

4
2j



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES
"ARAGON"

ASPECTOS GENERALES DE LAS
TUBERIAS SUBMARINAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A N :

AMBROSIO ENRIQUE ALTAMIRANO SANCHEZ
ENRIQUE ALBERTO SANCHEZ HERNANDEZ



MÉXICO, D.F. 1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

*A la Universidad Nacional Autónoma de México
en especial a la Escuela Nacional de Estudios
Profesionales Aragón:*

*De quien recibí un cúmulo de conocimientos por
conducto de todos mis maestros, logrando de esta
manera, realizar una carrera profesional.*

Al Ing. Manuel Martínez Ortiz

Con todo respeto y admiración para mi asesor de tesis. Deseo dejar constancia de mi enorme agradecimiento, por su amistad, comprensión y apoyo y dirección, ya que estos elementos constituyeron la clave que me permitió concluir este trabajo de tesis.

***ASPECTOS GENERALES DE LAS TUBERIAS
SUBMARINAS***

OBJETIVO:

Presentar características básicas y generales para el diseño y construcción de tuberías submarinas. Así como requerimientos para su instalación.

CONTENIDO

CONTENIDO	3
INTRODUCCION	6
I. GENERALIDADES	8
1.1. Principios de Selección de Ruta.	8
1.1.1. Criterios para la Selección de la Ruta.	9
1.2. Restricciones impuestas por factores Oceanográficos, Geotécnicos, Batimétricos, de seguridad y políticos.	9
1.2.1. Inspección Geofísica, Geotécnica y Ambiental.	10
1.2.2. Información Oceanográfica.	11
1.2.3. Datos Geotécnicos.	11
1.2.4. Datos Batimétricos.	12
1.2.5. Factores de Seguridad.	14
1.2.6. Factores políticos.	14
1.3. MATERIALES	14
1.4. Soldadura	17
II. DISEÑO	21
II.1. Diseño por Resistencia.	22
II.1.1. Presión Interna.	22
II.1.2. Requerimientos del Códigos.	23
II.1.3. Pandeo Local.	28
II.1.4. Propagación del Pandeo.	33
II.1.5. Diseño por Deformación.	34
II.2. Diseño por Estabilidad.	35
II.2.1. Introducción.	35

II.2.1.1. Método tradicional.	35
II.2.1.2. Fuerzas Hidrodinámicas en Tuberías.	42
II.2.1.3. Diseño por estabilidad.	47
II.2.1.4. Casos de Cargas.	47
II.2.1.5. Métodos de análisis	49
II.2.1.6. Hundimiento y Flotación.	50
II.2.1.7. Criterios de Diseño.	50
II.2.1.6. Criterios de estabilidad hidrodinámica	54
II.2.1.7. Métodos para estabilizar tuberías.	55
II.2.2. Método Simplificado	58
II.2.2.1. Fuerzas Hidrodinámicas.	59
II.2.2.2. Fuerzas de interacción suelo/tubería	60

III. PANDEO Y RECUBRIMIENTOS DE LAS TUBERIAS SUBMARINAS 65

III.1. PANDEO POR SOBREVANTAMIENTO 66

III.1.1. Análisis del Sobrelevantamiento.	69
III.2.2. Análisis de Inspección.	75
III.2.3. El Efecto de contorno de imperfección en el Comportamiento del Pandeo por Sobrelevantamiento.	75
III.2.3.1. Fenómeno de Sobrelevantamiento.	76
III.2.3.2. Pre - sobrelevantamiento	77
III.2.3.3. Post-Sobrelevantamiento.	78
III.2.4. Formulaciones Simplificadas para el Diseño Final.	79

III.3. Recubrimientos externo para tuberías y para juntas de campo. 82

III.3.1. Material de Recubrimiento	82
III.3.2. Recubrimiento de las juntas de campo.	84

III.4. Protección Catódica 84

V. CONSTRUCCIÓN DE TUBERIAS SUBMARINAS 87

IV.1. Métodos de Construcción de Tubería Submarina. 87

IV.1.2. Método de la Barcaza-Carrete.	90
IV.1.3.1. Remolque de superficie y debajo de la superficie.	93

IV.1.3.2. Remolque cerca del fondo marino.	96
IV.1.3.3. Remolque sobre el fondo marino.	97
IV.2. Desarrollos Actuales.	99
IV.2. Atrincheramiento o Enterramiento.	104
IV.2.1. Factores que afectan el proceso de atrincheramiento.	107
IV.2.2. Método de Atrincheramiento.	109
IV.2.3. Factores que intervienen en el Atrincheramiento.	112
IV.3. Inspección.	113
IV.3.1. Aspectos Generales.	113
IV.3.2. Inspección con diablo inteligente.	115
IV.4. Nuevas Técnicas.	120
IV.5. Reparación de Tuberías Submarinas.	122
IV.5.1. Panorama General.	122
IV.5.2. Métodos de Reparación.	123
IV.5.2.1. Soldadura Superficial.	124
IV.5.2.2. Soldadura Hiperbárica.	125
IV.5.2.3. Conectores Mecánicos.	127
IV.6. Documentación para la certificación.	131
IV.6.1. Planos y Especificaciones.	135
CONCLUSIONES	138
BIBLIOGRAFIA.	140

INTRODUCCION

La constante demanda de petróleo y gas ha hecho que los proyectos Costafuera se incrementen substancialmente para encontrar y explotar hidrocarburos. Desde que las primeras tuberías submarinas fueron tendidas en el Golfo de México, cientos de miles de kilómetros de tuberías han sido construidos costafuera en muchas partes del mundo, incluyendo: el Mar del Norte, el Golfo de México, el Mar Mediterráneo, Australia, el Sureste de Asia y América Latina. Algunas tuberías han sido instaladas hasta en profundidades de 1000 m. lo que ocasionó que se requiera desarrollar técnicas especializadas para que los problemas de diseño fueran resueltos.

Una tubería instalada a cualquier profundidad Costafuera debe ser diseñada para garantizar su integridad durante la construcción y durante el tiempo de vida útil diseñado.

Durante la construcción, la tubería de marina esta expuesta a varios esfuerzos, por ejemplo: el esfuerzo de flexión cuando la tubería es bajada de la embarcación para ser tendida en el fondo marino, la tubería está expuesta a muchos riesgos potenciales de daños debidos a condiciones de oleaje y corriente en el área, inestabilidad del suelo submarino, anclas y otros problemas.

El objeto de esta Tesis es el de presentar lineamientos generales que incluyen una serie de factores que deben ser tomados en consideración para el diseño y construcción de tuberías submarinas.

Con esto se pretende proporcionar un panorama general de los principios de diseño de tuberías submarinas y los requerimientos para su instalación. El contenido de este trabajo incluye: Materiales, Soldaduras, Recubrimientos y Protección Catódica, Diseño y Construcción de tubería submarina, Técnicas de tendido de tubería submarina.

I. GENERALIDADES

OBJETIVO:

Dar algunas características generales con respecto a las condiciones de las tuberías y el medio que las afecta.

I. GENERALIDADES

1.1. Principios de Selección de Ruta.

Actualmente con el establecimiento de las condiciones de diseño, las evaluaciones iniciales de la ruta de la línea de la tubería son llevadas a cabo con mayores cuidados para una mejor selección de ésta.

La selección óptima de la ruta de la tubería depende en un gran número de parámetros, tales como:

- Batimetría
- Condiciones Hidrográficas
- Condiciones del suelo submarino
- Estructuras existentes
- Tráfico de embarcaciones
- Actividades de pesca
- Areas restringidas

También las evaluaciones de los métodos de instalación y de estabilidad hidrodinámica pueden formar parte del proceso de la selección de la ruta.

Encontrar el correcto balance entre todos estos parámetros y definir la mejor ruta entre todas las opciones posibles es una labor muy tediosa, que requiere datos, un juicio exacto de ingeniería y acceso a información especializada, como por ejemplo ambiental y geotécnica.

1.1.1. Criterios para la Selección de la Ruta.

El criterio básico para seleccionar la ruta por donde va a pasar la tubería, especialmente por fondos marinos con suelos inestables, incluye los siguientes puntos:

- Evitar, cuando sea posible, obstrucciones del suelo marino o posibles cruces de tuberías, las cuales pueden existir a lo largo de la ruta.
- Evitar que la línea de la tubería pase por áreas de anclaje.
- Minimizar la longitud de la tubería en suelos inestables y hacer que la mayor parte de la tubería pase por suelos estables.
- Evitar que la tubería pase por depresiones ya que esto ocasionaría que la tubería sufriera deformaciones.

1.2. Restricciones impuestas por factores Oceanográficos, Geotécnicos, Batimétricos, de seguridad y políticos.

Muchos riesgos con la alta probabilidad de dañar a la tubería submarina pueden existir a lo largo de la propuesta de la línea. Estos riesgos son debidos a causas naturales o a actividades humanas y pueden ser clasificados en las siguientes tres categorías:

- Riesgos que pueden ocurrir durante el periodo de construcción.
- Riesgos que pueden ocurrir después de que la tubería ha sido instalada en el fondo marino.
- Riesgos que pueden ocurrir durante el periodo de operación.

Los riesgos naturales son aquellos originados por el medio ambiente, como son: oleaje, corriente y sismo; los cuales pueden causar: inestabilidad de la tubería en el fondo marino. Los riesgos debidos a actividad humana incluyen: levantamiento de anclas, bajado de anclas, actividades de pesca, y objetos dejados en el fondo marino tales como embarcaciones hundidas o ruinas dejadas por embarcaciones de construcción.

Para identificar los riesgos que puedan existir a lo largo de la ruta propuesta de la línea, debe de contarse con información como es: corriente en la superficie, en la parte media del agua, y alturas de ola en el fondo, condiciones de suelo en el fondo marino, tendencias del movimiento del suelo, y otros datos.

I.2.1. Inspección Geofísica, Geotécnica y Ambiental.

El objetivo de una inspección marina tiene como propósito los siguiente:

- Establecer un conocimiento de las actividades geotécnicas generales en el área, incluyendo depósitos recientes.
- Identificar fallas, actividad volcánica, fugas de gas, tendencias de movimiento, depresiones y obstrucciones que podrían estar presentes a lo largo de la ruta propuesta de la línea.
- Evaluar la estabilidad de los sedimentos del área, incluyendo erosión y depósitos.

- Determinar la batimetría y la profundidad del agua a lo largo de la ruta propuesta.
- Determinar las facciones y estratigrafía de la ruta.
- Obtener datos en las condiciones ambientales en el área, incluyendo ola, velocidad de corrientes en la superficie, en el fondo, y velocidad de viento.

1.2.2. Información Oceanográfica.

Esta información reunirá los datos de viento, marca, oleaje y condiciones de corriente existentes a lo largo de la ruta de la línea, estos datos representarán las condiciones ambientales durante su vida de operación, y que durante el periodo de construcción deberán ser tomados en consideración.

Usualmente, las combinaciones más severas de altura de ola significativa y de corriente que ocurren una vez cada 100 años son usadas para definir las condiciones oceanográficas en la tubería durante su vida útil.

1.2.3. Datos Geotécnicos.

El propósito de obtener muestras de suelo es para identificar las características del mismo por donde se propone que la ruta de la tubería se pasará. Estas características son usadas en el diseño de la tubería submarina, que incluyen la determinación de la resistencia del suelo para el movimiento de la tubería, deterioro del suelo debido a las cargas cíclicas del oleaje, requerimientos del atrincherado, si la tubería va a ser enterrada, y la capacidad de los suelos.

Una investigación del sitio deberá ser realizada con intervalos adecuados a lo largo de la ruta de la tubería. El número de intervalos dependerá de la longitud de la línea de tubería y de las variaciones probables en las condiciones geotécnicas. Dicha investigación deberá ser llevada a cabo empleando técnicas adecuadas de pruebas.

Las propiedades del suelo necesarias para el diseño de la tubería incluyen lo siguiente:

- Clasificación general de suelos y las distribuciones del tamaño del grado de la muestra del suelo.
- Peso específico de los suelos.
- Contenido de humedad del suelo.
- Límites de consistencia.
- Resistencia al corte.
- Densidad del suelo (solo para suelos arenosos)
- Posibilidad de deslizamiento de los suelos.
- Permeabilidad

I.2.4. Datos Batimétricos.

Se deberá desarrollar un examen detallado de la ruta para proveer información adecuada y lo más exacta posible de las condiciones batimétricas a lo largo de la línea de la tubería submarina.

La información deberá incluir:

- Obstrucciones en la línea, tales como formaciones rocosas o ruinas de embarcaciones.

- Facciones topográficas tales como pendientes, cavidades u otros elementos que puedan causar inestabilidad en la tubería.
- Variación de la profundidad del agua a lo largo de la longitud de la tubería.

El obtener una batimetría lo más acercado a la realidad posible nos servirá para tener un mejor panorama del fondo marino, y esto a la vez, nos ayudará a proponer una ruta lo más óptima posible, es decir, sin tantos cambios de dirección, tanto verticales como horizontales, los cuales producirán más esfuerzos en las tuberías. Un método para conocer la batimetría de una zona determinada es el de sondeadores de eco.

Los sondeadores de eco son usados para medir la profundidad del fondo marino (profundidad del agua). Bastantes de estos tipos de instrumentos están disponibles en el mercado. Algunos son de alta precisión para incrementar la exactitud de las mediciones de profundidades. El principio de estos instrumentos consiste en transmitir, a alta-frecuencia controlada, señales acústicas de un transmisor sumergido al fondo marino. Como la señal es reflejada en el fondo marino y recibido por el receptor, la diferencia de tiempo entre la transmisión inicial y el período de recibido es medido.

Después de que las correcciones y las calibraciones han sido realizadas para calcular la velocidad de la señal acústica en el agua, profundidad del transmisor (receptor), y otras condiciones, la diferencia del tiempo puede ser calibrada para encontrar la profundidad del agua en una

estación en particular. Este y otros instrumentos nos pueden ayudar para conocer la batimetría de una área requerida.

1.2.5. Factores de Seguridad.

Por lo que se refiere a los factores de seguridad, la tubería debe cumplir con los códigos establecidos reconocidos por las dependencias correspondientes para que la tubería no sufra daños, los cuales podrían ocasionar costosas pérdidas y daños al medio ambiente. Es por esto que seleccionar una buena ruta nos reedituará en una tubería baja en costos y con un alto grado de seguridad.

1.2.6. Factores políticos.

Después de que las investigaciones preliminares para definir las áreas potenciales de reservas de hidrocarburos son llevados a cabo, los permisos para realizar el tendido de la tubería submarina deben ser tramitados ante las dependencias correspondientes. Esto es con el fin de que las zonas por donde tenemos planeado que la línea pasará no estén registradas, ya sea porque sean propiedad privada, zona ecológica o simplemente que las autoridades locales no permitan que la tubería pase por dicha área.

1.3. MATERIALES

En cualquier proyecto de tubería, ésta y el equipo auxiliar deben ser adquiridos para ser compatibles con la instalación requerida y las condiciones de servicio. Adicionalmente, los equipos adquiridos no deben

ocasionar dificultades ni costos asociados con la construcción de la línea. Con respecto a esto, las propiedades mecánicas, la resistencia de fractura, características dimensionales y libre de defectos son considerados significantes en la preparación del material y las especificaciones de instalación.

