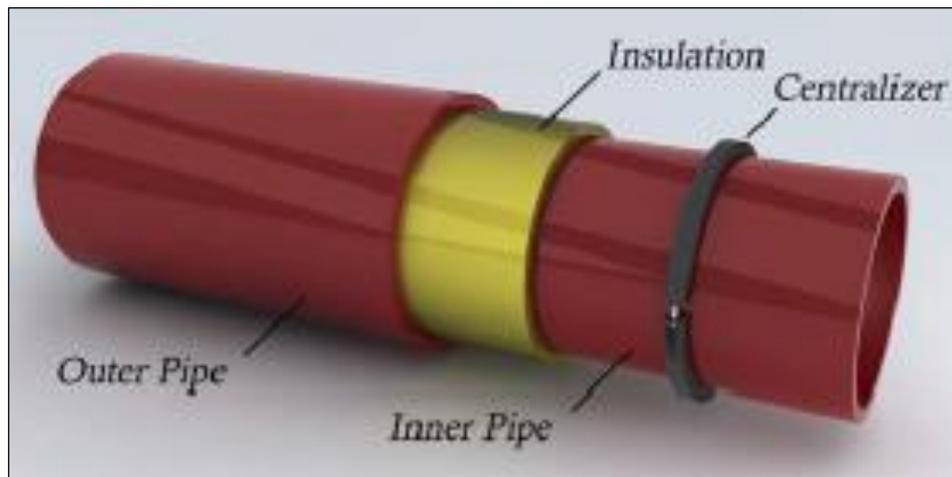


Figura 3.13. Sistema tubo en tubo.

Fuente: Offshore Technology Conference 19504



Capítulo IV. FORMULACIÓN DE LA RESISTENCIA AL LEVANTAMIENTO DE UN DUCTO ENTERRADO.

IV.1. Resistencia de la cubierta de suelo o roca de un ducto enterrado.

Para los proyectos de instalación de ductos marinos localizados en aguas someras, se utiliza normalmente el método de zanjado y enterrado del ducto usando como relleno principal el material producto de la excavación de la zanja. El propósito del enterrado es triple:

- En primer lugar, la cubierta del suelo protege al ducto de los daños físicos tales como colisiones, las operaciones de anclaje y arrastre;
- En segundo lugar, el suelo circundante proporciona un aislamiento térmico adicional, y ayuda a mantener la alta temperatura en la contención requerida para el flujo de baja viscosidad del aceite crudo;
- Por último, pero no menos importante, el suelo sobre el ducto resiste a cualquier tendencia del ducto para moverse verticalmente hacia arriba.

Los ductos marinos enterrados son cubiertos con el fin de evitar cualquier deflexión lateral o vertical puesto que la liberación de la fuerza de compresión axial a través de un pandeo lateral o vertical puede dar lugar a momentos y deformaciones por flexión excesivas. En este caso el análisis de ingeniería tiene que anticipar el estado de esfuerzo-deformación en el ducto y el desempeño de la medida de mitigación para conservar la configuración inicial de la tubería.

De manera que el pandeo vertical por levantamiento en los ductos marinos se puede prevenir asegurando que la cubierta de roca y/o material producto del zanjado tengan el peso y la altura suficiente para proporcionar la resistencia al levantamiento necesaria. La cubierta o relleno se diseña para garantizar la eficacia a largo plazo y la estabilidad de la restricción para el desarrollo de flexión adicional.

Para los ductos enterrados se han identificado tres escenarios (ver figura 4.1), los cuales se describen a continuación.

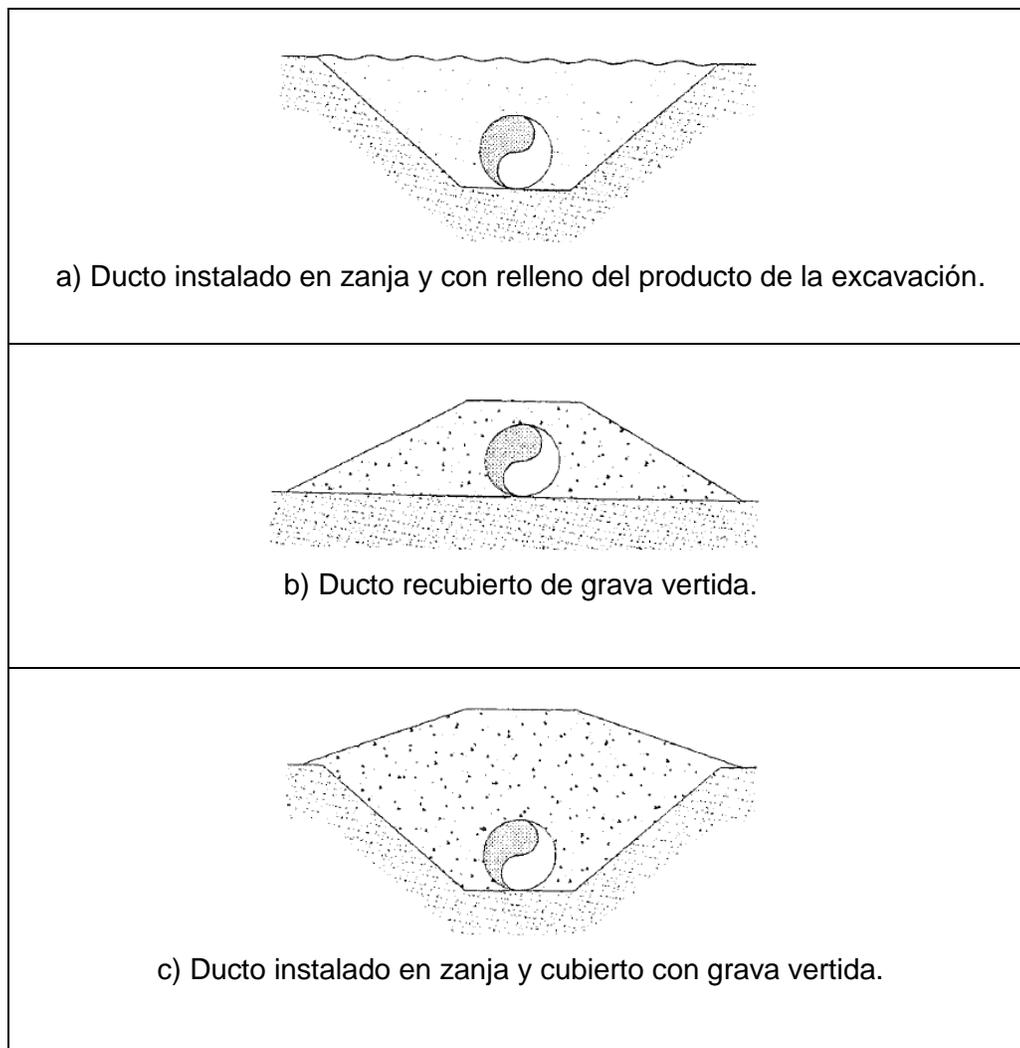


Figura 4.1. Escenarios de ductos enterrados.

IV.1.1. Ductos marinos instalados en zanja y con relleno del producto de la excavación.

El ducto se instala en una zanja con el fin de evitar cualquier deflexión lateral. La zanja se rellena con suelo natural y este tiene que garantizar la estabilidad vertical del ducto bajo condiciones de operación. La capacidad de contención vertical depende del grado de consolidación y es generalmente menor que para las condiciones inalteradas. La profundidad de la zanja requerida es una función de la fuerza de compresión aplicada, la rigidez a la flexión del tubo y la configuración inicial tubería en la zanja (perfil de curvatura longitudinal inicial) que a su vez depende del método de instalación, las características del suelo, la tecnología de excavación de la zanja, entre otros.



IV.1.2. Ductos marinos recubiertos de grava vertida.

Cuando las características de contención del relleno natural son pobres y la fuerza de compresión axial es alta y/o existen requisitos de protección, el ducto se cubre con una cubierta artificial para garantizar la estabilidad lateral y vertical.