La corrosión del acero en un ambiente húmedo de Sulfuro de Hidrógeno, H_2S , es un proceso electrolítico. Dos formas de ataque al metal resultan de la entrada del hidrógeno, estas son:

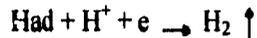
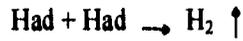
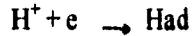
1. Hendidura gradual inducida por hidrógeno (HIC, Hydrogen Induced Stepwise Cracking). El desarrollo de HIC es principalmente atribuido a la presencia de hidrógeno.
2. Hendidura de esfuerzo del Sulfuro (SSC, Sulphide Stress Cracking). Para determinar la inmunidad al SSC se deben considerar el material de la línea de la tubería y la soldadura circunferencial de campo.

Para muchos de los proyectos en tierra y Costafuera hay consideraciones adicionales a causa de la presencia de humedad o al servicio agrario. Como parte del control de corrosión del sistema completo de la tubería, todo material debe ser resistente a la corrosión del sulfuro.

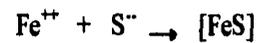
Reacción de la Corrosión.

La presencia de agua y concentraciones críticas de H_2S resultará en un mecanismo de corrosión, el cual puede escribirse como sigue:

a) Reacción Catódica.



b) Reacción Anódica



Con la reacción anódica se proporciona electrones para la reducción de iones de hidrógeno.

Requerimientos.

Considerando los factores influenciando la HIC y la SSC, las especificaciones de fabricación del material y las de instalación son formuladas para condiciones específicas de producción. Por ejemplo, si un producto contiene una gran cantidad de H_2S y CO_2 , las pruebas y el criterio de ejecución deben ser extremadamente severas.

Requerimientos contra el HIC.

La determinación de la susceptibilidad del material de una línea de tubería es normalmente ejecutada de acuerdo con el Método de Prueba TM-02-84 de la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE). El método define claramente la locación del espécimen y la orientación así como el ambiente de prueba y los procedimientos a ser utilizados. La

evaluación de hendidura gradual se basa en la macro y micro examinación de secciones transversales específicas. La longitud de la hendidura y el espesor de la misma se miden para llevar a cabo un análisis cuantitativo de la relación longitud de la hendidura (CLR) espesor de la hendidura (CTR), y la relación de sensibilidad de la hendidura (CSR).

Requerimientos contra la SSC.

Los materiales deseados para el servicio amargo de hidrocarburos están incluidos en NACE MR- 01-75; requerimientos del material: Material Metálico Resistente contra Hendiduras de Esfuerzo de Sulfuro para Equipo de Campo de Petróleo. En suma la dureza máxima de la soldadura y la zona afectada de aceros ferríticos es controlada por un nivel de dureza abajo de 248 HV10. Aunque, en general un valor de dureza de 248 HV10 se ha encontrado como indicativo de una línea de tubería de acero resistente a la SSC. Sin embargo, la susceptibilidad a la SSC es fuertemente determinada por la concentración de H₂S y el nivel de esfuerzo aplicado.

1.4. Soldadura

Se deberán alinear todos los tramos provistos de una tubería submarina. Antes de esta alineación, el interior de la tubería debe estar limpia de todo objeto, tal como pintura, óxidos, escoria, etc. Se debe inspeccionar el tubo para detectar defectos que pudieran afectar la vida de diseño de la tubería submarina. En el caso de que haya ranuras, muescas y/o arrancaduras con profundidades mayores de 1.6 mm (1/16"), éstas se deben

remover, si el espesor remanente de la pared del tubo es igual o mayor del 92% . Se puede usar el esmeril para eliminar estos problemas. Si el área del defecto excede esta profundidad, el tubo debe ser cortado para eliminar este defecto.

No se permitirán abolladuras mayores de 6.35 mm. (1/4"), en el caso de que se tengan, se debe cortar el tubo para removerlas, no está permitido sacar las abolladuras por martilleo y/o con gatos hidráulicos.

La soldadura deberá realizarse por medio del proceso de arco eléctrico con electrodo revestido, o el proceso de alambre tubular con fundente interior "innershield". Todos los electrodos tendrán la clasificación de la American Welding Society (AWS). Los procedimientos de soldadura deberán incluir los detalles, métodos y materiales que serán usados. Estos procedimientos deberán proporcionar la calidad de soldadura requerida para el servicio deseado.

Las soldaduras de prueba deberán ser radiografiadas usando la técnica radiográfica. Todas las soldaduras de prueba deberán ser sometidas a pruebas de impacto "Charpy" de la muestra en "V". Además, se deberán realizar tres ensayos de dureza en la sección transversal de una probeta obtenida de la soldadura, a intervalos de 2 mm.

La tubería deberá soldarse en la posición horizontal fija. Las abrazaderas deberán ser de acero y tener contacto sólido con el tubo para evitar las quemaduras de arco. Cuando el diámetro de la tubería sea mayor de 16" (406 mm) serán necesarios al menos dos soldadores para realizar los trabajos de soldadura. Cuando se instalen accesorios y en cambios de espesores de pared, se deberán usar piezas maquinadas o realizar la unión por medio de cordón interior.

Cuando se suelden dos materiales con diferentes grados que estén cubiertos por procedimientos aprobados para el grado mayor. Se deberán indicar en los procedimientos de soldadura la clasificación específica AWS de todos los materiales de aporte, estos deberán protegerse adecuadamente para evitar su deterioro.

II. DISEÑO

OBJETIVO:

Proporcionar condiciones y formas de diseño de las tuberías submarinas, así como de proveer los elementos que intervienen en estos diseños.

II. DISEÑO

El diseño de sistemas de tubería marina debe garantizar la integridad de la línea en relación de a factores externos y ambientales durante la vida de diseño del sistema.

Para que una tubería submarina permanezca estable en las direcciones horizontal, vertical y longitudinal, es necesario que todas las fuerzas externas e internas que actúen en cualquier momento sobre la tubería, estén en equilibrio, es decir, no deben existir fuerzas de desequilibrio que ocasionen que la tubería se mueva.

La estabilidad de la tubería esta directamente relacionada con el peso sumergido de la misma, las fuerzas ambientales y con la resistencia desarrollada por el suelo del fondo marino.

Las predicciones de ocurrencia de las olas, corrientes y mareas, así como las velocidades de vientos son datos básicos requeridos para el diseño de tuberías submarinas. La seguridad de la tubería, al igual que la posibilidad de desarrollar un diseño económico, puede ser significativamente influenciado por la ocurrencia de los datos ambientales de diseño.

II.1. Diseño por Resistencia.

Las tuberías y ductos ascendentes (Risers) deben ser diseñados contra los posibles modos de falla siguientes:

- Fluencia Excesiva
- Fallar por Fatiga
- Fractura
- Daño excesivo o pérdida del lastre de concreto
- Pandeo
- Pérdida de estabilidad

II.1.1. Presión Interna.

Una vez que se ha determinado el diámetro de la tubería, el siguiente paso es la determinación del espesor de pared del tubo, tal selección se debe realizar para que el esfuerzo circunferencia no exceda el esfuerzo permisible por los códigos aplicables.

La presión interna de diseño (P) se define como la diferencia entre la presión interna y la presión externa en cualquier punto del sistema de la tubería submarina durante un flujo normal .

El esfuerzo circunferencial de tensión que será comparado con la fórmula 2.2. se calculará con la siguiente expresión:

$$\sigma_y = (p_i - p_d) D/2t \dots\dots\dots 2.1$$

Donde:

σ_y = Esfuerzo circunferencial debido a presión interna.

p_i = Presión interna.

p_e = Presión externa.

D = Diámetro nominal externo de la tubería.

t = Espesor nominal de la pared del tubo.

II.1.2. Requerimientos del Códigos.

El código ANSI/ASME B31.8 edición 1991 establece que se debe usar un factor de diseño de 0.5 para Riser y para la tubería submarina que se encuentre cerca de la plataforma, para la tubería que se encuentre retirada de la plataforma este código establece que se debe usar un factor de diseño de 0.7. Es decir, se debe multiplicar el factor por el esfuerzo mínimo de fluencia especificado para el material que será usado en la tubería.

El código Det Norske Veritas de 1981 (DnV-1981), para tuberías submarinas, establece que el esfuerzo circunferencial de tensión (σ_y) debido a la diferencia de presión interna y de presión externa no debe exceder el valor permisible dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{yp} = \eta_h \sigma_F K_t \dots\dots\dots 2.2.$$

Donde:

σ_{yp} = Esfuerzo circunferencial permisible

η_h = Factor de uso.

σ_F = Esfuerzo mínimo especificado de fluencia.

κ_t = Factor de temperatura.

Para materiales con temperatura abajo de 120°C, se puede usar un valor de $\kappa_t = 1.0$. Para temperaturas más altas se debe considerar una reducción de este factor. En la siguiente tabla se proporcionan algunos valores.

Zona	Condiciones de Carga	
	a	b
1	0.72	0.96
2	0.50	0.67

Tabla 2.1. Factor de uso para presión interna

Temperatura del fluido (°C)	Factor de temperatura (κ_t)
121 o menor	1.000
149	0.967
177	0.933
204	0.900
232	0.867

Tabla 2.2. Factor de Temperatura.

Para valores intermedios de la temperatura del fluido, se puede hacer interpolaciones para determinar el valor del factor de temperatura.

La zona 1 se define como la parte del fondo marino que se encuentra a una distancia de más de 500 m. de plataforma o de cualquier construcción.

La zona 2 se define como la parte de fondo marino que se encuentra a una distancia no mayor de 500 m. de la plataforma o de cualquier construcción.

El sistema de tubería submarina debe ser diseñado para la más desfavorable de las siguientes condiciones:

a) Cargas funcionales

b) Cargas funcionales actuando simultáneamente con las cargas ambientales.

a) Las cargas funcionales son aquellas que son consecuencia de la existencia de sistemas. Las cargas funcionales se dividen en dos grupos:

1.- Cargas funcionales durante operación. Estas cargas son debidas normalmente a:

- Peso
- Presión
- Contracción y expansión térmica.
- Preesfuerzo.

El peso incluye:

- Peso del tubo, incluyendo recubrimiento y todos los aditamentos de la tubería
- Peso de los productos transportados
- Flotación

Se debe hacer mención de que el peso de los productos transportados y la flotación no tendrán el mismo efecto en esfuerzos de la tubería, si la tubería es vertical o inclinada.

La presión incluye:

- Presión interna del fluido.
- Presión hidrostática externa.
- Presión del suelo para tuberías enterradas.

La expansión y contracción térmica incluyen el efecto de la temperatura del producto en la temperatura del material. La diferencia de temperaturas que será considerada es la resultante entre la temperatura del material durante operación y la temperatura del material durante instalación. Las expansiones y contracciones térmicas no serán tomadas en cuenta cuando no influyan en la capacidad para soportar otras cargas.

El preesfuerzo, tal como el producido por una curva permanente o elongación permanente introducida durante la instalación, deberá ser tomada en cuenta para la extensión de la capacidad de soportar otras cargas.

2.- Cargas funcionales durante instalación. Estos tipos de cargas pueden ser agrupados en:

- Peso
- Presión
- Fuerza de instalación

Las fuerzas de instalación van a incluir todas las fuerzas que estarán actuando en la tubería debidas a las operaciones de instalación. Las fuerzas típicas de instalación son: la tensión aplicada durante el tendido y las fuerzas de la máquina de atrincherado, en el caso de que se vayan a realizar operaciones de atrincheramiento.

b) Cargas Ambientales.

Las cargas ambientales son las cargas debidas al viento, oleaje, corrientes, y otros fenómenos ambientales. Las actividades humanas independientes del sistema de la tubería son también incluidas, como por ejemplo *el impacto de anclas de embarcaciones.* Estas cargas deben ser evaluadas en principio por medio de métodos probabilísticos.

Las cargas ambientales durante operación normal no se tomarán menores que la carga probable más severa en un período de tiempo de 100 años.

Para fases temporales, el periodo de diseño será tomado como tres veces la duración de la fase, pero no menor que 3 meses.

c) Cargas producidas por el Viento.

Las cargas producidas por el viento pueden ser divididas en dos categorías:

Fuerzas de viento estáticas, las cuales son supuestas constantes tan grandes, como el viento es constante. Se supone que estas fuerzas actúan normal al eje de tubería en el plano definido por el eje de la tubería y la dirección del viento.

La fuerza estática de viento por unidad longitud de la tubería puede ser determinada como:

$$q_w = 0.613 C V_n^2 D_t \dots\dots\dots 2.3.$$

Donde:

q_w = Fuerza del viento por unidad de longitud de la tubería, actuando normal al eje del tubo en N/m.

C = Coeficiente de contorno

V_n^2 = Componente de la velocidad del viento normal al eje de la tubería en m/s.

D_t = Diámetro total exterior del tubo, incluyendo recubrimientos en m.

Fuerzas de viento cíclicas debidas a formación de vórtices.
También se supone que estas cargas actúan normales al eje de la tubería. Estas fuerzas pueden actuar en dos planos : paralelo y normal a la dirección del viento.

II.1.3. Pandeo Local.

La línea de la tubería deberá estar segura contra el pandeo local bajo la condición más desfavorable de supresión externa, fuerza axial y momento flexionante. El efecto del recubrimiento de concreto puede ser tomado en cuenta si se efectúa un análisis satisfactorio.

La combinación crítica del esfuerzo longitudinal y esfuerzos circunferencial puede ser expresado como sigue:

$$\frac{(\sigma_x)^2}{\sigma_{xcr}^2} + \frac{\sigma_y}{\sigma_{ycr}} = 1$$

El esfuerzo de compresión se toma como positivo en la fórmula anterior.

Donde:

$$\sigma_x = \sigma_x^N + \sigma_x^M$$

$$\alpha_x^N = N/A$$

N = Fuerza Axial

A = p(D-t) = Area de la sección transversal del tubo.

$$\alpha_x^M = M/W$$

M = Momento flexionante

W = p/4(D-t)² = Modulo de sección.

D = Diámetro nominal externo del tubo.

t = Espesor nominal de la pared del tubo.

$$\frac{\sigma_{xcr}^N}{\sigma_x} = \frac{\alpha_x^N}{\sigma_x} \sigma_{xcr}^N + \frac{\alpha_x^M}{\sigma_x} \sigma_{xcr}^M$$

Donde :

σ_{xcr}^N = Esfuerzo crítico longitudinal cuando N actúa sola (M=0, p=0).

$\sigma_{xcr}^N = \sigma_F$ Para la relación D/t < 20

$$\sigma_{xcr}^N = \sigma_F [1 - 0.001(D/t - 20)] \text{ para } 20 < D/t < 100$$

σ_F = Resistencia específica de fluencia (correspondiente a 0.2% de la deformación residual).

σ_{xcr}^M = Esfuerzo crítico (máximo) longitudinal cuando M está actuando sólo ($N=0$, $p=0$).

$$\sigma_{xcr}^M = \sigma_F (1.35 - 0.0045 D/t)$$

$$\alpha = 1 + \frac{300}{D/t} \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_{ycr}}$$

$\sigma_y = (p_e - p_i) D/2t$ = Esfuerzo circunferencial que será considerado en el análisis de pandeo (no necesariamente igual al esfuerzo circunferencial real).

Donde:

p_e = Presión externa.

p_i = Presión interna

$p = p_e - p_i$ = Sobrepresión externa.

σ_{ycr} = Esfuerzo crítico circunferencial cuando p está actuando sola ($N=0$, $M=0$).

$$\sigma_{y_{cr}} = \sigma_{yE} = E \left(\frac{t}{D-t} \right)^2 \quad \text{para } \sigma_{yE} < 2/3 \sigma_F$$

$$\sigma_{y_{cr}} = \sigma_F \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_F}{3\sigma_{yE}} \right)^2 \right] \quad \text{para } \sigma_{yE} > 2/3 \sigma_F$$

La combinación permisible de σ_x y de σ_y puede ser expresada como :

$$\frac{(\sigma_x)^n}{\eta_{xp} \sigma_{xcr}} + \frac{\sigma_y}{\eta_{yp} \sigma_{y_{cr}}} < 1$$

Donde:

η_{xp} = Factor permisible de uso cuando $\sigma_x = 0$

η_{yp} = Factor permisible de uso cuando $\sigma_y = 0$

Los factores de uso dependen en general de si el esfuerzo crítico se encuentra en el rango elástico o plástico. Normalmente η_{yp} será más pequeño que η_{xp} .