Un aspecto importante que tiene que ser evaluado en el diseño de la cubierta de grava es la estabilidad del material de cubierta en relación con las cargas ambientales y para la actividad/estabilidad lecho marino. Los procedimientos para el análisis de la estabilidad geotécnica de los montones de grava son similares a las de los terraplenes o taludes naturales.

IV.1.3. Ductos marinos instalados en zanja y cubiertos con grava vertida.

En la circunstancia de características de contención pobres del relleno natural y/o una altura de la cubierta excesiva debido a una fuerza alta de compresión axial y/o en áreas donde existen restricciones para instalar montículos de grava altos, el ducto se instala en una zanja y es cubierto con grava vertida adicional con el fin de garantizar su estabilidad vertical y lateral. Cuando la tubería es instalada en una zanja, la ocurrencia del levantamiento se ve obstaculizada por la resistencia que ofrece el suelo superpuesto el cual proporciona un sistema de retención suficiente ante la desestabilización.

IV.2. Resistencia al levantamiento de un ducto enterrado.

Para un ducto marino enterrado con condición AP/AT se debe determinar la magnitud de la restricción requerida y asegurar la resistencia al levantamiento correspondiente. Un aspecto importante es la definición de la relación apropiada para describir la capacidad del material de cubierta seleccionado para suministrar la restricción necesaria y para garantizar la estabilidad de la tubería en el corto y el largo plazo.

En un ducto marino enterrado, para mover la tubería verticalmente hacia la superficie del lecho marino o de la cubierta de roca, de manera que se exceda su capacidad, se requiere una fuerza total por unidad de longitud de la tubería W , denominada fuerza última de resistencia total al levantamiento, compuesta por el peso sumergido de la tubería por unidad de longitud, W_s y la capacidad última neta al levantamiento del



suelo por unidad de longitud de la tubería W_u , lo cual se expresa matemáticamente como:

$$W = W_s + W_u \quad (4.1)$$

La capacidad última neta al levantamiento del suelo W_u , es la resistencia del suelo al movimiento del ducto y su resistencia máxima $W_{u\max}$ cambia con los diferentes tipos de suelo, estado de suelo y profundidades de enterrado.

Debido al interés de la industria en el área del pandeo vertical por levantamiento, se han desarrollado un número de modelos para predecir capacidad última neta al levantamiento del suelo, los cuales se basan en el análisis y trabajo experimental desarrollado por investigadores en los frentes estructural y geotécnico. Estos modelos incorporan varios supuestos mecanismos de falla para el comportamiento del sistema tubo- suelo durante el movimiento ascendente a través del relleno de la zanja. Los modelos son en su mayoría representaciones de deformación plana (2D) que asumen la deformación del suelo y las superficies de falla que, o bien se extienden hasta la superficie del fondo marino (poco profundas) o están totalmente contenidos en el material de relleno (profundas). La capacidad al levantamiento del sistema tubo-suelo dependerá de la geometría del sistema de deformación, las resistencias al esfuerzo cortante movilizadas, los pesos propios, la tasa relativa de la carga y el potencial para el desprendimiento del suelo detrás de la tubería.

IV.2.1. Capacidad última neta al levantamiento de un suelo friccionante (no cohesivo).

La interpretación convencional de la capacidad última neta al levantamiento del suelo por unidad de longitud W_u , involucra planos de deslizamiento verticales encima de la tubería, con la geometría y nomenclatura mostradas en la figura 4.2. La resistencia resultante comprende el peso del relleno ($W = \gamma'HD$) y los esfuerzos cortantes sobre los planos de deslizamiento verticales ($\tau = \sigma'_h \tan\phi = K\sigma'_v \tan\phi = K\gamma'z \tan\phi$). Convencionalmente se define la profundidad de cubierta, H, desde la superficie del terreno hasta el lecho superior del tubo.

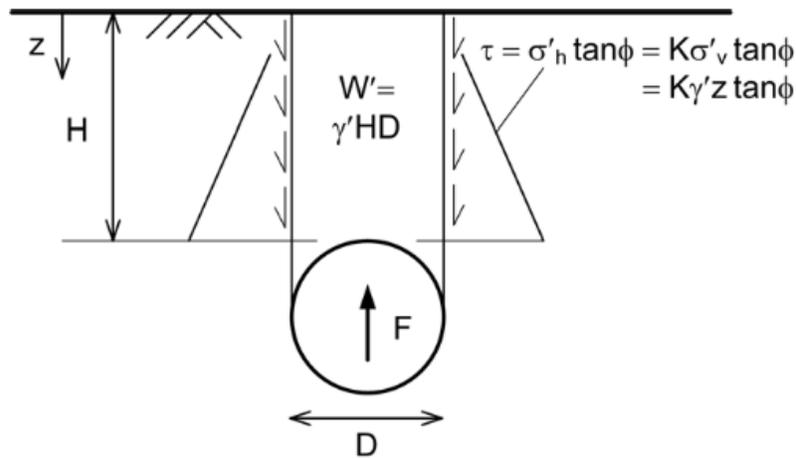


Figura 4.2. Modelo de planos de cortante vertical para la capacidad al levantamiento de un suelo friccionante.

En suelos friccionantes o no cohesivos, un mecanismo hipotético muy utilizado es el modelo de "superficie de deslizamiento vertical" con variación lineal de la resistencia del esfuerzo cortante con el incremento de la profundidad, como se ilustra en la Figura 4.2. El valor pico de la capacidad última neta al levantamiento del suelo por unidad de longitud, W_u , se puede derivar del equilibrio en la dirección vertical usando el volumen total de suelo encima de la tubería, que corresponde al modelo de Pedersen y es dado por la ecuación 4.2.

$$\frac{W_u}{\gamma'HD} = 1 + 0.1 \frac{D}{H} + f_p \left[\frac{H}{D} \right] \left[1 + \frac{D}{2H} \right]^2 \quad (4.2)$$

Donde f_p es el factor adimensional de levantamiento de Pedersen. Para valores altos de la relación H/D ($H/D > 6$), la ecuación 4.2 se puede simplificar ignorando el segundo término y los términos de orden inferior H/D (Schaminée et al, 1990).

$$\frac{W_u}{\gamma'HD} = 1 + f_s \left[\frac{H}{D} \right] \quad (4.3)$$

Donde f_s es el factor de resistencia al levantamiento de Schaminée para suelos no cohesivos.



La DNV-RP-F110 recomienda utilizar la ecuación 4.4 para calcular la resistencia al levantamiento, misma que es una expresión derivada del modelo de Pedersen.

$$R = \gamma'HD + \gamma'D^2\left(\frac{1}{2} - \frac{\pi}{8}\right) + f\gamma'\left(H + \frac{D}{2}\right)^2 = W_u \quad (4.4)$$

Donde:

- R Resistencia al levantamiento del suelo por unidad de longitud de la tubería.
- H Altura de cubierta de roca (profundidad de la cubierta al lomo superior del ducto).
- γ' Peso volumétrico sumergido del suelo.
- f Factor de resistencia al levantamiento.
- D Diámetro exterior total de la tubería incluyendo el lastre de concreto.

IV.2.2. Capacidad última neta al levantamiento de un suelo cohesivo.

Para determinar la resistencia al levantamiento de un suelo cohesivo se deben considerar dos aspectos muy importantes, el primero es el método de zanjado elegido (arado y chorro de agua o aire) debido a su influencia en el parámetro más importante que es la resistencia al esfuerzo cortante (S_u), el segundo es el modo de falla del suelo (local o global).

IV.2.2.1. Zanjado con arado (ploughing).

Este método de zanjado ofrece condiciones más favorables para el enterrado del ducto, debido a que se tiene una menor perturbación de las propiedades del suelo ya que el contenido de agua de la arcilla no experimenta un incremento con relación al material inalterado por consiguiente se espera una diferencia mínima en la resistencia al esfuerzo cortante remoldeada.