Para las tuberías durante operación los valores de los factores de la tabla siguiente pueden ser multiplicados por 1.2. Tanto para tuberías como para risers durante la instalación los factores de la tabla pueden ser multiplicados por 1.44 como máximo. Sin embargo el valor del factor de uso no debe exceder el valor de 1.0.

Condición de Carga	$\sigma_E/\sigma_F < -1$	$1 < \sigma_E/\sigma_F < 3$	$\sigma_E/\sigma_F > 3$
a)	$\eta_p = 0.52$	$\eta_p = 0.48 + 0.04 \sigma_E/\sigma_F$	$\eta_p = 0.60$
b)	$\eta_p = 0.68$	$\eta_p = 0.62 + 0.06 \sigma_E/\sigma_F$	$\eta_p = 0.80$

Tabla 3.1. Factores de uso (para pandeo local).

σ_E = Esfuerzo crítico si el material es completamente elástico (σ_{xE}

ó σ_{yE})

$$\sigma_F = 0.42 E \cdot t/D$$

Para la mayoría de los tubos el pandeo debido solo a σ_x estará en el rango plástico, y el pandeo debido solo a σ_y será elástico. Para tales tubos las recomendaciones proporcionadas en la tabla anterior nos conducirán a los factores proporcionados en la siguiente tabla.

Condición de Carga	Instalación. Tuberías y Risers		Operación. Tub. y risers			
	η_p	η_p	zona 1		zona 2	
			η_p	η_p	η_p	η_p
a)	0.86	0.75	0.72	0.62	0.50	0.43
b)	1.00	0.98	0.96	0.82	0.67	0.56

Tabla 3.2. Factores de uso (para pandeo local)

Las tuberías que no contienen líquidos (llenadas con aire) durante la operación pueden ser consideradas para su diseño como si estuvieran durante la condición de instalación.

II.1.4. Propagación del Pandeo.

La propagación del pandeo se refiere a la situación donde una abolladura (la cual ha sido causada por flexión excesiva o por otra causa) cambia su configuración dentro de un pandeo longitudinal y se propaga a lo largo de la tubería, causando el colapso de la misma a lo largo de su longitud.

La naturaleza de una propagación del pandeo es que un nivel más grande de presión es requerida para iniciar la propagación del pandeo (llamada presión de iniciación del pandeo p_{in}) que la presión requerida para mantener la propagación del pandeo (llamada presión de propagación del pandeo p_{pr}).

Teóricamente, la probabilidad de que una propagación del pandeo sea iniciada no es más grande que la probabilidad de que ocurra un pandeo local. Sin embargo, debido al gran riesgo económico involucrado en la propagación del pandeo, incremento de seguridad, o al menos una investigación más a fondo, puede ser recomendable.

Una propagación del pandeo no puede iniciarse, o propagarse, en una porción de la tubería donde la sobrepresión máxima externa es menor que la presión de propagación (p_{pr}) del tubo. Una consideración del trabajo plástico involucrado en el colapso total proporciona la expresión siguiente:

$$p_{pr} = 1.15 \pi \sigma_F \left(\frac{t}{D-t} \right)^2$$

la cual puede ser considerada en un límite menor. p_{pr} probablemente será algo más grande que el valor proporcionado por la fórmula anterior. Por consiguiente, la presión de iniciación p_{in} es algo más grande que p_{pr} .

Un pandeo no puede ser iniciado, pero puede ser propagado, en una porción del tubo donde la sobrepresión externa máxima está entre p_{pr} y p_{in} ($p_{pr} < p < p_{in}$).

Es interesante notar que la presión de propagación del pandeo sólo depende del esfuerzo de fluencia del material de la tubería y de la relación D/t . La naturaleza de causar un pandeo en la tubería depende de los parámetros de la tubería así como de las fuerzas externas aplicadas en las tuberías.

II.1.5. Diseño por Deformación.

Debido al desarrollo de los momentos de flexión en los puntos fijos a lo largo de la tubería, como un resultado del desplazamiento, las deformaciones producidas por la flexión en la tubería deben ser evaluadas durante el diseño por estabilidad.

Para puntos conocidos fijos, tales como conexión con risers, válvulas marinas, etc., el efecto del desplazamiento lateral del tubo debe ser evaluado tanto para la tubería como para la estructura que restringe.

Cuando se usa un criterio para el diseño por deformación, se debe tomar en cuenta la ductibilidad del material de la tubería. El criterio que se puede tomar para la deformación es el siguiente:

Deformación = $7.5 (D/t)^2$ con un límite máximo de deformación de 1%.

II.2. Diseño por Estabilidad.

II.2.1. Introducción.

El diseño de sistemas de tubería marina debe garantizar la integridad la línea en relación a factores externos y ambientales durante la vida de diseño del sistema.

Para que una tubería submarina permanezca estable en las direcciones horizontal, vertical y longitudinal, es necesario que todas las fuerzas externas e internas que actúen en cualquier momento sobre la tubería, estén en equilibrio, es decir, no deben existir fuerzas de desequilibrio que ocasionen que la tubería se mueva.

La estabilidad de la tubería esta directamente relacionada con el peso sumergido de la misma, las fuerzas ambientales y con la resistencia desarrollada por el suelo del fondo marino.

En esta parte se presentan dos métodos de diseño por estabilidad de tubería submarina: el primero es el método tradicional, el cual se ha usado durante muchos años, y el segundo es el método simplificado.

II.2.1.1. Método tradicional.

Condiciones Básicas.

Las condiciones siguientes deben ser consideradas durante el diseño de estabilidad en el fondo marino de tubería submarinas:

- Condiciones Ambientales.
- Condiciones geotécnicas del fondo marino (cama sobre la cual descansará la tubería).

- Condiciones topográficas del fondo marino.
- Batimetría.
- Datos del tubo (diámetro, espesor de pared, recubrimiento de concreto).
- Localización de las restricciones de la tubería (conexiones de risers, cruces, etc.)

Períodos de Retorno.

El diseño por estabilidad está basado en un período de retorno dado de las condiciones ambientales cerca del fondo marino actuando perpendicularmente a la tubería. En general, las velocidades de las partículas inducidas por las olas y las corrientes cerca del fondo deberán ser consideradas.

Olas : condición de retorno de 100 años.

Si las olas dominan

Corriente : condición de retorno de 10 años.

Olas : condición de retorno de 10 años.

Si la corriente domina

Corriente: condición de retorno de 100 años.

Condiciones Ambientales.

Las condiciones ambientales usadas en el diseño por estabilidad deben estar basadas en datos adecuados del área en cuestión. Si no hay datos disponibles del área en particular, se pueden usar datos de otras localidades cercanas.

Los estados del mar serán normalmente definidos en términos de la altura de ola (H_s), del período espectral ($T_p = \text{raíz cuadrada de } 250 H_s/g$) y de la probabilidad de retorno correspondiente.

La forma en la cual la información de la ola este disponible, depende de la cantidad y calidad de los datos disponibles para la zona en cuestión.

La distribución direccional de las condiciones de oleaje puede ser tomado en cuenta cuando se selecciona la velocidad de la partícula de diseño inducida por la ola. Normalmente, los estados extremos de diferentes direcciones deberán ser consideradas. Si la información direccional de ola no está disponible entonces de las condiciones extremas de la ola deberán suponerse actuando perpendicularmente al eje de la tubería.

La velocidad de la partícula inducida por la ola para ser usada en el análisis y diseño por estabilidad esta representada por el valor significativo de la velocidad cerca del fondo marino, perpendicular a la tubería (U_s) y por el período correspondiente de cruce arriba del cero (T_u).

Estos valores pueden ser calculados con las siguientes ecuaciones:

$$U_s = U_s^* R$$

$$T_u = 2\pi \left(\frac{m_0}{m_2} \right)^{1/2}$$

Donde :

$U_s^* = 2$ raíz cuadrada m_0

R = Factor de reducción

$m_n = \int_0^\alpha \omega_n s_{uu}(\omega) d\omega$

ω = Frecuencia circular.

El valor del factor de reducción se puede calcular con la siguiente ecuación :

$$R = \text{raíz cuadrada} \left\{ \int_{\theta-n/2}^{\theta+n/2} \Psi(\beta, \theta) (\cos^2(\theta_p - \beta)) d\beta \right\}$$

Donde:

θ_p = Dirección perpendicular a la tubería.

θ = Dirección principal de la ola.

β = Sub-dirección alrededor de la dirección principal de la ola.

$\Psi(\beta, \theta)$ = Función de expansión dada por:

$$\Psi(\beta, \theta) = C \cos^n(\beta - \theta)$$

n = Exponente de expansión (para un lugar en específico).

C = Constante elegida tal que la integral de R de todas las direcciones de olas se igual a 1.0.

Las velocidades de corriente de diseño deben estar basadas en una consideración de las diversas componentes que contribuyen, tales como marea, tormenta y corrientes.

La velocidad de la corriente puede ser reducida para tomar en cuenta el efecto del estrato límite del fondo marino.

No es recomendable considerar cualquier efecto del estrato límite en las velocidades inducidas por las olas, ya que tales efectos son normalmente pequeños y están incluidos en el modelo de la fuerza hidrodinámica aplicada, el cual es la base para las curvas generalizadas. Sin embargo, el efecto del oleaje en el estrato límite actual puede ser calculado.

VELOCIDAD SIGNIFICANTE DEL AGUA, U_s

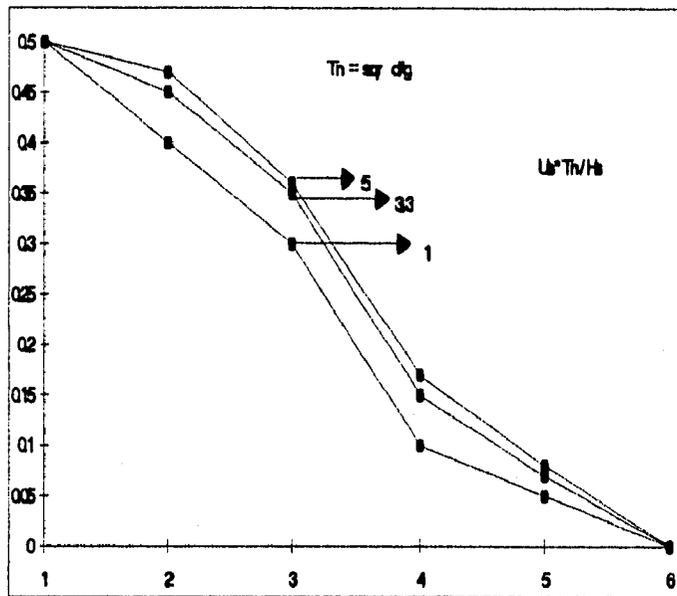


Figura 2.1. Gráfica de los valores de las velocidades del Agua U_s .

Tr/Tp

- d = Profundidad del Agua**
- g = Constante Gravitacional**
- γ = Parámetro de Picada**

Valores de T_n

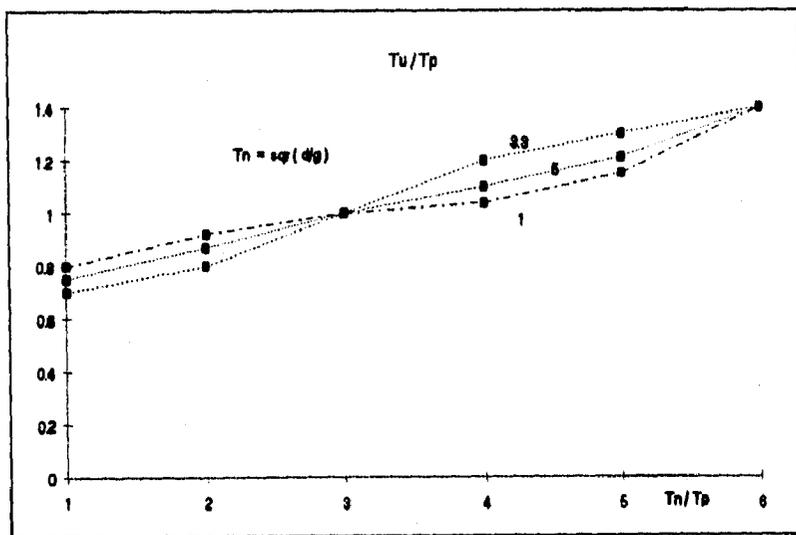


Figura 2.2. Valores de T_n

Datos del Tubo.

Desde el punto de vista de la estabilidad en el fondo marino, se requieren los siguientes datos del tubo:

- Diámetro externo
- Espesor de la pared.
- Densidad de los contenidos a la presión de operación.
- Espesor y densidad del recubrimiento contra la corrosión.
- Densidad del lastre
- Propiedades mecánicas del material de la tubería.

II.2.1.2. Fuerzas Hidrodinámicas en Tuberías.

Las fuerzas más importantes que actúan sobre una tubería son las fuerzas de inercia y las fuerzas de arrastre.

Principalmente, las fuerzas de arrastre son las más significativas involucradas en el movimiento o daño de una tubería.

De acuerdo a los estudios que se han realizado en relación a fuerzas que actúan sobre cilindros, podemos tener la siguiente clasificación de dichos estudios :

- estudios de laboratorio
- estudios de campo
- estudios teóricos

La gran parte de estos estudios han tenido como base números de Reynolds menores al rango que se aplique a condiciones de tormenta para tuberías de gran diámetro.

Los números de Reynolds, las condiciones de frontera y el grado de turbulencia influyen en la configuración del flujo y en la distribución de presiones sobre el cilindro sumergido.

Fuerzas de Arrastre

Un fluido moviéndose sobre un cuerpo ejerce una fuerza determinada. Si esta fuerza se presenta a partir de un flujo estacionario del fluido, es llamada fuerza de arrastre. La magnitud de esta fuerza depende de:

- área proyectada, forma y rugosidad del cuerpo.
- el grado de turbulencia del flujo
- un coeficiente de proporcionalidad llamado *coeficiente de arrastre*.

La fuerza de arrastre puede calcularse con la siguiente expresión:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D V_r |V_r| D_t$$

Donde:

F_D = Fuerza de arrastre por unidad de longitud, normal al eje de la tubería.

C_D = Coeficiente de arrastre para el flujo normal al eje de la tubería. El coeficiente de arrastre está en función del número de Reynolds, el número de Keulegan-Carpenter, la rugosidad de la tubería, y de la distancia entre la tubería y el fondo marino.

Fuerzas de Inercia

La naturaleza oscilatoria del movimiento del oleaje aumenta la aceleración de un fluido. La aceleración de las partículas de un fluido alrededor de un objeto sumergido produce una fuerza de inercia que es proporcional al volumen del objeto, la aceleración del fluido y un coeficiente adimensional llamado *coeficiente de masa*.

$$F_i = \rho \pi \frac{D_t^2}{4} a + \rho C_m \pi \frac{D_t^2}{4} a_r$$

Donde:

F_i = Fuerza de inercia por unidad de longitud, normal al eje de la tubería.

ρ = Densidad de masa del agua

a = Aceleración de la partícula líquida normal al eje de la tubería

a_r = Aceleración relativa entre las partículas del agua y el tubo, normal al eje de tubería.

D_t = Diámetro externo total de la tubería.

C_m = Coeficiente de masa. Este coeficiente está en función del número de Reynolds, el número de Keulegan-Carpenter, la rugosidad de la tubería, y de la distancia entre la tubería y el fondo marino.

Cuando una ola pasa sobre un cilindro circular son generadas tanto las fuerzas de inercia como las de arrastre.

Una ola de altura grande actuando sobre un cilindro de diámetro pequeño produce fuerzas de arrastre altas y de inercia bajas. Olas de altura

intermedia que actúan sobre un cilindro de diámetro medio producen fuerzas de componentes semejantes de inercia y arrastre.

Fuerzas que afectan las tuberías submarinas.

Una tubería submarina está sometida durante su vida de diseño a una enorme variedad de condiciones de fuerzas hidrodinámicas.

Estas fuerzas pueden clasificarse en cuatro grupos principales en relación a su efecto sobre la tubería.

F_v = Fuerzas verticales.

F_H = Fuerzas Horizontales.

F_A = Fuerzas Axiales.

F_T = Fuerzas de Torsión.

Las fuerzas axiales y torsionales pueden ocurrir, sin embargo serán despreciables ya que generalmente son el resultado de fuerzas horizontales o verticales excéntricas. Las fuerzas que actúen en una tubería submarina se muestran en la fig. 2.4 (5.4)

FUERZAS HIDRODINAMICAS SOBRE TUBO

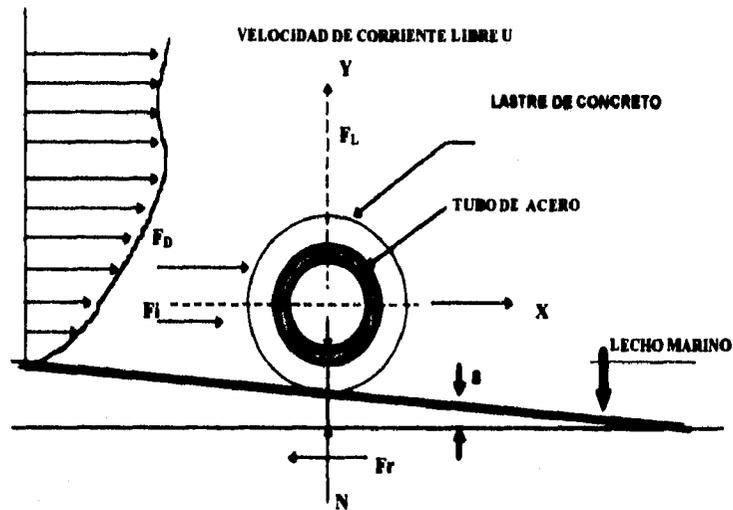


figura 2.4. Muestra de una parte de la tubería.

W = Peso total de la tubería, incluyendo lastre y recubrimiento.

Tubería de Acero, y contenidos kg/m.

F_D = Fuerza de Arrastre kg.

F_I = Fuerza de Inercia kg

F_L = Fuerza de Levantamiento kg

N = Fuerza Normal kg

Fr = Resistencia de Fricción kg

U = Velocidad de flujo en la capa limite m/seg.

θ = Pendiente del lecho marino

II.2.1.3. Diseño por estabilidad.

El método presentado en esta parte del capítulo detalla a una tubería que permanece en el fondo del mar a lo largo de su vida de diseño. La estabilidad de la tubería, como se mencionó anteriormente, está directamente relacionada con el peso sumergido de la misma, las fuerzas ambientales y con la resistencia desarrollada por el suelo marino (la franja sobre la cual la tubería permanecerá). Consecuentemente el propósito del diseño por estabilidad es verificar que el peso sumergido de la tubería sea suficiente para cumplir con el criterio de estabilidad requerido.

El siguiente criterio de diseño debe ser considerado durante el diseño por estabilidad:

- Desplazamiento lateral.
- Esfuerzo/deformación en la pared de la tubería.
- Interacción con el pandeo lateral debido a fuerzas axiales.
- Daños por fatiga
- Deterioro por recubrimiento.
- Daño para ánodos de sacrificio.

II.2.1.4. Casos de Cargas.

Todos los casos relevantes para la estabilidad de la tubería deben ser considerados. En general, esto dará como resultado los siguientes dos casos de cargas:

- a) Condición de instalación
- b) Condición de operación

En general, el desplazamiento lateral, el esfuerzo y la deformación experimentados por la tubería son los aspectos que gobiernan el criterio de diseño.

La condición de instalación se refiere al período de tiempo después de que la tubería permanece en el fondo marino antes de ser atrincherada o autorizada para su funcionamiento. Para una tubería que va a ser atrincherada, la condición de instalación determinará normalmente los requerimientos de peso sumergido de la tubería. Para esta condición, se requiere una gravedad específica mínima de 1.1, es decir,

$$\frac{(W_s + B)}{B} = 1.1$$

Donde:

W_s = Peso sumergido

B = Flotación

b) La condición de operación se refiere a las fases de operación de la vida útil de la tubería. En el análisis de estabilidad, se debe asumir que la tubería está llena con contenidos en la presión de operación normal y la densidad más baja esperada.

Durante la condición de operación la tubería puede estar sujeta a desplazamiento laterales, esfuerzos/deformaciones, etc., debidos a condiciones extremas después de la situación de tormenta de diseño.

La combinación de diseño de oleaje extremo y corriente debe ser determinado para que esta probabilidad de excedencia no sea mayor de 10^{-2} /año (período de retorno de 100 años).

II.2.1.5. Métodos de análisis

Hay diferentes métodos de análisis de estabilidad de la tubería. En este caso se consideran tres de estos métodos, los cuales son:

- a) Análisis dinámico.
- b) Análisis generalizado de estabilidad.
- c) Análisis simplificado de estabilidad.

a) El *análisis dinámico* involucra una simulación dinámica completa de una tubería que permanece en el fondo marino, incluyendo el modelado de la resistencia del suelo, fuerzas hidrodinámicas, condiciones de frontera, y la respuesta dinámica. El análisis dinámico da las bases para el método generalizado. El análisis dinámico puede ser usado para un análisis detallado de áreas críticas a lo largo de la línea de la tubería, tales como cruces de tubería, conexión de risers, etc., donde un detalle de alto nivel es requerido en la respuesta de la tubería, o para un re-análisis de una tubería crítica existente.

b) El *método generalizado de estabilidad* está basado en una serie de curvas de estabilidad no dimensionales las cuales se han derivado de muchos modelos de respuestas dinámicas. Este método puede ser usado en los cálculos de diseño detallado o para cálculos de diseño preliminar.

c) El *análisis simplificado de estabilidad* está basado en un balance estático de fuerzas que actúan en un tubo, pero ha sido calibrado con resultados del análisis generalizado de estabilidad. Este método

generalmente proporciona peso de tubos que conforman un desarrollo conservativo de los obtenidos del análisis generalizado.

II.2.1.6. Hundimiento y Flotación.

Las tuberías que van enterradas deben ser revisadas por posible hundimiento o flotación. Para líneas que transportan gas o líquidos, el hundimiento debe ser considerado asumiendo que la tubería va a estar llena de agua y la flotación se considera suponiendo que la tubería va a estar llena de gas o aire.

Si la gravedad específica de la tubería llena de agua es menor que la del suelo, se debe revisar que la resistencia al cortante del suelo sea suficiente para prevenir la flotación.

II.1.2.7. Criterios de Diseño.

El criterio de diseño que va a ser usado en cualquier método de diseño por estabilidad variará dependiendo de la situación que se va a considerar.

Desplazamiento Lateral.

El desplazamiento lateral permisible de la tubería dependerá de muchos factores, tales como:

- Regulaciones Nacionales.
- Obstrucción en el fondo marino.
- Ancho del corredor de inspección.
- Distancia de la plataforma u otra restricción.

El desplazamiento lateral permisible especificado debe ser limitado a un valor no mayor que la mitad del ancho del corredor en el cual la tubería va a descansar.

Otros aspectos importantes que se deben tener en cuenta son los siguientes:

- El movimiento lateral de la tubería no debe causar daño significativo al recubrimiento externo de la tubería.
- El movimiento lateral de la tubería no debe causar daño a los ánodos de sacrificio de la tubería.
- El movimiento lateral de la tubería no debe interferir con otras tuberías o con otras instalaciones en el fondo marino.

Tubería en suelo arenoso.

Para una tubería que se encuentra en suelo arenoso la respuesta generalizada está dado en términos del desplazamiento lateral para una sección libre y deformación por flexión correspondiente a un punto fijado a lo largo de la tubería. El desplazamiento incluye el desplazamiento neto esperado más una desviación estándar más una amplia máxima de desplazamiento en una onda sencilla. El método de diseño determina el peso de la tubería que satisface el criterio dado para desplazamiento y deformación en el estado de diseño.

Método aproximado para calcular la reducción por el estrato límite.

Este método puede ser aplicado para las condiciones de corriente estable para condiciones combinadas de flujo de corriente estable y ola. El efecto de rugosidad de la cama del fondo marino y la interacción corriente-oleaje son tomados en cuenta en este método aproximado.

El flujo estable se describe como un perfil de velocidad logarítmica de la forma siguiente:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln \left[\frac{z+z_0}{z_0} \right]$$

Donde:

U^* = Velocidad de fricción

k = Constante de von Karman (= 0.4)

z = Elevación arriba del fondo marino.

z_0 = Parámetro de rugosidad del fondo marino.

La velocidad estable promedio actuando en la tubería es apropiado para usarse para determinar las fuerzas hidrodinámicas en la tubería.

Esta velocidad está dada por:

$$U_D = 1/D \int U(z) dz$$

La relación entre esta velocidad promedio y la velocidad estable de referencia conocida, U_r , a una altura z_r , arriba del fondo marino es:

$$\frac{U_D}{U_r} = \frac{1}{\ln(z_r/z_0 + 1)} \{ [1 + z_0/D] \ln[D/z_0 + 1] - 1 \}$$

z_r puede ser tomada como 3m si no está disponible otra información.

Flujo de Corriente.

Para el caso de flujo de corriente estable actuando sólo, el efecto de rugosidad del fondo marino puede ser tomado en cuenta por la estimación de la velocidad del estrato límite.

El tamaño de la partícula, d_{50} , se refiere al parámetro de rugosidad de Nikuradse, k_b , y a la rugosidad del fondo marino, en donde:

$$k_b = 2.5 d_{50}$$

$$z_0 = k_b / 30$$

El tamaño de la partícula puede obtenerse de la tabla siguiente:

Fondo Marino	Tamaño de partícula d_{50}	Rugosidad z_0 (m)
Limo	0.0625	5.21 E-6
Arena fina	0.125	1.04 E-5
Arena muy fina	0.25	2.08 E-5
	0.5	4.17 E-5
Arena Gruesa	1.0	8.33 E-5
Arena muy gruesa	2.0	1.67 E-4
Grava	4.0	3.33 E-4
Cantos rodados	10.0	8.33 E-4
	25.0	2.08 E-3
	50.0	4.17 E-3
Cantos rodados grandes	100.0	8.33 E-3
	250.0	2.08 E-2
Piedra grande	500.0	4.17 E-2

Tabla 2.1. Tamaño de partículas de materiales del fondo marino.

Flujo Combinado de Corriente y Oleaje.

La interacción no lineal entre el oleaje y el flujo de corriente resulta en una modificación del perfil de velocidad estable. Esta modificación de la componente del flujo estable es atribuida a un aparente incremento de la rugosidad del fondo marino.

La rugosidad aparente depende de la relación:

$$U/U_r$$

Donde:

U_s = Velocidad horizontal inducida por la ola significativa a distancia referenciada (z_r) arriba del fondo marino.

La rugosidad aparente también depende del parámetro de la rugosidad relativa, dada por:

$$A_0/K_b$$

Donde:

A_0 = Semidiámetro orbital de las partículas del agua asociado con U_s ,

$$A_0 = (U_s T_p / 2\pi)$$

II.2.1.6. Criterios de estabilidad hidrodinámica

El código DnV-1981, indica que si el movimiento de la tubería es restringido por fricción o por el empuje pasivo del suelo, deberá de incluirse un factor de seguridad 1.1.

$$F.S. = \frac{FR}{FH} = 1.1.$$

Donde:

F.S. = Factor de Seguridad

F.H. = Fuerza Horizontal total sobre la tubería.

F.R. = Fuerza de Restricción total.

Cuando no se cumpla la relación anterior se debe lograr la estabilidad mediante algún sistema.

II.2.1.7. Métodos para estabilizar tuberías.

Una práctica muy común en tubería submarina es que ésta debe fabricarse con una gravedad específica de 1.3. cuando se encuentra en aguas poco profundas y con 1.1. cuando se localice en aguas profundas.

La estabilidad o anclaje de tubería puede ser definido como un sistema diseñado para mantener a la tubería en la posición deseada, cuando está sujeta a un conjunto de fuerzas.

Las anclas comúnmente disponibles para tubería son de dos tipos: de densidad y mecánicas. Las anclas de densidad simplemente añaden peso a la flotación negativa hasta un nivel aceptable bajo las condiciones críticas de diseño. En contraste, las anclas mecánicas no agregan peso y son diseñadas para proporcionar una fuerza de anclaje adecuada.

El recubrimiento continuo de concreto es un revestimiento que envuelve completamente al tubo y puede ser aplicado tanto en taller como en el campo. Cuando la tubería es revestida en taller, el revestimiento puede ser aplicado mediante rodillos en máquinas especiales. El recubrimiento debe

terminarse aproximadamente a 20 cm. del extremo de tubo para facilitar su unión.

Para lograr continuidad en las juntas, el recubrimiento anticorrosivo se extiende más allá del concreto. Después de que las juntas se soldaron durante la construcción, se aplica una cinta sobre el área sin protección y se cubre con una lámina de acero galvanizado que abarque el recubrimiento de concreto a cada lado de la junta. La forma de lámina tiene un orificio en la parte superior, a través del cual se le inyectará mastique asfáltico o poliuretano.

El procedimiento de revestir la tubería es campo es semejante al anterior sólo que éste no se aplica a base de máquinas, sino que debe ser colocado utilizando cimbras metálicas. En este caso el recubrimiento no es tan fuerte como el de taller, pero es adecuado para el anclaje. La forma más económica de las anclas de densidad son los muertos de concreto.

La eficiencia de las anclas de densidad puede ser aumentada incrementando la densidad del concreto.

Las anclas mecánicas difieren de las anclas de densidad en que generan su fuerza de anclaje de la resistencia al corte del suelo. Estas son insertadas en el suelo y unidas a la tubería. Son usualmente construidas de acero.

Ejemplo:

Problema de Aplicación.

Una tubería con un diámetro externo de 0.5 m. va a ser expuesta a una tormenta de marea con una velocidad de 1m/s medida a 5 m. arriba del fondo marino. El material del fondo marino es arena gruesa. Encontrar la velocidad promedio actuando en la tubería.

Solución:

Datos:

$$D = 0.5 \text{ m}$$

$$U_r = 1 \text{ m/s}$$

$$Z_r = 5 \text{ m}$$

De la tabla 2.1. encontramos: $d_{50} = 1\text{mm}$ y $z_0 = 8.33 \text{ E-5 m}$

Por lo tanto, esto nos da:

$$D/z_0 = 6000$$

$$z_r/z_0 = 60000$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación de U_D/U_r tenemos:

$$U_D/U_r = 0.7$$

La velocidad promedio actuando en la tubería es 0.7 m/s.