La resistencia al esfuerzo cortante remoldeada se establece a través de la medición de la sensibilidad del suelo y se espera una resistencia al esfuerzo cortante mínima (mayor a cero).

La resistencia al esfuerzo cortante se recobra al paso del tiempo (proceso de consolidación) y es proporcional al esfuerzo efectivo de acuerdo a la teoría de arcillas



normalmente consolidadas o igual a la resistencia al esfuerzo cortante remoldeada, cualquiera que resulte mayor.

La velocidad con que la zanjadora debe desplazarse sobre el ducto debe ser tal que se minimice en lo posible la perturbación del suelo marino, y con ello tener una recuperación más rápida de la resistencia al esfuerzo cortante.

IV.2.2.2. Zanjado con chorro de agua o aire (jetting).

Cuando se utiliza este método de zanjado, se deben tener en cuenta los siguientes efectos.

Después del zanjado, el ducto estará rodeado en su parte superior por material en suspensión, el cual se irá asentando gradualmente (si es suelo fino se irá consolidando) en el fondo de la zanja en un tiempo considerable, hasta más de un año en algunos suelos.

La resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla alrededor del ducto se incrementará gradualmente debido a la disipación de la presión de poro (consolidación), desde un valor cercano a cero hasta llegar a la de una arcilla normalmente consolidada.

La velocidad y presión con la que el chorro de agua entra en la masa de suelo en donde se ha depositado el ducto, hacen que se produzcan vacíos en el suelo al irse formando la zanja, pero generalmente es un material homogéneo en proceso de consolidación con una resistencia al esfuerzo cortante muy baja ($S_u < 1.00 \text{ kPa}$).

La resistencia al levantamiento inmediatamente después de la instalación tiene un valor muy pequeño y su valor con respecto al tiempo de la puesta en operación del ducto depende del proceso de consolidación.

Para llevar un control al realizar la zanja el constructor deberá hacer un análisis del zanjado tomando en cuenta la forma, potencia y tamaño de la zanjadora, así como las propiedades del suelo, con lo que se determinará la velocidad de desplazamiento con que la zanjadora debe desplazarse sobre el ducto, así como la presión y velocidad de



salida del chorro de agua o aire para minimizar la perturbación del suelo marino y con ello tener una recuperación más rápida de la resistencia al esfuerzo cortante.

IV.2.2.3. Modo de falla local.

En el modo de falla local el suelo encima del ducto es desplazado alrededor y por debajo del ducto, debido a los pequeños movimientos que experimenta el ducto por los cambios en las condiciones de operación (presión y temperatura). Este modo de falla está en función de la resistencia al esfuerzo cortante remoldeada y/o residual (S_u), así como de la profundidad de enterrado inicial del ducto.

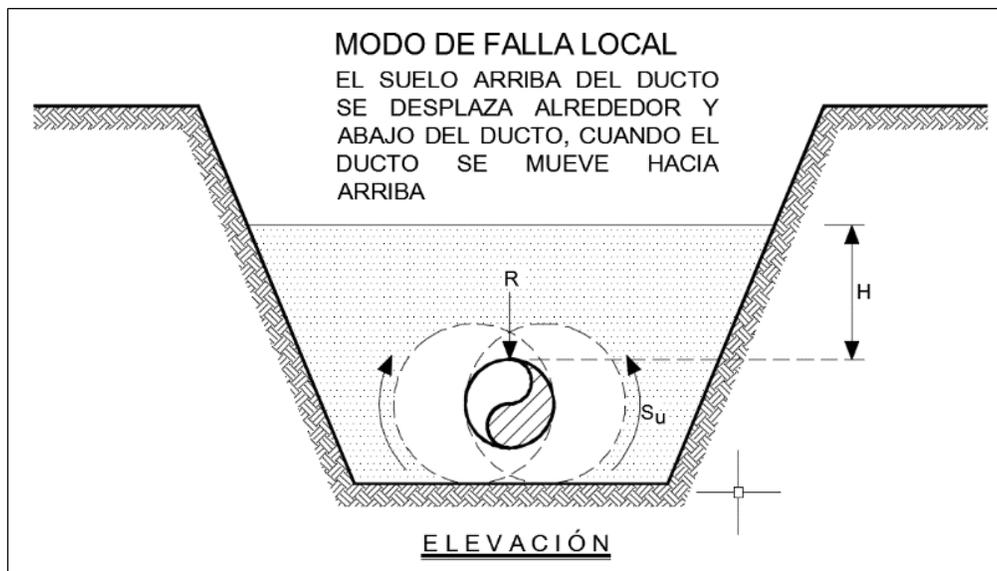


Figura 4.3. Modelo de falla local para la capacidad al levantamiento de un suelo cohesivo.

La resistencia al levantamiento para el modo de falla local está dada por la ecuación establecida en el apéndice B de la DNV-RP-F110:2007:

$$R = N_c n S_u D \quad (4.5)$$

Donde:

- R Resistencia al levantamiento del suelo por unidad de longitud de la tubería.
- N_c Coeficiente de capacidad de carga.
- N Factor empírico de pruebas de campo (0.55 – 0.809), se recomienda usar 0.60.
- S_u Resistencia al esfuerzo cortante al centro del ducto (kPa).
- D Diámetro exterior total del tubo incluyendo el lastre de concreto (m).



IV.2.2.4. Modo de falla global.

Modo en donde la cuña de falla del suelo se extiende hasta la superficie del lecho marino, y es donde el suelo que se encuentra depositado en la parte superior del ducto se levanta en forma conjunta con el ducto, lo que implica una combinación del peso del ducto y de la resistencia al esfuerzo cortante residual (S_u).

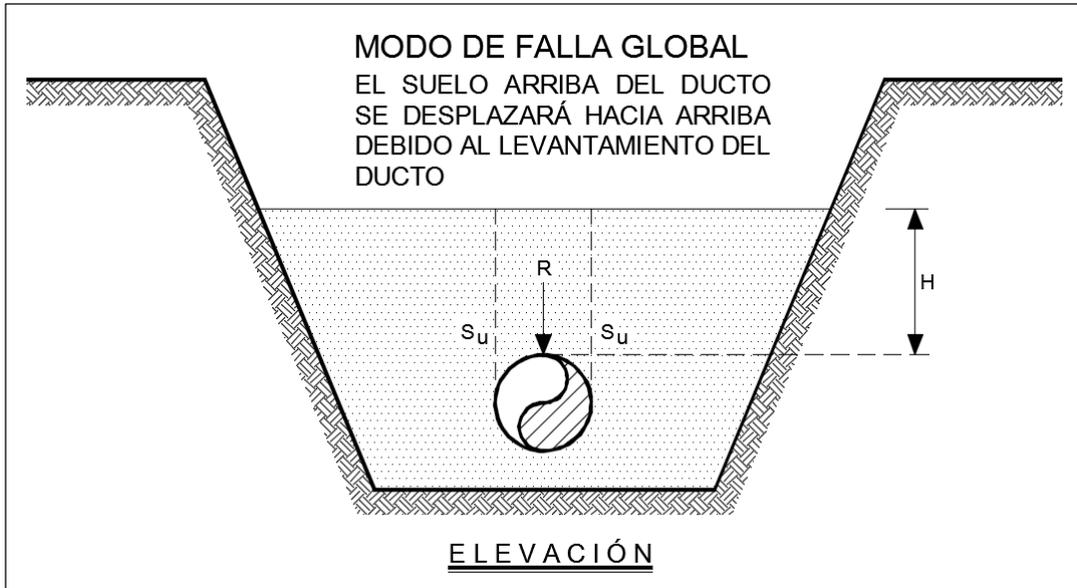


Figura 4.4. Modelo de falla global para la capacidad al levantamiento de un suelo cohesivo.

La resistencia al levantamiento de una falla de suelo global se debe calcular con la ecuación establecida en el apéndice B de la DNV-RP-F110:2007:

$$R = \gamma'HD + \gamma'D^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi}{8} \right) + 2 Su \left(H + \frac{D}{2} \right) = W_u \quad (4.6)$$

Donde:

- R Resistencia al levantamiento del suelo por unidad de longitud de la tubería.
- H Altura de cubierta de suelo cohesivo (profundidad al lomo superior del ducto).
- S_u Resistencia al corte del suelo.
- D Diámetro exterior total de la tubería incluyendo el lastre de concreto.
- D_o Diámetro exterior de la tubería.