II.2.2. Método Simplificado

Modelos analíticos tanto para fuerzas hidrodinámica como para fuerzas de interacción suelo/tubería han sido desarrollados. Las pruebas de los modelos a gran escala de tuberías submarinas estacionarias sujetas a corriente, oleaje y a la combinación de corriente y oleaje han sido llevadas a cabo para tuberías que permanecen en el fondo marino, tuberías parcialmente enterradas, y tuberías que se encuentran en trincheras poco profundas.

El diseño de estabilidad en el fondo marino de tuberías submarinas ha estado tradicionalmente basado en el balance estático entre fuerzas hidrodinámicas aplicadas y fuerzas de resistencia del suelo como se muestra en la fig. 2.4. Típicamente, las fuerzas hidrodinámicas aplicadas tanto de corriente como de oleaje fueron computadas usando la ecuación de Morrison con coeficiente de fuerzas de arrastre y de levantamiento basados en pruebas de tubos o en la teoría de diseño tradicional.

En el diseño tradicional, las condiciones de estado del mar son presentadas por una altura de ola y periodo sencillos. Este tipo de diseño es similar al descrito en el código DnV-1981.

Para condiciones de flujo oscilatorio, se ha demostrado que el diseño tradicional no da resultado tan exactos debido a la simplicidad de los modelos para fuerzas de interacción suelo/tubería. Sin embargo, este método ha sido usado en muchas partes del mundo durante muchos años, ya que el método proporciona resultados conservativos.

II.2.2.1. Fuerzas Hidrodinámicas.

En 1988 se publicó un estudio de fuerzas hidrodinámicas actuando en tuberías submarinas, aquí, las condiciones de flujo oscilatorio son desarrolladas alrededor del tubo por movimiento del modelo del tubo y del fondo marino en lugar de causar que el agua oscilara, esto se hace produciendo desplazamiento controlado por movimiento oscilatorio de la sección de suelo/tubería relativa al agua en la zanja de la corriente.

El estudio y el desarrollo analítico de estas pruebas será descrito brevemente.

Pruebas de tubos estacionarios.

Estas fueron realizadas en el período comprendido entre 1985 y 1986, estas pruebas incluyeron condiciones de prueba corriente, de regular o irregular oleajes, y de la combinación de corriente con oleaje regular o irregular. El programa de prueba fue diseñado para cubrir un rango grande de parámetros significantes adimensionales, incluyendo el número de Keulegan - Carpenter, la relación corriente-oleaje, número de Reynolds, rugosidad del tubo, y la rugosidad del fondo marino. También fueron investigados efectos secundarios tales como irregularidad del fondo marino, efectos del escalado.

Estas pruebas indicaron que tanto las fuerzas de levantamiento como las fuerzas a lo largo de la línea son reducidas debido a la menor parte de la tubería expuesta. También se concluyó que el efecto del enterramiento

parcial puede ser considerado por usar un factor de reducción dependiendo solamente del grado de enterramiento.

Pruebas Estacionarias de tubos en trincheras poco profundas.

En 1987 fueron diseñadas varias pruebas para estudiar la reducción de las fuerzas hidrodinámicas experimentadas por tuberías que se encuentran abajo del fondo marino, en trincheras someras (con poca profundidad). Las configuraciones de las trincheras son mostradas en la figura 2.5. De esta manera similar a las pruebas de tubos parcialmente enterrados, se concluyó que el efecto de resguardo de las trincheras podría estar bien representado por la aplicación de un factor de reducción para las historias del tiempo generadas para un tubo totalmente expuesto.

II.2.2.2. Fuerzas de interacción suelo/tubería

El interés en este aspecto del problema fue estimulado por una verificación experimental que las fuerzas hidrodinámicas reales son más grandes que las asociadas con la metodología de diseño tradicional. La estabilidad aparente obtenida del método tradicional de diseño por estabilidad hidrodinámica ha indicado que las fuerzas de resistencia del suelo podrían ser diferentes y más grandes que las supuestas.

Se ha mostrado que cuando un tubo es oscilado de cualquier manera controlada de desplazamiento o fuerza, la tubería tenderá a hundirse bajo el suelo, y la habilidad del suelo para resistir cargas laterales se incrementará. En suelos que están compuestos principalmente de sedimentos marinos ligeros, la tendencia de la tubería a embeberse dentro del fondo marino

puede ser muy pronunciada, esto se puede ver en la figura 2.6. y el incremento de la resistencia lateral del suelo puede ser significativo. Este tipo de incremento en la resistencia lateral del suelo no es considerado en el método tradicional de diseño por estabilidad estática. Recientes investigaciones se han enfocado a la medición de la resistencia de la tubería, y se ha demostrado que aún las oscilaciones de tuberías con diámetros pequeños pueden producir un incremento significativo en la resistencia del suelo debido a la penetración de la tubería dentro del fondo marino.

En 1984 se inició el desarrollo de un programa de computadora, basado en el elemento finito, para el análisis hidrodinámico de tuberías. En los años de 1986 y 1988 se le hicieron mejoramientos y modificaciones a este programa, las cuales incluían lo siguiente:

Incorporación del nuevo modelo para fuerzas hidrodinámicas para tuberías estacionarias.

Modificación del programa para incluir el efecto de embebimiento de la tubería en trincheras poco profundas en fuerzas hidrodinámicas.

Resultados de los cálculos de diseño.

Los resultados del análisis utilizando el método simplificado indican lo siguiente:

En suelos arcilloso, la tubería diseñada con el método tradicional sólo estará estable con pequeños movimientos (menores de 0.5 el diámetro de la tubería).

En suelos arenosos, la tubería diseñada con el método tradicional sólo será estable con pequeños movimientos (menores de 0.5 el diámetro de la tubería).

En suelos con arcilla ligera, el diseño tradicional proporciona datos muy conservativos, los que puede darnos la oportunidad, con el método simplificado, de reducir el lastre de la tubería.

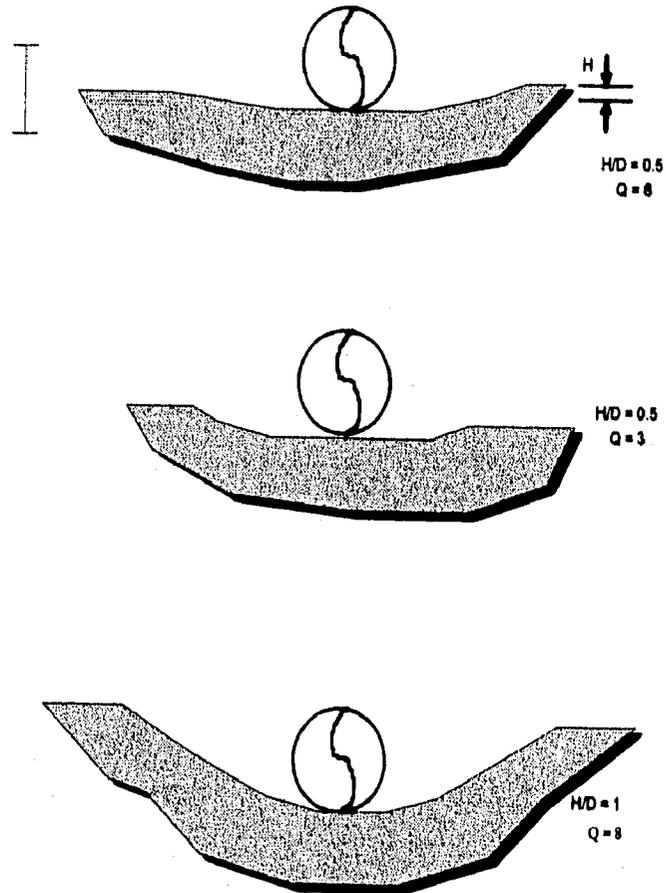


figura 2.5. Configuración de Trincheras.

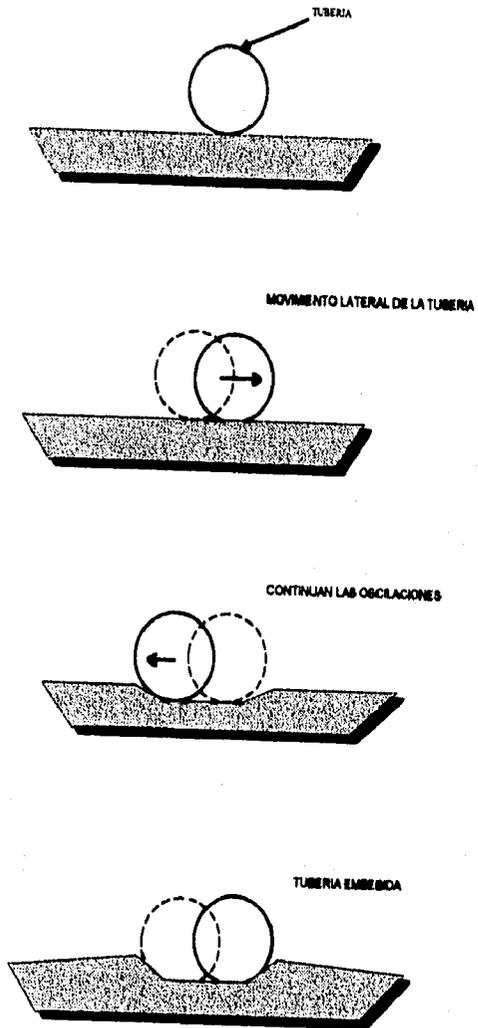


figura 2.6 Embebido de la tubería en Sedimentos Ligeros.

III. PANDEO Y RECUBRIMIENTOS DE LAS TUBERIAS SUBMARINAS

OBJETIVO :

Der a conocer algunos tipos de recubrimientos y protecciones a las tuberías con la finalidad de que sean protegidas adecuadamente contra la corrosión. Así como algunas características del pandeo que sufren las tuberías.

III. PANDEO Y RECUBRIMIENTOS DE LAS TUBERIAS SUBMARINAS

En este capítulo hablaremos principalmente del Pandeo de las tuberías submarinas, así como, de los recubrimientos que estas necesitan, para que sean adecuadamente protegidas contra la corrosión.

Ya que las instalaciones de las tuberías submarinas se mueven dentro de aguas profundas, el problema del colapso de la tubería causado por causado por el incremento de la presión hidrostática puede llegar a ser significativo. El colapso de la tubería depende de muchos factores, incluyendo la relación diámetro/espesor de pared de la tubería, presión hidrostática, ovalamiento inicial, propiedades de deformación y del momento de flexión en la tubería.

El pandeo de la tubería puede ser definido como el ovalamiento excesivo de la sección transversal de la tubería. El pandeo puede ser "seco" cuando la tubería no sufre ruptura o "húmedo" cuando la tubería sufre ruptura y se llena de agua.

Dependiendo de las cargas a que esté sujeta la tubería, uno o más de los siguientes modos de pandeo pueden ocurrir:

- Pandeo local de la pared de la tubería debido a presión externa, fuerza axial y momento flexionante.
- Propagación del pandeo debido a presión externa.
- Pandeo de la tubería como una barra en compresión.

III.1. PANDEO POR SOBREVANTAMIENTO

Cuando una tubería está operando a una presión y temperatura más altas que las del medio ambiente, ésta tratará de expandirse. Si la línea no está libre para expandirse, la tubería desarrollará una fuerza axial de compresión. Si la fuerza ejercida por la tubería en el suelo excede la restricción vertical contra el movimiento de sobretendido creado por el peso sumergido de la tubería, por su rigidez contra la flexión, y por la resistencia del recubrimiento del suelo, la tubería tenderá a moverse hacia arriba, y pueden ocurrir desplazamientos verticales considerables. Entonces, la respuesta de la tubería podría ser inaceptable a causa del desplazamiento vertical excesivo o por la deformación plástica excesiva. El pandeo por sobrelevantamiento es un modo de falla que debe ser tomada en cuenta en cuanto al diseño de tuberías atrincheradas y enterradas.

Para cargas grandes de compresión, la respuesta de la línea de la tubería puede ser inadaptable en términos de desplazamiento laterales, de fluencia excesiva del material de la tubería, o de ambos. Este fenómeno es llamado **SOBREVANTAMIENTO (UPHEAVAL) O PANDEO TERMICO**, también es conocido como inestabilidad por sobre flexión, y constituye un modo de falla que ha sido tomado en cuenta para el diseño de tuberías enterradas o cubiertas sujetas a presiones de temperaturas altas. El pandeo por sobrelevantamiento (upheaval buckling) no es un fenómeno nuevo, ya que se ha demostrado que este fenómeno se ha presentado por años en líneas de tuberías que transportan gas en la costa sobre terrenos ondulados.

Las tuberías que no están ni atrincheradas ni enterradas están más propensas a sufrir el pandeo, en el cual la tubería tiende a zigzaguear lateralmente en la sección lateral del fondo marino.

El pandeo por sobrelevantamiento es un fenómeno que puede ocurrir como el resultado de fuerzas axiales grandes de compresión inducidas en las tuberías por una combinación de presión interna y temperaturas elevadas.

Las líneas de tuberías, que conducen petróleo con diámetro pequeño, restringidas lateralmente sirviendo a campos marginales son vulnerables, y la mecánica de sobrelevantamiento y su prevención han sido recientemente el objetivo de un gran número de estudios.

Estos estudios extensivos de sobrelevantamiento indican que el pandeo se inicia donde el perfil de la tubería es alterado por la irregularidad de la base (lecho marino).

La localización y cuantificación de estas facciones topográficas es de gran ayuda para optimizar los costos del amontonamiento de las rocas.

El pandeo por sobrelevantamiento es impulsado por las fuerzas axiales de compresión inducidas en la tubería por temperatura y presiones altas. Para tuberías de acero convencional, la temperatura tiene el mayor efecto, sin embargo la presión contribuye considerablemente.

El efecto de estas fuerzas adicionales es incrementar los momentos de flexión.

Los análisis detallados de sobrelevantamiento muestran que el pandeo estará en puntos donde la base es convexa, es decir, es regiones de curvatura negativa.

Así que el principal objetivo es localizar y delinear regiones de curvatura negativa.

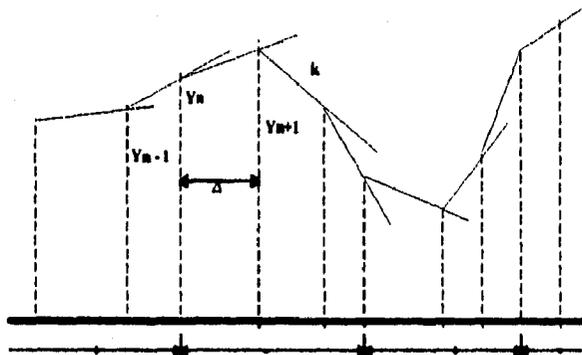


Figura 3.1. Interpretación de la inspección de la curvatura.

Para una línea definida por una serie de ordenadas, pueden determinarse sus pendientes aproximadas de las diferencias entre ordenadas sucesivas.

De la figura anterior, la pendiente esta dada por

$$\theta = \frac{Y_{n+1} - Y_{n-1}}{\Delta} \dots\dots\dots 1$$

y la curvatura sigue de las diferencias entre pendientes sucesivas, es decir

$$K = \frac{(Y_{n+1} - 2Y_n + Y_{n-1}))}{\Delta^2} \dots\dots\dots 2$$

Aunque esta información puede ser usada para estimar los momentos flexionantes inducidos por la topografía del fondo marino en la tubería antes

de entrar en operación, se requieren más análisis para predecir el comportamiento del pandeo por sobrelevantamiento, y la carga necesaria para resistir este fenómeno.

III.1.1. Análisis del Sobrelevantamiento.

La resistencia requerida para prevenir el sobrelevantamiento se muestra en la fig. 3.2 como una función de la longitud de la onda.