IV.2.3. Contribución del peso sumergido de la tubería en la resistencia al levantamiento.

La contribución de la tubería a la resistencia al levantamiento es el peso sumergido de la tubería por unidad de longitud, el cual se determina mediante la diferencia del peso de la tubería considerando la sección transversal de acero, el lastre de concreto y su contenido, respecto del peso del volumen de agua de mar desalojada. En el caso de la instalación, la tubería se considera vacía.

$$W_S = W_T - W_w \quad (4.7)$$

El peso por unidad de longitud de la tubería vacía se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$W_T = \pi t(D_o - t)\gamma_{acero} + \pi t_{lastre}(D_o + t_{lastre})\gamma_{lastre} \quad (4.8)$$

El peso por unidad de longitud de la tubería llena se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$W_T = \pi t(D_o - t)\gamma_{acero} + \pi t_{lastre}(D_o + t_{lastre})\gamma_{lastre} + \frac{\pi}{4}(D_o - 2t)^2\gamma_{fluido} \quad (4.9)$$

Donde:

- W_S Peso sumergido de la tubería por unidad de longitud.
- W_T Peso de la tubería en el aire por unidad de longitud.
- W_w Peso del volumen de agua de mar desalojada por unidad de longitud.
- D_o Diámetro exterior de la tubería.
- t Espesor de pared de la tubería.
- t_{lastre} Espesor de lastre de concreto.
- γ_{acero} Peso volumétrico del acero de la tubería.
- γ_{lastre} Peso volumétrico del concreto para el lastre.
- γ_{fluido} Peso específico del contenido.

El peso del agua de mar desalojada por unidad de longitud se obtiene mediante:



$$W_w = \frac{\pi}{4} (D_o + 2t_{lastre})^2 \gamma_w \quad (4.10)$$

Donde:

- W_w Peso del agua de mar desalojada por unidad de longitud.
 D_o Diámetro exterior de la tubería.
 t_{lastre} Espesor de lastre de concreto.
 γ_w Peso específico del agua de mar.

IV.3. Descarga o resistencia al levantamiento requerida en ducto marino enterrado.

La descarga o resistencia al levantamiento requerida (cubierta de suelo) para una configuración del perfil o imperfección definida se calcula mediante el método simplificado de análisis de Palmer (1990).

El método de Palmer parte del planteamiento de la idealización como viga elástica de una tubería inicialmente recta con rigidez a la flexión EI , apoyada en una imperfección del lecho marino, sujeta a una carga axial de compresión N , cuyo estado de equilibrio como viga pandeada sometida a una carga lateral uniforme W igual a la resistencia de descarga, ver figura 4.5, (peso de la tubería + contención del suelo), es derivado de la teoría elemental de vigas-columnas y está dado por la ecuación:

$$-EI \frac{d^4 y}{dx^4} - N \frac{d^2 y}{dx^2} = W(x) \quad (4.11)$$

Donde:

- EI Rigidez a la flexión de la tubería.
 N Fuerza axial de compresión de la tubería.
 W Fuerza de descarga por unidad de longitud, necesaria para mantener el equilibrio en la posición deformada (peso propio del ducto + resistencia del suelo sobre la línea).
 $y(x)$ Configuración vertical de la tubería.

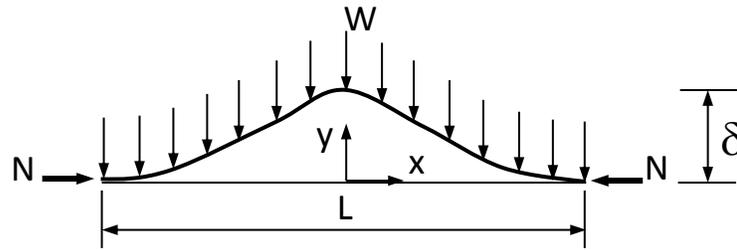


Figura 4.5. Modelo de Viga-Columna utilizado para el análisis del pandeo de un ducto.

Considerando un perfil senoidal para la imperfección de altura δ y longitud L definido mediante la ecuación:

$$y = \delta \cos^2 \frac{\pi x}{L} \quad \text{en } -\frac{L}{2} < x < \frac{L}{2} \quad (4.12)$$

De manera que la fuerza vertical (descarga) requerida para mantener dicho perfil es:

$$w(x) = \left[-8\delta EI \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 + 2\delta N \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \right] \cos \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \quad (4.13)$$

La cual presenta un valor numérico máximo de la carga por unidad de longitud para mantener la tubería estable, en la cresta de la imperfección igual a:

$$w = 2\delta N \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 - 8\delta EI \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \quad (4.14)$$

La ecuación anterior aplica a un perfil con forma específica, puesto que esta forma específica solo afecta los coeficientes y no la forma general de la ecuación, esta puede reescribirse como:

$$\Phi_w = \frac{2\pi^2}{\Phi_L^2} - \frac{8\pi^4}{\Phi_L^4} \quad (4.15)$$

La cual representa una relación entre los parámetros adimensionales de descarga máxima ϕ_w y de longitud de la imperfección ϕ_L , los cuales están dados por las ecuaciones 4.16 y 4.17.



$$\phi_W = \frac{WEI}{\delta N^2} \quad (4.16)$$

$$\phi_L = L \sqrt{\frac{N}{EI}} \quad (4.17)$$

A partir de dicho modelo y simulaciones numéricas, Palmer determinó una curva universal para diseño, ver figura 4.6, la cual permite determinar la descarga o resistencia al levantamiento para mantener la tubería estable, a partir de las relaciones entre los parámetros ϕ_L y ϕ_W siguientes:

$$\Phi_W = 0.0646 \quad \text{para } \phi_L < 4.49 \quad (4.18)$$

$$\Phi_W = \frac{5.68}{\phi_L^2} - \frac{88.35}{\phi_L^4} \quad \text{para } 4.49 < \phi_L < 8.06 \quad (4.19)$$

$$\Phi_W = \frac{9.6}{\phi_L^2} - \frac{343}{\phi_L^4} \quad \text{para } 8.06 < \phi_L \quad (4.20)$$

Por lo que a partir del criterio de proveer una descarga mínima de manera que:

$$\phi_W^{\min} \geq \phi_W \quad (4.21)$$

Y puesto que la fuerza de descarga por unidad de longitud, necesaria para mantener el equilibrio está compuesta por el peso propio del ducto W_s y la resistencia del suelo sobre el ducto W_u , entonces:

$$W_u = \frac{\Phi_w \delta N^2}{EI} - W_s \quad (4.22)$$

Donde:

W_u Resistencia requerida del suelo sobre el ducto.

Φ_w Parámetro adimensional de descarga obtenido de la curva universal de diseño.