El parámetro de resistencia Φ_w se define como:

$$\Phi_w = \frac{WEI}{hP^2} \dots\dots\dots 3$$

Donde:

W = Resistencia contra el sobrelevantamiento por unidad de longitud.

EI = Rigidez a la flexión

h = Amplitud de imperfección

P = Fuerza de empuje

$$= \pi p D^2(1 - 2\nu) + E T A a$$

p = Presión neta interna

D = Diámetro

a = Coeficiente de expansión térmica

T = Incremento de temperatura

A = Area de acero de la sección transversal

La resistencia requerida depende del parámetro de la longitud de onda dado por:

$$\Phi_w = L \left[\frac{P}{EI} \right]^{1/2} \dots\dots\dots 4$$

Donde:

L = mitad de la longitud de la onda de la zona de curvatura negativa

Para determinar la distribución de carga requerida para una tubería dada, se necesita la siguiente información:

Distribución de la fuerza empuje a lo largo de la ruta de la tubería.

Rigidez a la flexión de la sección de tubería.

Localización, longitud de onda, y amplitud para cada fracción

Teoría apropiada del suelo para el medio de cubrimiento.

En la figura 3.3. se muestra el parámetro del momento de flexionante, dado por:

$$\Phi_w = \frac{M}{Ph} \dots\dots\dots 5$$

Donde:

M = momento flexionante en el sobrelevantamiento.

Se debe notar que este momento surge de la combinación de la topografía de la zona y de las cargas operacionales. Si los esfuerzos resultantes exceden los valores permisibles, esto solo puede ser remediado reduciendo la amplitud de la facción (h), por operación adecuada de atrincheramiento.

Otra consideración en la elección del espaciamiento de la inspección es el mínimo requerido para resolver ciertas facciones dañadas. Refiriéndose a la figura 3.1., podemos notar que un cierto rango de longitud de onda

requiere, particularmente, cargas hacia abajo grandes. Esta longitud de la onda es calculada aproximadamente con la siguiente expresión:

$$L = 5.6 \left[\frac{EI}{P} \right]^{1/2} \dots\dots\dots 6$$

Si tal longitud de onda es detectada, será necesario un espaciamiento de inspección no mayor a la mitad de este valor.

Esta consideración ha sido usada para elaborar la tabla siguiente, la cual proporciona separaciones de inspección máxima aproximadas para un rango de diámetros de tuberías y temperaturas de trabajo.

Temperatura °C	Diámetro en metros (pulgadas)			
	0.10 (4)	0.20 (8)	0.30 (12)	0.40 (16)
50	1.57	3.31	4.90	6.17
75	1.31	2.85	4.23	5.34
100	1.15	2.50	3.72	4.71
125	1.04	2.25	3.35	4.25

Tabla 3.1. Espaciamiento máximo de inspección (en metros)

La tendencia de que ocurra el pandeo por sobrelevantamiento está íntimamente relacionada a la forma y magnitud de las imperfecciones del fondo marino en donde la tubería es depositada.

Hay procedimientos extensos, que típicamente requieren la transportación de rocas, cuidadosamente graduadas, a lo largo de grandes distancias para ser exactamente puestas arriba de la tubería por embarcaciones especializadas. De esta manera, existe un gran interés para determinar exactamente el amontonamiento de las rocas requeridas, y

también para saber donde deberán ser puestas a lo largo de la ruta de la tubería.

La magnitud de la carga hacia abajo requerida para prevenir el sobrelevantamiento depende, como ya se mencionó de : la fuerza de empuje (P), la rigidez a la flexión de la tubería (E), la amplitud de imperfección de la base (h) y la mitad de la longitud de la onda (L). Cuando se cuenta con esta información, la carga hacia abajo puede determinarse directamente de la figura 3.1., la cual es una curva empírica basada en el estudio numérico detallado de un rango de contornos de imperfección. Los esfuerzos flexionantes inducidos en el punto de sobrelevantamiento, que pueden intervenir como una consideración en el proceso de prevención contra el sobrelevantamiento, pueden determinarse en la figura 3.3., basada en muchos estudios numéricos.

En la figura 3.4. se puede observar que el sobrelevantamiento sólo ocurrirá en regiones con curvatura negativa (crestas) y nunca en regiones con curvatura positiva (valles). Esto refuerza la necesidad de poner mayor atención en el análisis de revisión en regiones con curvatura negativa.

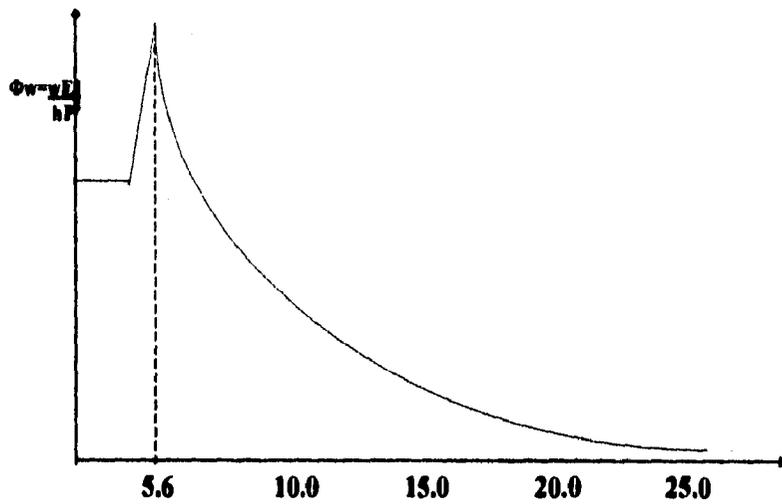


figura 3.2. Carga hacia abajo requerida para prevenir el sobrelevantamiento

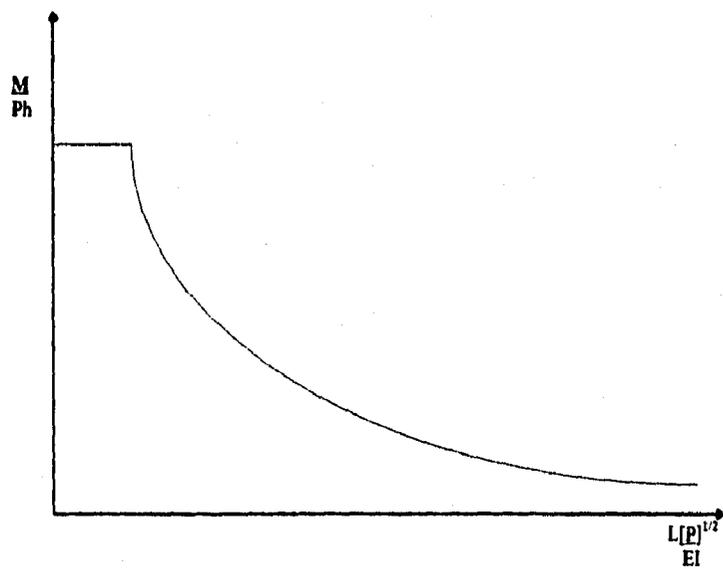


figura 3.3. Momento flexionante en el sobrelevantamiento.

CRESTA



LA REACCION DISMINUYE



EL CLARO AUMENTA

VALLE



LA REACCION AUMENTE



EL CLARO DISMINUYE

figur 3.4. Respuesta Topográfica a carga Axial.

III.2.2. Análisis de Inspección.

El perfil de una tubería sumergida consistirá en regiones alternadas sucesivamente de curvaturas negativas y positivas, delimitadas por puntos de inflexión.

Uno de los objetivos del análisis de inspección es localizar las regiones con una curvatura negativa para asignar valores de longitud y amplitud de onda en cada una, y consecuentemente estimar los esfuerzos de la tubería y los requerimientos de carga hacia abajo para evitar el sobrelevantamiento.

Un análisis de regiones de curvatura usando ordenadas con espacios cortos mostrará sólo tramos de longitudes de onda cortas. Para longitudes de ondas más largas, se requieren ordenadas separadas. Sin embargo, fracciones de longitudes de onda más largas pueden determinarse a partir de ordenadas de longitudes de ondas cortas por "skipping" (brincar) sistemático, por ejemplo ignorando el incremento de números de valores intermedios.

III.2.3. El Efecto de contorno de imperfección en el Comportamiento del Pandeo por Sobrelevantamiento.

Las regiones de deformación altamente localizadas han sido, recientemente, descubiertas en líneas de tubería submarina operando a altas temperaturas.

Estas alteraciones del perfil regular de la tubería, involucrando gran deformación plástica en la pared de la tubería, y fractura de los materiales de recubrimiento, han sido atribuidos al pandeo por sobrelevantamiento.

III.2.3.1. Fenómeno de Sobrelevantamiento.

La introducción de temperatura T y de presión interna p elevadas inducirá una carga axial de compresión, dada, en regiones restringidas completamente, por:

$$P_{eff} = a EAT + p(1-\nu) \frac{D_i}{4} - T_o \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

A = Area de acero de la sección transversal de la tubería

D_i = Diámetro interno.

E = Módulo de elasticidad.

T_o = Tensión residual de tendido.

ν = Relación Poisson.

a = Coeficiente de deformación térmica.

Esta fuerza será reducida en regiones donde el desplazamiento axial sea posible, por ejemplo en risers.

El efecto de esta fuerza es para reducir la reacción de la base en crestas (regiones con curvatura negativa), para presionar a la tubería hacia abajo.

Como una de esto, habrá cambios en la configuración de contacto entre la tubería y la base.

Generalmente, estos cambios progresarán proporcionalmente con el incremento de la fuerza de empuje. Sin embargo, a un cierto nivel de carga, un equilibrio no adyacente puede ser posible, y la tubería deberá a una configuración diferente, usualmente involucrando deformaciones grandes.

Esto es a lo que se le conoce como un pandeo por sobrelevantamiento, los efectos de este fenómeno usualmente ocasionan daños a las tuberías submarinas.

III.2.3.2. Pre - sobrelevantamiento

El comportamiento de la tubería antes del sobrelevantamiento depende mucho de los detalles del contorno de la imperfección.

En la figura 3.5. se muestran los tipos de contornos que se presentan en una tubería que se encuentra sobre el lecho marino.

Un análisis detallado de estas imperfecciones es complicado a causa de la gran variedad de configuraciones intermedias de equilibrio las cuales deben ser consideradas.

Sin embargo, se pueden realizar algunas observaciones para intentar dar respuesta al sobrelevantamiento, estas se refieren principalmente a la magnitud de la amplitud de la imperfección.

Para el soporte aislado, el cual puede ser considerado como una imperfección continua de una longitud de onda muy corta, el comportamiento es lineal y continuo hasta que el sobrelevantamiento ocurre cuando el contacto se pierde.

Para imperfecciones continuas de pequeña amplitud, la temperatura de sobrelevantamiento puede alcanzarse antes de que se complete la separación.

Para amplitudes más largas, la separación completa puede coincidir otra vez con el sobrelevantamiento. Para amplitudes muy largas la respuesta

de la temperatura puede estar a todo lo largo, sin sobrelevantamiento como tal, aunque las deformaciones y los esfuerzos van a ser, muy probablemente, inaceptables por ser muy altos.

III.2.3.3. Post-Sobrelevantamiento.

La configuración del post-sobrelevantamiento es común para las bases de datos de todo tipo. En la condición de post-sobrelevantamiento, la fuerza axial se reduce y los movimientos axiales significantes ocurren conforme la tubería avanza dentro de la región pandeada.

Arriba del punto de sobrelevantamiento, sin embargo, varios estudios indican que los cambios en los efectos de fuerza axial y fricción axial son despreciables.

Desde el punto de vista analítico, si uno está ligado con el comportamiento superior del sobrelevantamiento, y con la prevención del mismo, la fuerza de empuje P puede tomarse como una constante, cantidad calculada separadamente.

Esto es de gran ayuda para el diseñador, quien además puede considerar a la fuerza de empuje en el punto de sobrelevantamiento expresada en términos de los valores de diseño requeridos de temperatura y de presión.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

III.2.4. Formulaciones Simplificadas para el Diseño Final.

Una solución completamente analítica es la mayoría de los casos de problemas sobrelevantamiento es impráctica. Esto es, si uno requiere incluir los efectos de resistencia al sobrelevantamiento no lineal, no uniforme; contorno irregular de la base; flexibilidad y plasticidad de la base, un programa de elemento finito tal como el software UPBUCK es esencial.

En este sentido se ha tenido algún progreso, sin embargo, por la atención restringida para tuberías cargadas uniformemente que descansan sobre bases rígidas, con imperfecciones simétricas aisladas de forma analítica.

Estos contornos pueden ser considerados para representar a las crestas de un perfil real del fondo marino.

Para solucionar esto para cualquier contorno en particular, se requiere una serie laboriosa de pruebas involucrando la solución analítica de relaciones no lineales simultáneas.

Una consideración importante en el diseño práctico contra el sobrelevantamiento es la determinación de la amplitud, la longitud de onda, el contorno y la localización de las imperfecciones, existentes por debajo de la tubería.

La información se obtendrá de una inspección que consistirá en ordenadas verticales relativas a algunos datos, más o menos espaciados igualmente a lo largo de la ruta de la tubería.

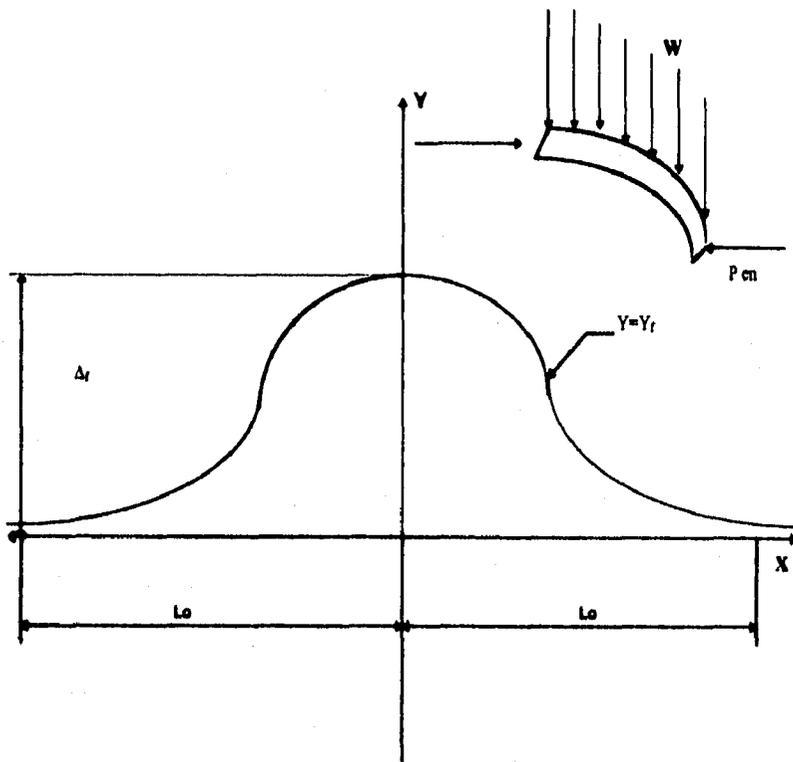


figura 3.5. Tubería y Anotación de la Base.