- N Fuerza axial de compresión de la tubería.
- δ Altura de la imperfección.
- EI Rigidez a la flexión de la tubería.
- W_s Peso sumergido de la tubería en su condición de instalación.
- E Módulo de Elasticidad del acero de la tubería.
- I Momento de inercia de la sección transversal de la tubería $= \frac{\pi}{64} [D_o^4 - (D_o - 2t)^4]$

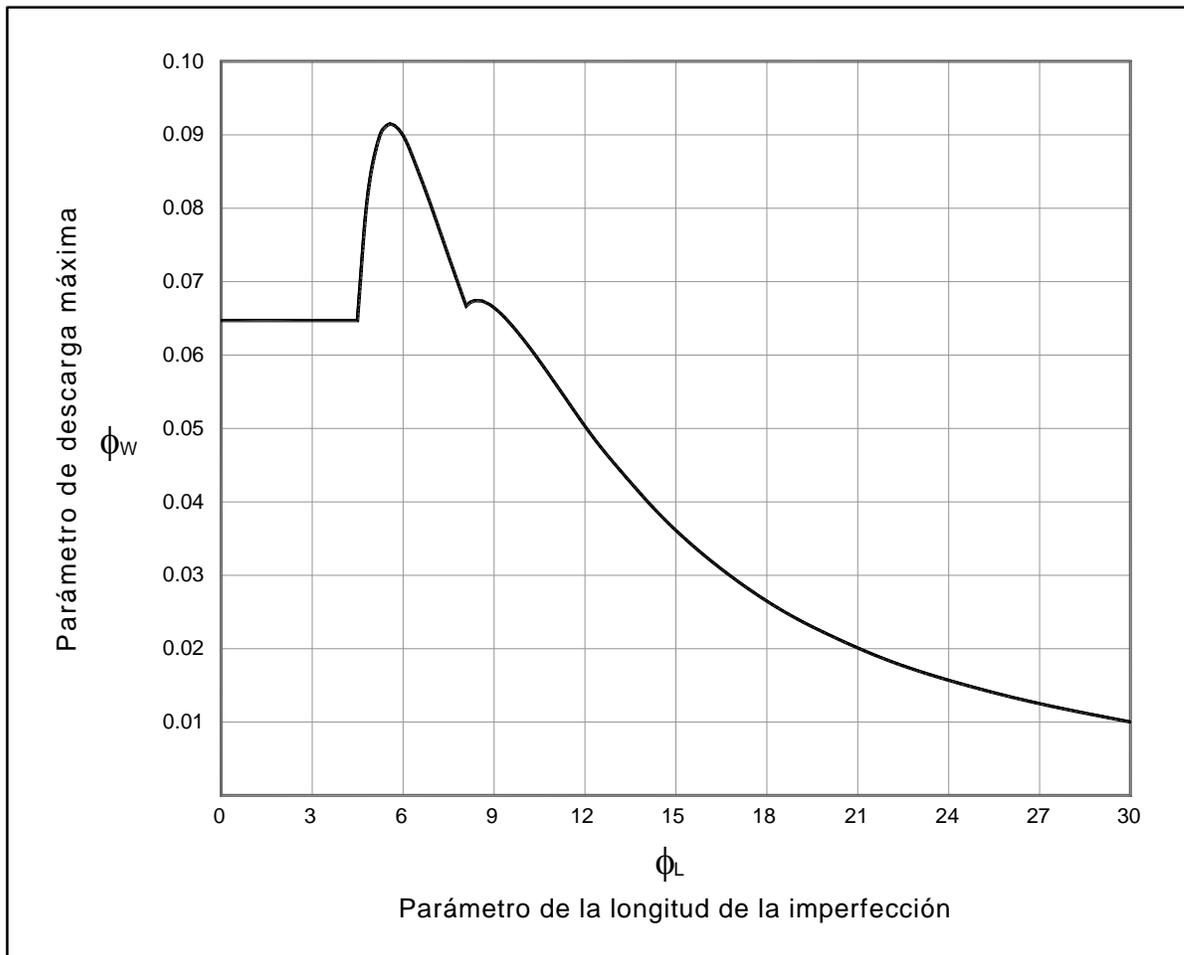


Figura 4.6. Curva de diseño para resistencia al levantamiento requerida.

En un contexto de diseño preliminar el tamaño de la imperfección se define estableciendo la altura δ de la misma. La longitud de la imperfección se puede estimar suponiendo que la línea toma una forma dada considerando la relación entre su rigidez a la flexión y su peso sumergido.



La longitud de la imperfección (L), en función de la altura de la imperfección (δ), de la rigidez a la flexión (EI) y del peso sumergido de la tubería en su condición de instalación (W_s), está dada por:

$$L = \sqrt[4]{\frac{72EI\delta}{W_s}} \quad (4.23)$$

IV.4. Altura de cubierta de suelo requerida para evitar que se accione el pandeo vertical por levantamiento.

Una vez determinada la resistencia requerida del suelo sobre el ducto (W_u) con la expresión 4.22, podemos calcular la altura de cubierta de suelo sobre el ducto necesaria para evitar se presente el fenómeno de pandeo vertical, para ello es necesario despejar H de las ecuaciones 4.4 y 4.6 según sea el caso (cubierta con suelo cohesivo o friccionante), quedando de la siguiente manera.

Suelo friccionante (no cohesivo):

$$H = \frac{-(\gamma'D + f\gamma'D) + \sqrt{(\gamma'D + f\gamma'D)^2 - 4f\gamma' \left[\gamma'D^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi}{8} \right) + f\gamma' \frac{D^2}{4} - W_u \right]}}{2f\gamma'} \quad (4.24)$$

Suelo cohesivo-falla global:

$$H = \frac{W_u - \gamma'D^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi}{8} \right) - S_u D}{\gamma'D + 2S_u} \quad (4.25)$$

En la figura 4.7 se muestra el proceso del análisis de pandeo vertical por levantamiento, utilizando como medida de mitigación la colocación de peso adicional sobre el ducto mediante la colocación de una de cubierta de suelo.

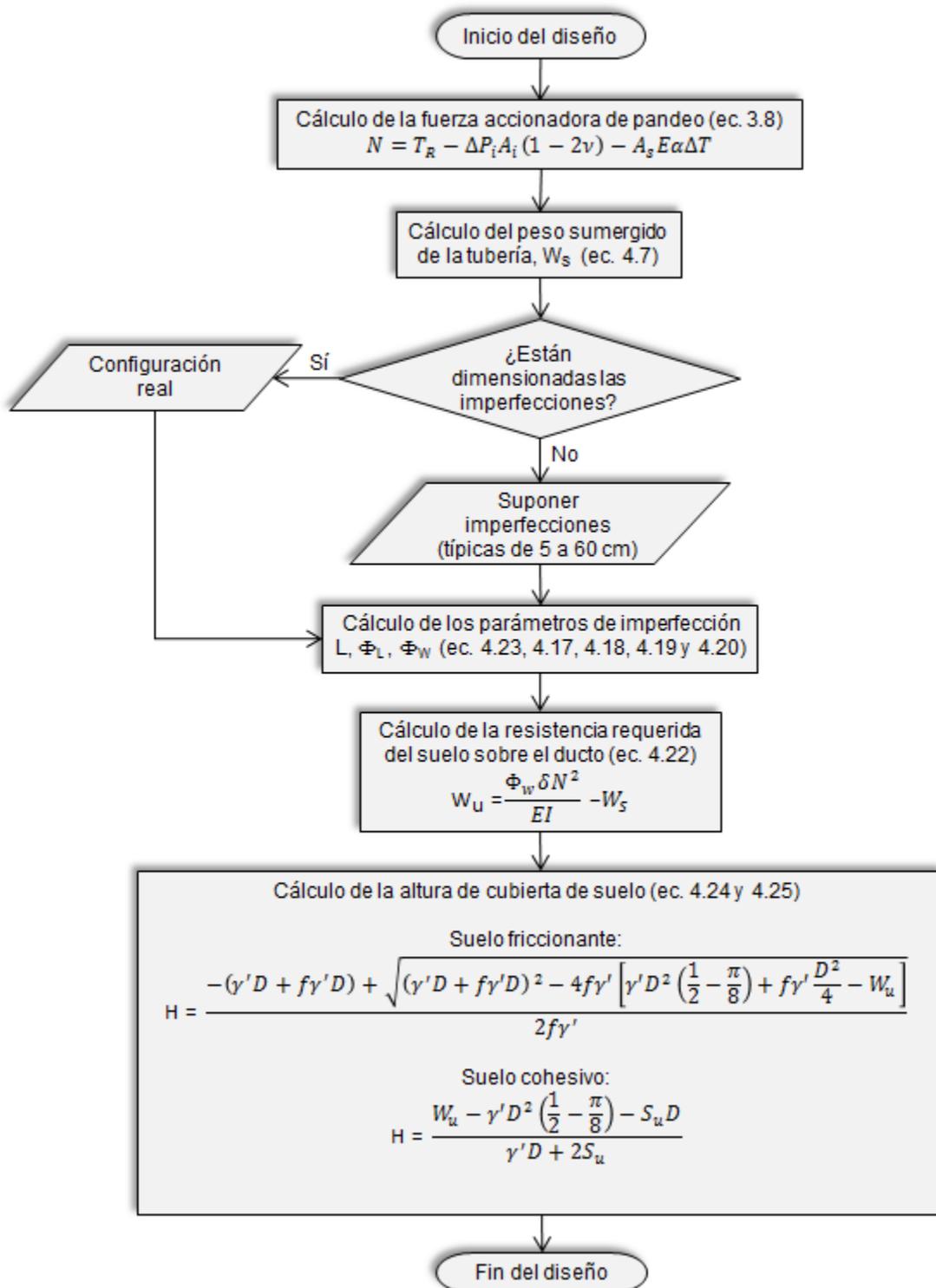


Figura 4.7. Diagrama de flujo del proceso de cálculo de la cubierta de suelo.



Capítulo V. CASO DE ESTUDIO.

Para este caso de estudio se evaluaron los requerimientos de resistencia para minimizar su tendencia a sufrir pandeo vertical debido a las condiciones de alta presión y alta temperatura, de un Oleogasoducto de 24" x 8.8 km que va de plataforma a la plataforma, por medio de una medida de mitigación consistente en la colocación de una cubierta de suelo.

Esta evaluación se realizó siguiendo la metodología descrita por Palmer y utilizando los lineamientos de la DNV-RP-F110 acerca del modelo para calcular la resistencia al levantamiento debido a la cubierta de suelo sobre el ducto marino.

V.1. Datos.

V.1.1. Características de la tubería.

Los parámetros de la tubería utilizados para los respectivos cálculos de pandeo por levantamiento se indican en la tabla V.1.

Diámetro nominal	24 pulg.
Diámetro exterior (D_o)	609.6 mm
SMYS	448.16 N/mm ²
Espesor (t)	20.6 mm
Peso volumétrico del acero (γ_{acero})	76,982.20 N/m ³
Módulo de elasticidad (E)	200,000 N/mm ²
Espesor de lastre de concreto (t_{lastre})	101.6 mm
Peso volumétrico del lastre de concreto (γ_{lastre})	29,846.61 N/m ³
Relación de Poisson (ν)	0.3
Coeficiente de expansión térmica (α)	1.17E-05 1/°C

Tabla V.1. Características de la tubería.

V.1.2. Presión y temperatura.

Los valores de presión y temperatura a los que se someterá el ducto durante operación, y que se utilizaron en los respectivos cálculos de pandeo por levantamiento se indican en la tabla V.2.



Presión interna (P_i)	12.94 N/mm ²
Temperatura de operación	140 °C
Temperatura de instalación	15 °C
Longitud total del ducto	8,800 m
Peso específico del fluido (γ_{fluido})	1,343.10 N/m ³
Peso específico del agua de mar (γ_w)	10,051.82 N/m ³

Tabla V.2. Parámetros del ducto marino.

V.1.3. Datos del suelo.

Los análisis realizados consideran la colocación de una cubierta de suelo sobre la tubería con la finalidad de evitar el pandeo por levantamiento, para tal fin se tomaron en cuenta dos tipos de material que podrían utilizarse:

- Suelo cohesivo producto del mismo material que se genera al realizar la zanja donde se colocará el ducto.
- Material no-cohesivo (roca).

Las propiedades del suelo empleado en el análisis se indican en la tabla V.3.

Tipo de Suelo	Resistencia al esfuerzo cortante (S_u)	Peso volumétrico sumergido (γ')	Factor de remoldeo
Cohesivo	2.90 kPa	4.86 kN/m ³	0.50
No cohesivo (roca)	--	8.58 kN/m ³	--

Tabla V.3. Propiedades del suelo de relleno.

Para el suelo cohesivo se consideró un valor de resistencia al esfuerzo cortante propio de las arcillas de la sonda de Campeche. Tratándose del material friccionante (roca), se consideró un valor del peso sumergido propio de un material rocoso comúnmente utilizado en la sonda de Campeche. Estos parámetros se emplean en el cálculo de la resistencia vertical del suelo (R).



V.2. Desarrollo.

Para fines del análisis se consideró un rango de imperfecciones individuales de 0.05 m a 0.60 m, las cuales son imperfecciones típicas encontradas en el suelo marino una vez que el ducto se haya tendido en la zanja. En el presente estudio se determinaron las alturas de cubierta de suelo requeridas para proporcionar la resistencia de descarga suficiente, esto para cada tipo de imperfección y bajo condiciones de operación del ducto. Los cálculos se realizaron utilizando un suelo cohesivo y uno friccionante como materiales de relleno.

V.2.1. Cálculo de la fuerza efectiva accionadora de pandeo.

De la ecuación 3.8 tenemos:

$$N = T_R - \Delta P_i A_i (1 - 2\nu) - A_s E \alpha \Delta T \quad (3.8)$$

Donde:

$$T_R = 0$$

$$\Delta P_i = 12.94 \text{ N/mm}^2$$

$$A_i = 253,701 \text{ mm}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$A_s = 38,162 \text{ mm}^2$$

$$E = 200,000 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 1.17\text{E-}05 \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 125^\circ\text{C}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$N = -12,476.17 \text{ kN}$$

Adicionalmente se debe aplicar un factor de carga a la fuerza efectiva accionadora de pandeo, que toma en cuenta el nivel de riesgo aceptable en el diseño. Para el presente caso de estudio se tomó el factor de carga para un nivel medio indicado en la DNV-RP-F110, el factor de carga considerado fue de 1.15 para una clase normal.

$$N = -14,347.59 \text{ kN}$$



V.2.2. Cálculo del peso sumergido de la tubería.

El peso sumergido de la tubería se calcula con la expresión 4.7.

$$W_S = W_T - W_w \quad (4.7)$$

Para el caso de la tubería vacía (fase de instalación) el peso total W_T se calcula con:

$$W_T = \pi t(D_o - t)\gamma_{acero} + \pi t_{lastre}(D_o + t_{lastre})\gamma_{lastre} \quad (4.8)$$

Para el caso de la tubería llena (fase de operación) el peso total W_T se calcula con:

$$W_T = \pi t(D_o - t)\gamma_{acero} + \pi t_{lastre}(D_o + t_{lastre})\gamma_{lastre} + \frac{\pi}{4}(D_o - 2t)^2\gamma_{fluido} \quad (4.9)$$

El peso del agua de mar desalojada por unidad de longitud se obtiene mediante:

$$W_w = \frac{\pi}{4}(D_o + 2t_{lastre})^2\gamma_w \quad (4.10)$$

Donde:

$$\begin{aligned} D_o &= 0.610 \text{ m} \\ t &= 0.0206 \text{ m} \\ t_{lastre} &= 0.1016 \text{ m} \\ \gamma_{acero} &= 76,982.20 \text{ N/m}^3 \\ \gamma_{lastre} &= 29,846.61 \text{ N/m}^3 \\ \gamma_{fluido} &= 1,343.10 \text{ N/m}^3 \\ \gamma_w &= 10,051.82 \text{ N/m}^3 \end{aligned}$$

Sustituyendo valores tenemos que para tubería llena el valor del peso sumergido W_S es:

$$\begin{aligned} W_T &= 10.054 \text{ kN/m} \\ W_w &= 5.216 \text{ kN/m} \\ \mathbf{W_S} &= \mathbf{4.838 \text{ kN/m}} \end{aligned}$$



Sustituyendo valores tenemos que para tubería vacía el valor del peso sumergido W_s es:

$$W_T = 9.713 \text{ kN/m}$$

$$W_W = 5.216 \text{ kN/m}$$

$$\mathbf{W_S = 4.498 \text{ kN/m}}$$

V.2.3. Cálculo de la resistencia axial del suelo y de la longitud de anclaje natural.