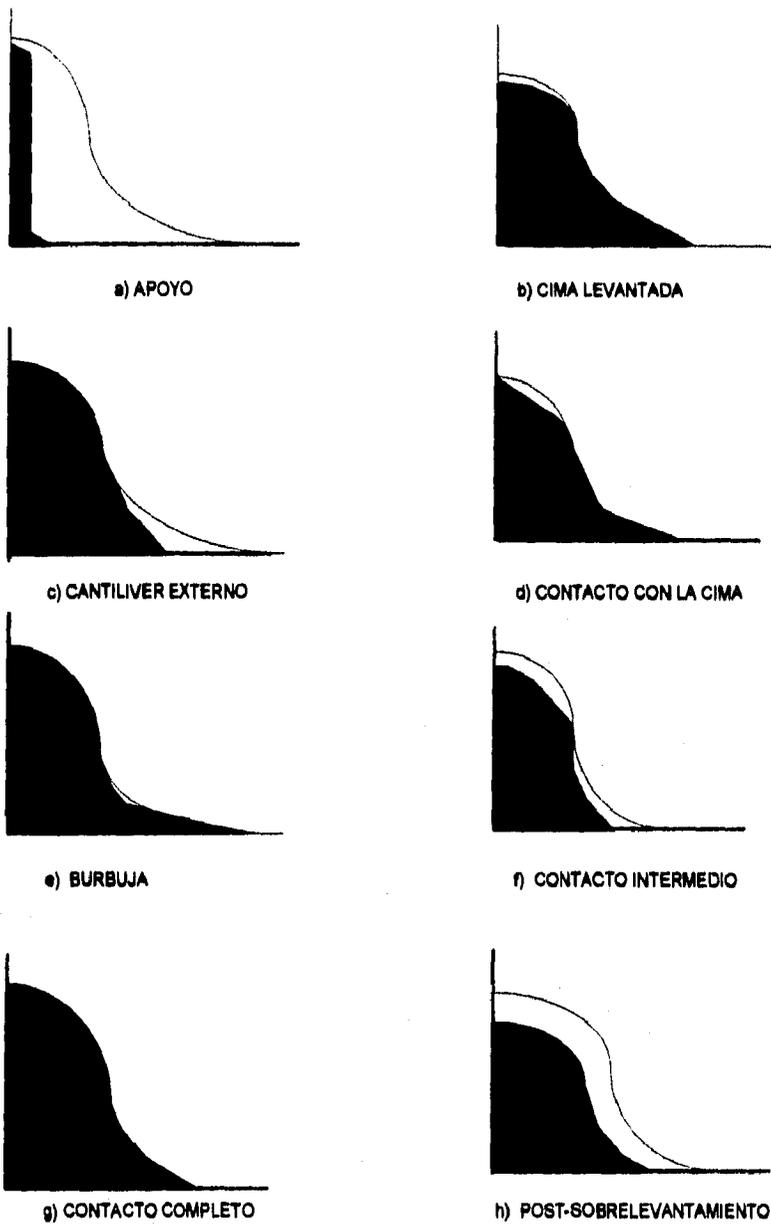


figura 3.6. Configuraciones de Contacto.

La interpretación de estos datos es una labor muy grande. Esto con el fin de identificar y localizar los tramos del fondo marino en base a los datos de la inspección, proporcionando información de la localización y de la longitud de onda de la imperfección, junto con estimaciones preliminares de la distribución del recubrimiento requerido del suelo para prevenir el sobrelevantamiento.

III.3. Recubrimientos externo para tuberías y para juntas de campo.

El recubrimiento externo debe ser llevado a cabo para proporcionar una protección adecuada de la tubería contra la corrosión.

Las diferentes partes el sistema de la tubería submarina deben ser recubiertas de una manera adecuada cumpliendo con los requisitos de las especificaciones de recubrimiento de tubería. Tales partes son:

- Recubrimiento de la tubería.
- Recubrimientos de las juntas de campo.
- Recubrimientos de soportes.

III.3.1. Material de Recubrimiento

Los siguientes tipos de protección externa pueden ser usados para la protección contra la corrosión:

- Esmaltes de alquitrán de hulla y mastique asfáltico, normalmente en combinación con el lastre de concreto para tuberías y risers sumergidos.
- Epóxico y epóxico de alquitrán de hulla para la parte atmosférica de los risers.
- Mastique asfáltico o epóxico para recubrimiento de las juntas de campo.

Quando se selecciona un recubrimiento externo para un sistema de tubería submarina se deben tomar en cuenta las siguientes propiedades:

- Adhesión.
- Durabilidad o resistencia por deterioración química, física y biológica.
- Rango de la temperatura de servicio.
- Flexibilidad
- Resistencia contra el impacto
- Reparación de recubrimiento

En adición a las propiedades dadas anteriormente la especificación del recubrimiento va a incluir la siguiente información:

- Composición y tipo genérico.
- Espesor del recubrimiento.
- Primario (primer).
- Reforzamiento.

III.3.2. Recubrimiento de las juntas de campo.

El recubrimiento de las juntas de campo debe ser aplicado de manera similar a lo establecido para la aplicación anterior.

La preparación de la superficie por cepillado para un terminado uniforme del metal puede ser aceptado para recubrimiento de juntas de campo por medio de asfalto o de alquitrán de hulla.

Cuando se usa mastique para recubrir juntas de campo, es necesario poner especial importancia para conservar la temperatura del mastique dentro de los límites aceptables.

III.4. Protección Catódica

La protección catódica se basa generalmente en ánodos de sacrificio.

La protección catódica por medio de ánodos de sacrificio se diseñará para proporcionar una protección adecuada durante la vida de diseño de la tubería submarina.

Las especificaciones de diseño para protección catódica deben incluir:

- Cálculo de área que va a ser protegida.
- Influencia de los sistemas conectados eléctricamente.
- Requerimiento de la densidad de corriente.
- Criterio de recubrimiento.
- Peso, distribución y número total de los ánodos.
- Cálculo de la efectividad del sistema.

Los ánodos de sacrificio pueden ser aleaciones de aluminio o de zinc. La superficie de los ánodos de sacrificio serán examinadas 100% visualmente. La superficie del ánodo estará libre de recubrimiento y fugas que afecten la eficiencia del ánodo.

Los arreglos de ánodos estarán en concordancia con la especificación de diseño aprobada. Los ánodos deben ser colocados de tal manera que se evite el daño mecánico durante el transporte y durante la instalación de la tubería. Es recomendable que los ánodos más pequeños que el lastre de concreto.

La conexión entre el ánodo y la tubería es normalmente realizada por medio de soldadura eléctrica manual o soldadura térmica.

IV. CONSTRUCCION DE TUBERIAS SUBMARINAS

OBJETIVO:

Mostrar algunos métodos de construcción de las tuberías submarinas.

V. Construcción de Tuberías Submarinas

IV.1. Métodos de Construcción de Tubería Submarina.

Hay varios métodos de construcción de tuberías submarinas, entre los cuales se incluyen los siguientes:

Barcaza Convencional de Tendido, Barcaza-Carrete, Barcaza de Arrastre, etc. Algunos de estos métodos son más adecuados para una aplicación en particular que otros, por ejemplo, algunos métodos son particularmente usados para la construcción de tuberías submarinas de diámetro pequeño.

IV.1.1. Método de la Barcaza Convencional.

La tubería es entregada a la barcaza de tendido en juntas sencillas o dobles por un barco de carga (longitudes de 6 o 12 metros, respectivamente). Una grúa de cubierta transfiere la tubería a los bastidores de almacenaje sobre la barca de tendido. Durante el tendido, la grúa transfiere la tubería de los bastidores de almacenaje a un bastidor automatizador para alimentar la tubería a la tabla donde se forma una hilera. La tabla de hilera es la primera posición (estación de trabajo) de la línea de producción para soldar la tubería y para examinar esta soldadura por pruebas no destructivas. Las barcazas de tendido pueden tener de 5 a 12 estaciones de trabajo, dependiendo del tamaño de la barcaza y del diámetro de la tubería que va a ser soldada.

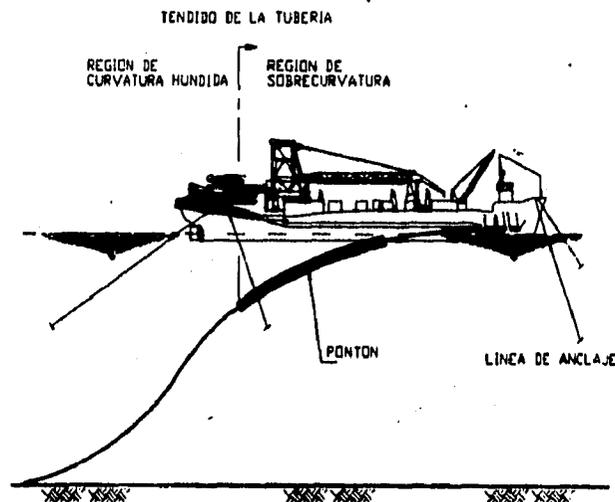


figura 4.1. Método Convencional de la Barcaza de Tendido.

Después de las juntas de las tuberías son soldadas, las juntas de campo son cubiertas con recubrimiento anticorrosivo (y algunas veces con lastre de concreto). Las operaciones de tendido de la tubería continúan, con tubos soportados por los rodillos y stingers (pontones) antes de ser movidos al lecho marino.

El proceso de tendido de la tubería se inicia soldando un tapón, el cual evita la entrada del agua del mar a la tubería, al primer tramo de la tubería. Sobre el tapón se suelda un ojal, el cual servirá para enganchar sobre ella un cable de acero. En el otro extremo del cable se coloca una ancla, la cual será lanzada al fondo marino. El cable se hace pasar por el pontón y a lo largo de la línea de montaje hasta un malacate, con el que se logra la tensión inicial requerida. Conforme se van adicionando tramos de la tubería, la barcaza va avanzando sobre las líneas de anclaje. Maniobrando doble con las anclas de proa y liberando en las de popa.

El pontón de la barcaza ayuda a soportar la tubería y forma una curva "S", como la tubería es tendida en el fondo marino. Los rodillos son instalados en las secciones de los pontones para soportar a la tubería durante el bajado de ésta.

En la figura anterior se puede observar dos regiones: La región de curvatura superior, que es la que se encuentra sobre el pontón, y la región de curvatura inferior la cual es la región de tubería que ha dejado de ser soportada por el "Stinger" (pontón).

La curvatura en la región de curvatura superior es usualmente controlada por la posición propia de los soportes de la rampa y por la posición de la curvatura del pontón. La deformación debida a la flexión está dada por:

$$\epsilon = D/2R$$

Donde:

D = Diámetro externo de la tubería.

R = Radio de curvatura en la curvatura superior

Las unidades de D y R deben ser las mismas.

El esfuerzo axial de flexión correspondiente es:

$$\sigma = ED/2R$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del acero.

El radio mínimo de la curvatura superior puede ser:

$$R = ED/2\sigma_0DF$$

Donde:

σ_0 = Esfuerzo mínimo especificado de fluencia de la tubería

DF = Factor de diseño, tomado usualmente como 0.85.

IV.1.2. Método de la Barcaza-Carrete.

El método de la barcaza-carrete de tendido de tubería submarina usa una longitud continua de tubería enrollada en un carrete. El ensamblaje de esta cuerda de tubería es hecha Costadentro, y la prueba no-destructiva es completada anterior a enrollar la tubería. El inicio del tendido de la tubería es similar al tendido de la barcaza convencional. Este método es ilustrado en la siguiente figura.

Los paquetes de tubería pueden ser instalados por una barcaza con carrete. Las tuberías son atacadas juntas cuando éstas son cargadas en carretes en las instalaciones de la costa.

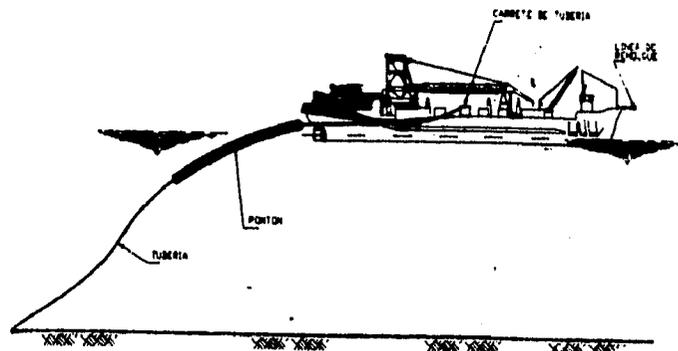


figura 4.2. Método de la Barcaza-Carrete.

La iniciación del tendido de la tubería es similar a las operaciones de la barcaza de tendido convencional. El soporte Costafuera para la operación de la barcaza-carrete es generalmente limitada a una embarcación de remolque.

Este método ha sido generalmente usado para el tendido de tuberías de diámetro pequeño en profundidades de agua relativamente someras.

Las principales ventajas del método de la Barcaza-Carrete son:

- Mejor control de la producción en las instalaciones de Costadentro.
- Poco impacto de las condiciones ambientales adversas debido a la gran velocidad de la instalación de la tubería.

- Habilidad para ensamblar y enrollar la tubería de varios tamaños para instalación secuencial.
- Habilidad para ensamblar y enrollar la tubería paquetes de tubería.

Las principales desventajas del método de la Barcaza-Carrete son:

- Limitación del tamaño máximo de tubería de 10 a 16 pulgadas de diámetro.
- Mayores espesores de pared de la tubería requeridos para enrollar.
- Longitud limitada de tubería la cual puede ser embobinada en un carrete sencillo.

IV.1.3. Método de Remolque

Los métodos de remolque para la construcción de tubería submarina, como el método de carrete, ofrecen la ventaja de ensamblar la tubería Costadentro. También, el remolque requiere embarcaciones relativamente pequeñas para la transportación de paquetes de tubos al sitio de instalación. Cuatro métodos de remolque han sido desarrollados y demostrados comercialmente. Estos métodos son:

- Remolque de superficie.
- Remolque debajo de la superficie.
- Remolque sobre el fondo marino.
- Remolque cerca del fondo marino.

IV.1.3.1. Remolque de superficie y debajo de la superficie.

El remolque de superficie, como se muestra en la figura 4.3., utiliza flotadores para soportar la tubería en la superficie del agua. El método de remolque debajo de la superficie, ilustrado en la figura 4.4., utiliza mecanismos de flotación para soportar la hilera de la tubería bajo la acción de la ola significante. Las boyas tipo pértiga, o de larguero, son usadas generalmente para limitar la cantidad de movimiento de la superficie transferida a la línea de la tubería.

En suma, además de la embarcación primaria de remolque, se requiere una embarcación para el control de la fila de flotación en ambas técnicas de remolque de superficie. Esta embarcación de retención puede ser más pequeña que la embarcación principal de remolque.

En el sitio de tendido, la tubería se baja por un procedimiento desarrollado para la instalación específica.

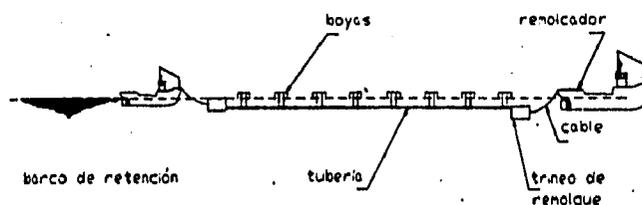


figura 4.3. Remolque de Superficie.

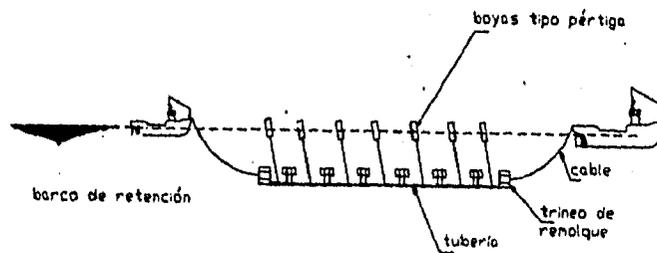


figura 4.4. Remolque debajo de la Superficie.