Con la expresión 3.9 podemos calcular la resistencia axial del suelo.

$$P_u = \alpha S_u \pi D \quad (3.9)$$

Donde:

$$D = 0.813 \text{ m}$$

$$\alpha = 1$$

$$S_u = 1.45 \text{ kPa}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$\mathbf{P_u = 3.703 \text{ kN/m}}$$

La Longitud de anclaje natural se calcula con la expresión 3.11:

$$LAN = \frac{N}{P_u} \quad (3.11)$$

Donde:

$$N = 14,347.59 \text{ kN}$$

$$P_u = 3.703 \text{ kN/m}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$\mathbf{LAN = 3,875 \text{ m}}$$



V.2.4. Cálculo de los parámetros de la imperfección.

Para el cálculo de los parámetros de la imperfección se consideraron alturas de imperfección de 0.05 m a 0.60 m, las cuales son imperfecciones típicas encontradas en el suelo marino una vez que el ducto se haya tendido en la zanja.

Los cálculos se realizaron apoyándose de una hoja de cálculo de Excel por lo cual los resultados de cada uno de los parámetros de imperfección se muestran al final de este punto.

V.2.4.1. Longitud de la imperfección.

La longitud de la imperfección se calcula con la expresión 4.23.

$$L = \sqrt[4]{\frac{72EI\delta}{W_s}} \quad (4.23)$$

Donde:

$$\delta = \text{desde } 0.05 \text{ m hasta } 0.60 \text{ m}$$

$$E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$I = 1.65681 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$EI = 3.31362 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^2$$

$$W_s = 4.498 \text{ kN/m}$$

V.2.4.2. Parametro de longitud de la imperfección (ϕ_L).

El parámetro adimensional de la longitud de imperfección se calcula con la expresión 4.17.

$$\phi_L = L \sqrt{\frac{N}{EI}} \quad (4.17)$$

Donde:

$$L = \text{Valor obtenido del punto anterior para alturas de imperfección de } 0.05 \text{ a } 0.60 \text{ m}$$

$$N = 14,347.59 \text{ kN}$$

$$EI = 3.31362 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^2$$



V.2.4.3. Parametro de descarga máxima (ϕ_W).

El parámetro de descarga mínima se calcula con las expresiones 4.18, 4.19 y 4.20.

$$\Phi_W = 0.0646 \quad \text{para } \phi_L < 4.49 \quad (4.18)$$

$$\Phi_W = \frac{5.68}{\phi_L^2} - \frac{88.35}{\phi_L^4} \quad \text{para } 4.49 < \phi_L < 8.06 \quad (4.19)$$

$$\Phi_W = \frac{9.6}{\phi_L^2} - \frac{343}{\phi_L^4} \quad \text{para } 8.06 < \phi_L \quad (4.20)$$

V.2.4.4. Resistencia requerida del suelo sobre el ducto (W_u).

Una vez obtenidos los parámetros de imperfección podemos calcular la resistencia requerida, la cual se calcula con la expresión 4.22.

$$W_u = \frac{\Phi_w \delta N^2}{EI} - W_S \quad (4.22)$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos para alturas de imperfección de 0.05 a 0.60 m.

δ (m)	L (m)	ϕ_L	$\phi_{W \min}$	W_u (kN/m)
0.05	22.69	4.7222	0.0770	0.000
0.10	26.99	5.6157	0.0913	0.832
0.15	29.87	6.2148	0.0878	3.347
0.20	32.09	6.6782	0.0829	5.467
0.25	33.94	7.0613	0.0784	7.334
0.30	35.52	7.3906	0.0744	9.023
0.35	36.91	7.6810	0.0709	10.576
0.40	38.17	7.9418	0.0678	12.021
0.45	39.31	8.1791	0.0669	13.853
0.50	40.36	8.3974	0.0672	16.023
0.55	41.33	8.5999	0.0671	18.087
0.60	42.24	8.7890	0.0668	20.059

Tabla V.4. Parámetros de imperfección y resistencia requerida del suelo.



De los resultados anteriores puede observarse que para una altura de imperfección de 0.05 m, el peso sumergido de la tubería (W_s) tiene la suficiente resistencia al levantamiento para evitar que la tubería se mueva verticalmente hacia la superficie del lecho marino. Sin embargo, para alturas de imperfección de 0.10 a 0.60 se requiere de una cubierta de suelo sobre la tubería para evitar el inicio del pandeo vertical por levantamiento.

El siguiente paso una vez calculada la resistencia requerida del suelo sobre el ducto (W_u) es definir la altura de cubierta de suelo necesaria que proporcione dicha resistencia y así minimizar la posibilidad de ocurrencia del pandeo vertical por levantamiento.

V.2.5. Cálculo de la altura de cubierta de suelo requerida.

La cubierta de suelo sobre el ducto requerida para evitar el fenómeno de pandeo vertical por levantamiento se calcula con las expresiones 4.24 y 4.25.

Cubierta con suelo friccionante:

$$H = \frac{-(\gamma' D + f\gamma' D) + \sqrt{(\gamma' D + f\gamma' D)^2 - 4f\gamma' \left[\gamma' D^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi}{8} \right) + f\gamma' \frac{D^2}{4} - W_u \right]}}{2f\gamma'} \quad (4.24)$$

Donde:

$$\gamma' = 8.58 \text{ kN/m}^3$$

$$D = 0.813 \text{ m}$$

$$f = 0.60$$

$$W_u \quad \text{Valor obtenido del punto anterior para alturas de imperfección de 0.05 a 0.60 m}$$

Cubierta con suelo cohesivo:

$$H = \frac{W_u - \gamma' D^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi}{8} \right) - S_u D}{\gamma' D + 2S_u} \quad (4.25)$$

Donde:

$$\gamma' = 4.86 \text{ kN/m}^3$$



$$D = 0.813 \text{ m}$$

$$S_u = 1.45 \text{ kPa}$$

W_u Valor obtenido del punto anterior para alturas de imperfección de 0.05 a 0.60 m

Utilizando los resultados obtenidos de la resistencia requerida del suelo (W_u) del punto anterior y sustituyendo los parámetros del suelo y de la tubería tenemos:

δ (m)	W_u (kN/m)	Cohesivo H (m)	Friccionante H (m)
0.05	0.000	0.00	0.00
0.10	0.832	0.00	0.00
0.15	3.347	0.07	0.16
0.20	5.467	0.28	0.31
0.25	7.334	0.47	0.44
0.30	9.023	0.65	0.54
0.35	10.576	0.81	0.63
0.40	12.021	0.96	0.71
0.45	13.853	1.14	0.81
0.50	16.023	1.37	0.92
0.55	18.087	1.58	1.01
0.60	20.059	1.78	1.10

Tabla V.5. Altura de cubierta de suelo requerida.

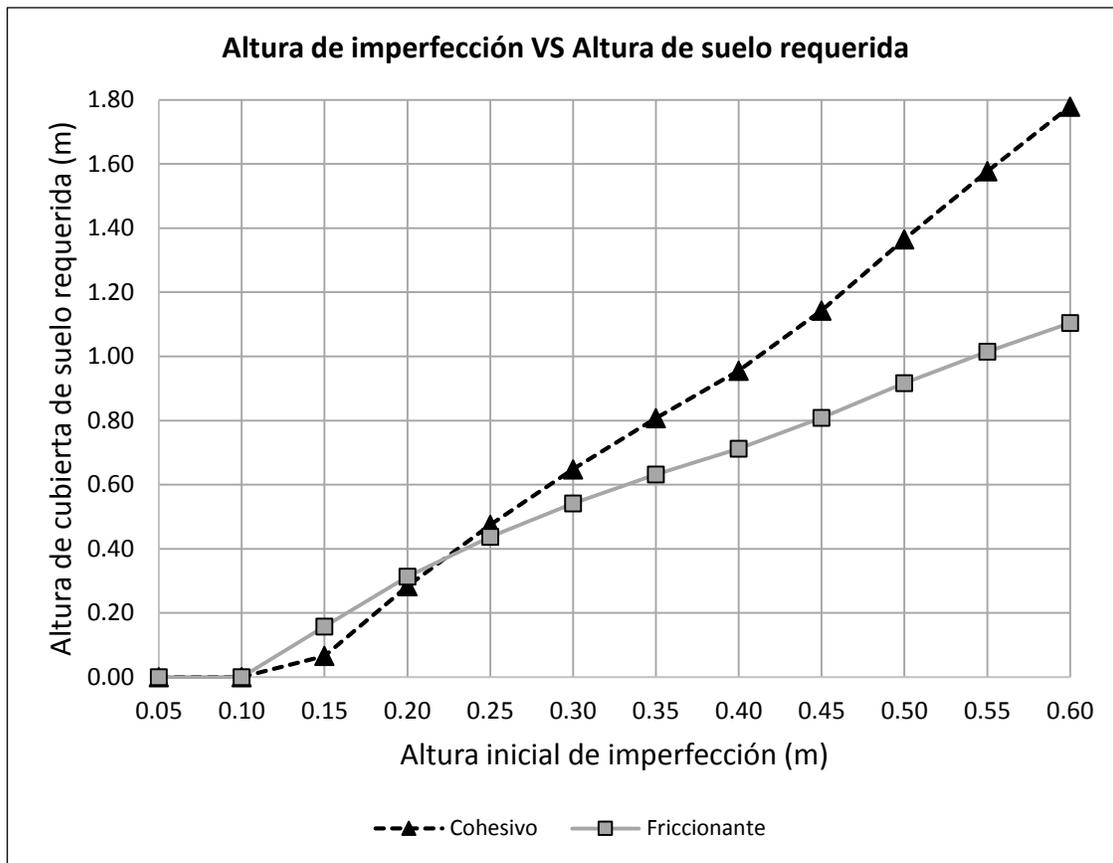


Figura 5.1. Alturas de cubiertas de suelo requeridas para imperfecciones de hasta 0.60 m.

CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo un procedimiento de análisis de pandeo vertical por levantamiento, utilizando una metodología semiempírica donde se establece una imperfección en el perfil de la zanja, que ocasiona la curvatura inicial de la tubería. De los resultados del análisis se emiten las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó para el presente caso práctico.

PRIMERA. Se cumplió con el objetivo de este trabajo debido a que los resultados obtenidos son satisfactorios para la medida de mitigación utilizada, la cual consistió en obtener la altura de cubierta de suelo necesaria para evitar se presente el fenómeno de pandeo vertical por levantamiento.

SEGUNDA. Para el Oleogasoducto de 24" x 8.8 km, se concluye que no tendría problemas por pandeo vertical por levantamiento si las imperfecciones presentes en el perfil fueran de hasta 0.10 m.

TERCERA. El requerimiento de cubierta de suelo cohesivo correspondiente al material modificado por el proceso de zanjado colocado sobre el ducto es de 1.78 m para una imperfección de 0.60 m.

CUARTA. Con una cubierta de suelo cohesivo de 1.00 m, el oleogasoducto no tendría problemas por pandeo vertical por levantamiento si las imperfecciones presentes en el perfil fueran de hasta aproximadamente 0.40 m.

QUINTA. El requerimiento de cubierta de suelo no cohesivo (roca) colocado sobre el ducto, es de 1.10 m para una imperfección 0.60 m.

SEXTA. Si se utilizará un material no cohesivo (roca), la cubierta requerida se reduce en aproximadamente un 38%, para una imperfección de 0.60 m.

SÉPTIMA. Dos parámetros importantes que contribuyen para minimizar la susceptibilidad de ocurrencia del fenómeno de pandeo vertical por levantamiento en el ducto son:

- Espesor de pared de la tubería (20.6 mm).
- Espesor del lastre de concreto (101.6 mm).

Con los cuales se obtiene un peso sumergido de la tubería alto ($W_s = 4.498 \text{ kN/m}$).

OCTAVA. Debido a la falta de información geotécnica uno de los parámetros más difícil de obtener es la resistencia al esfuerzo cortante (S_u). La DNV-RP-F110 recomienda algunos valores que se pueden utilizar, sin embargo, los resultados de los análisis podrían diferir de los que se obtendrían con valores reales encontrados en el sitio de localización del ducto marino.

NOVENA. El método utilizado en el presente estudio es simplificado y solo aplica para ductos marinos enterrados totalmente restringidos, por lo que se recomienda realizar un análisis utilizando un modelo de elemento finito para revisar los esfuerzos que se generan con la configuración del ducto marino asentado sobre una imperfección.

DÉCIMA. En el diseño de un ducto marino con condiciones de AP/AT y para no comprometer su integridad es de suma importancia considerar una medida de mitigación, de no hacerlo podrían generarse daños con implicaciones ambientales, económicas y sociales.

DÉCIMO PRIMERA. Cualquiera que sea la opción de mitigación usada, es muy útil la inspección posterior para evaluar el desempeño de la misma, así como para identificar y revisar eventos no planeados.

BIBLIOGRAFÍA

Batelle, Design Analysis Guidelines for Offshore Pipeline Riser, volumen 1, 1983

Bransby M.F., Newson T.A. “Centrifuge Modelling of the Upheavel Capacity of Pipelines in Liquefied Clay”, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2002

Bransby M.F., Newson T.A. “The Upheavel Capacity of Pipelines in Jetted Clay Backfill”, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 12, No. 4, 2002

DNV-OS-F101:2013 offshore standard “Submarine Pipeline Systems”.

DNV-RP-F110:2007 recommended practice “Global Buckling of Submarine Pipelines – Structural Design due to High Temperature/High Pressure”.

Hobss R.E. “In-Service Buckling in Heated Pipelines”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 110, No. 2 Paper No. 18691.

Jukes Paul, Wang James, Duron Billy, Kenny J.P. “Solving Pipeline Technology Challenges in the GoM by Innovation, Advanced Analysis Tools, and Engineering Competency”, Offshore Technology Conference OTC 19504 (2008).

Lim Kok Kien, Lau Siew Ming, Emil Maschner. “Design of High Temperature / High Pressure (HT/HP) Pipeline Against lateral Buckling, Asian Pipeline Conference and Exhibition”, 2005

Mandeville R.J.R., Eng P., Turping L. and Searle S. “Flexible Pipe Design for a High Temperature / Highly Insulated Production Flowline for North Amethyst Project in the North Atlantic”, Offshore Technology Conference OTC 20518 (2010).

Nielsen, N-J.R., Lyngberg, B. and Pedersen, P.T. “Upheaval buckling failures of insulated flowlines: a case story”, Offshore Technology Conference OTC 6488 (1990).

NRF-013-PEMEX-2009. “Diseño de líneas submarinas en el Golfo de México”.

Palmer A.C., Ellinas C.P., Richards D.M. and Guijt J. “Design of Submarine Pipelines against Upheaval Buckling”, Offshore Technology Conference OTC 6335 (1990).

Schaminee P.E.L., Zorn N.F., Delth Geotechnics, Schotman G.J.M., Shell Research B.V. “Soil Response for Pipeline Upheaval Buckling Analysis: Full-Scale Laboratory Tests and Modelling”, Offshore Technology Conference OTC 6486 (1990).

Sun Jason, Jukes Paul, Shi Han “Thermal Expansion / Global Buckling Mitigation of HPHT Deepwater Pipelines, Sleeper or Buoyancy?”, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2012.

Thusyanthan N.I., Mesmar S., Robert D.J., Wang J. and Haigh S.K. “Upheaval Buckling Assessment Based on Pipelines Features”, Offshore Technology Conference OTC 21802 (2011).

Thusyanthan N.I., Ganesan S.A., Bolton M.D. “Upheaval Buckling Resistance of Pipeline buried in clayey backfill”, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2008.

Wang J., Haigh S.K., Thusyanthan N.I. “Uplift Resistance of Buried Pipelines in Blocky Clay Backfill” Department of Engineering, University of Cambridge, Paper No. 2009-TCP-564.