La selección de remolque en la superficie o debajo de la superficie depende de las condiciones de la superficie a las condiciones, de la exposición al tráfico marino, y las condiciones especiales requeridas para bajar la tubería, las cuales pueden incluir incremento en las cargas de jalado hacia abajo debido a los tanques de flotación.

Un grupo de firmas francesas desarrolló un procedimiento para la instalación de tuberías submarinas conocido como RAT, Remorquage (remolque), Aboutage (ensamblaje), Tensión (tensión). Este es una combinación donde una barcaza de tendido se utiliza para bajar la tubería al fondo marino, pero un remolque se superficie o cerca de la superficie es usado para suministrar grandes longitudes de tubería a la barcaza. Este

método minimiza el trabajo Costafuera y también reduce el tamaño y complejidad de la barcaza. Esto se ilustra en la figura 4.5.

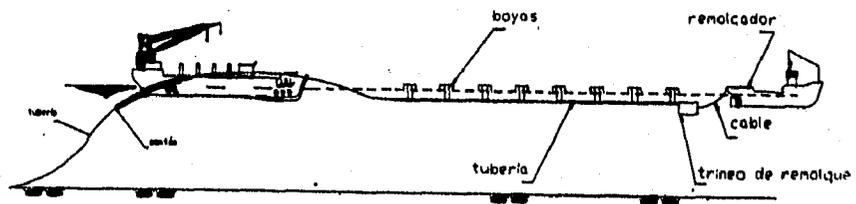


figura 4.5. Método RAT de Tendido.

IV.1.3.2. Remolque cerca del fondo marino.

El remolque cerca del fondo marino es una adaptación de la técnica de remolque debajo de la superficie. También requiere de una embarcación primaria de remolque y de una embarcación pequeña de detención. Los tanques de flotación se unen a la tubería a intervalos específicos, y los trineos de remolque y de detención son sostenidos a flote. Longitudes de cadenas están suspendidas de los tanques de flotación. Este método se ilustra en la figura 4.6.

Si la ruta del remolque incluye áreas donde existan corrientes que pudieran afectar la estabilidad de la tubería, la longitud de la cadena que jala hacia el fondo marino puede ser diseñada para proporcionar una fuerza de estabilización.

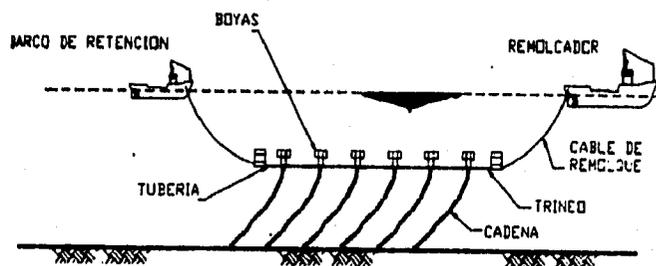


figura 4.6. Remolque arriba del fondo.

Las principales ventajas que este método ofrece son:

- Requerimientos relativamente bajos de caballos de fuerza.
- La exposición a otro tráfico marino está limitado a áreas de aguas someras.
- La exposición a condiciones ambientales adversas es significativamente reducida.

La principal desventaja de este método para instalaciones en aguas profundas está en el diseño y economía de los sistemas de flotación.

IV.1.3.3. Remolque sobre el fondo marino.

Este remolque requiere de ciertas condiciones de diseño las cuales difieren de los criterios de las otras técnicas de remolque. Esta diferencia en el diseño es principalmente porque toda la línea de la tubería está en constante contacto con el fondo marino como se ilustra en la figura 4.7.

Las principales desventajas de este método en comparación con los otros métodos de remolque de tubería submarina son:

- Exposición mínima a condiciones ambientales severas
- Seguridad con la cual la tubería puede ser abandonada temporalmente si las condiciones ambientales exceden los límites de la embarcación de remolque.
- Este método no requiere una embarcación de detención.

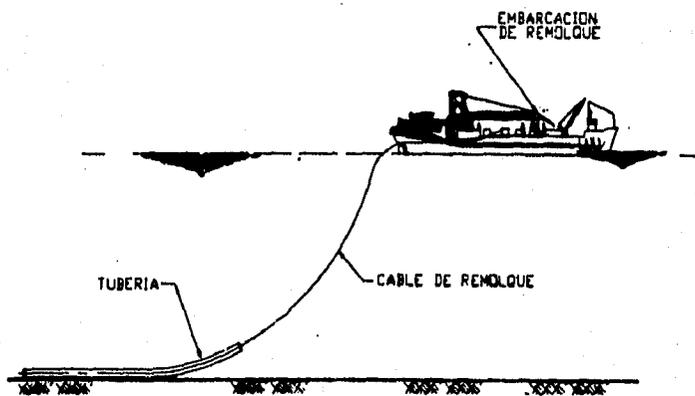


figura 4.7. Remolque en el fondo marino.

Las principales desventajas son:

- Altos requerimientos de caballos de fuerza para la embarcación de remolque.
- Exposición al daño del recubrimiento de la tubería.
- Gran potencial de que la tubería pueda ser atrapada en obstrucciones del fondo marino.

IV.2. Desarrollos Actuales.

En años recientes, la industria Costafuera ha mostrado gran determinación para desarrollar proyectos en aguas más profundas. Esto ha resultado en que las fronteras del tendido en aguas profundas tengan que ampliar sus límites.

El tendido de la tubería submarina es típicamente llevado a cabo y sea utilizando una configuración del tendido en forma de "S" o de "J" por medio de los métodos de barcaza de tendido o del tendido con carrete como lo es el tendido con la embarcación Stena Apache. El Stena Apache utiliza esencialmente el método de tendido en forma de "J" sobre una rampa de ajustable la cual es alimentada de tubo por el carrete. El carrete es cargado con tubería en una base de soldado localizada en una área conveniente Costadentro.

La progresión de la profundidad de tendido de tubería para el barco Stena Apache se ha incrementado rápidamente en lo últimos 5 años, de un promedio de profundidades de agua de 140 metros en el Mar del Norte, a

trabajos recientemente efectuados en las afueras de Brasil a una profundidad de 1900 m.

La industria esta actualmente dirigiéndose a tender tubería en aguas más profundas, por ejemplo a 1800 metros en el Golfo de México y a 300 metros en el Mar Arabe.

El Stena Apache es una embarcación especializada en el tendido de tubería submarina, única en su técnica para el transporte de tubería por el uso de un gran carrete montado verticalmente, mostrado en la figura 4.8. El carrete tiene unas medidas de 25 metros de diámetro con un eje de 16.5 metros de diámetro y tiene una capacidad para transportar 1815 toneladas de tubería. Esta embarcación, construida en 1979, fue diseñada para instalar tubería submarina en profundidades mayores de 600 metros.

Las líneas de tubería prefabricadas son embobinadas en su carrete en una base Costadentro, esto minimiza la duración de las operaciones requeridas en campo para las operaciones de tendido de la tubería.

Durante el tendido, la tubería es desembobinada del carrete y guiada vía un alineador a un enderezador en una rampa desplegada. La línea de la tubería pasa hacia el enderezador, baja la rampa y después al agua. La rampa inclinada es ajustable entre 18° y 60°, permitiendo que la embarcación sea configurada para operaciones en aguas someras o en aguas profundas. Un sistema de monitoreo de la tubería provee información en la geometría y en los esfuerzos de la misma.

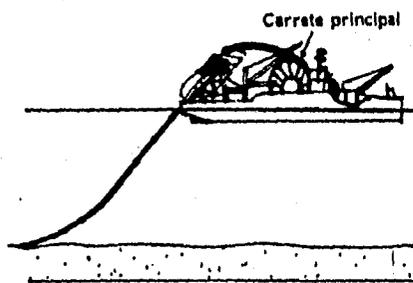
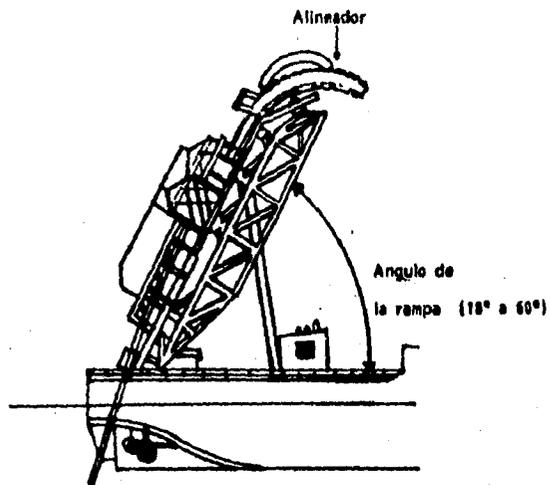


Figura 4.8. Embarcación "STENA APACHE"

Un rango típico de tendido para tuberías de gran diámetro está arriba de los 500 metros por hora. Este puede ser influenciado por factores tales como topografía del lecho marino, ancho del corredor tendido, el espaciamiento de los ánodos y detensores del pandeo, y las condiciones ambientales prevalecientes.

Dos de los problemas inherentes con el tendido de tubería en aguas profundas son las grandes catenarias de la tubería y las grandes tensiones requeridas para soportar la tubería suspendida. Las longitudes de la catenaria y las tensiones son reducidas mediante el incremento del ángulo de partida de la tubería de la embarcación.

Análisis preliminares indicaron que para el tendido de una tubería a 900 metros de profundidad, los ángulos de partida de la tubería deben ser por lo menos de 70° . El ángulo máximo de la rampa de Stena Apache es de solamente de 60° , pero el incremento en el ángulo de partida resultaría en reducciones de tensión de alrededor del 25% sin incrementos críticos en los esfuerzos de la misma.

Los rodillos nuevos de soporte de la tubería en la rampa son ajustables para permitir que sus alturas sean modificadas para imponer una curvatura a la rampa. Esta nueva configuración provee un soporte para llevar la tubería en la rampa a más de 10° hacia la vertical, llevando la tubería al ángulo requerido de 70° . El incremento en el ángulo de partida de la tubería también reduce los esfuerzos en la misma.

Los desarrollos potenciales en el Golfo de México pueden requerir el tendido de tuberías a 1800 metros de profundidad. El estudio de un caso ha sido desarrollado para evaluar la factibilidad de tender tubería en

profundidades de aguas de 1800 metros. Los análisis indican que con su capacidad de tensión y con una inclinación de partida de aproximadamente 70° , una tubería de 14" de diámetro API-5L con un espesor de pared de 16.8 mm (0.66") puede ser instalado en estas profundidades de agua. Este espesor de pared sería adecuada para resistir el colapso hidrostático pero no para resistir la propagación del pandeo para lo cual se requeriría un espesor de 27.8 mm (1.094"). Esta tubería con un espesor más grande es impracticable debido a las tensiones excesivas que serían requeridas por el Stena Apache para soportar su gran peso.

Para la tubería de espesor de pared más grueso (27.8 mm), el esfuerzo calculado de flexión excedió el permisible a una profundidad de agua de 1300 metros, mientras que los esfuerzos en la tubería de espesor de pared más delgado (16.8 mm) permanece abajo del permisible a una profundidad de 1800 metros.

La propagación del pandeo se inicia en un tubo cuando una deformación mecánica de la sección genera una abolladura local. En operaciones propiamente controladas, el riesgo de que ocurra una deformación es muy baja y surgiría solo por un accidente. Por ejemplo, en el Stena Apache, si las tensiones se redujeran, el soporte excesivo en el último rodillo en el mar puede causar una abolladura en la tubería, como pudiera ser un objeto dejado caer que se impactaría en la tubería in-situ. El riesgo de la propagación de pandeo en la tubería puede reducirse grandemente por el uso de detensores de pandeo. Estos mecanismos incrementan la rigidez de la tubería y detienen la propagación del pandeo entre dos detensores.

Se han llevado a cabo análisis para determinar un rango de diámetros de tubería y los espesores de pared que podrían ser instalados con un gran margen de seguridad por el Stena Apache en profundidades de agua al menos de 1800 metros. Los tamaños deseables de la tubería, resistiendo el colapso hidrostático y requiriendo tensiones aceptables en la embarcación, son como sigue:

200 mm (8") diámetro externo x 12.7 mm/ 15.1 mm de espesor de pared.

254 mm (10") diámetro externo x 12.7 mm/15.1 mm de espesor de pared.

305 mm (12") diámetro externo x 14.3 mm de espesor de pared.

355 mm (14") diámetro externo x 15.9 mm de espesor de pared.

Ninguna de estas tuberías es adecuada para resistir la propagación del pandeo y se propone que los detensores del pandeo sean empleados para mitigar el efecto de tal eventualidad.

IV.2. Atrincheramiento o Enterramiento.

La operación de atrincheramiento de una tubería se define como el proceso de hacer una excavación en el fondo marino dentro de la cual la tubería permanecerá. La trinchera puede llenarse eventualmente por procesos naturales.

La operación de enterramiento es definida como el proceso de atrincherar una tubería y después llanar la trinchera. Este llenado puede ser llevado a cabo de manera natural o por medio de equipo mecánico.

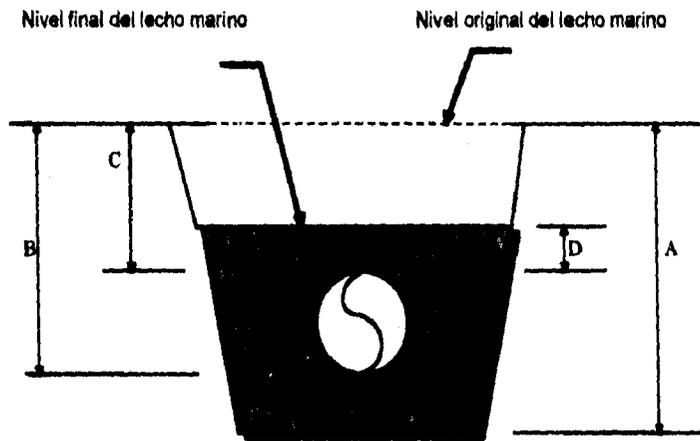
En este trabajo, a menos que se especifique otra cosa, el atrincheramiento y el enterrado serán tomados como el mismo procedimiento. Los parámetros del atrincheramiento están definidos en la figura 4.9. Como se puede observar en esta figura, la profundidad del enterrado es diferente a la profundidad del atrincherado.

El atrincherado de una tubería puede ser hecho usando tres diferentes modos:

Pre-atrincheramiento. En el cual la trinchera es hecha anterior a la instalación de la tubería.

Atrincherado simultáneo. En donde el atrincheramiento ocurre durante el proceso de instalación de la tubería.

Post-atrincheramiento. Donde el atrincheramiento es hecho subsecuentemente a la instalación de la tubería.



- A = Profundidad de la trinchera.**
- B = Profundidad de bajado de la tubería.**
- C = Profundidad de enterramiento.**
- D = Profundidad de cubrimiento.**

figura 4.9. Parámetros del atrincherado de una tubería.

IV.2.1. Factores que afectan el proceso de atrincheramiento.

Un gran número de factores son considerados para determinar los requerimientos del proceso de enterrado de una tubería. Estos factores incluyen las fuerzas hidrodinámicas en la tubería durante su tiempo de vida; tramos no apoyados, obstrucciones, y otros aspectos que pueden ser encontrados a lo largo de la ruta de la tubería; pendientes muy pronunciadas; y gran potencial de contacto con las anclas de los barcos que puedan interferir con la tubería.

Efectos Hidrodinámicos.

Una tubería Costafuera se diseña para que permanezca estable en el fondo marino durante su vida útil, debe ser diseñada con un peso adecuado para asegurar su estabilidad mientras este expuesta o enterrada bajo el fondo marino.

Los efectos hidrodinámicos son usualmente, más críticos en la zona cerca de la costa que en el área Costafuera. En muchos casos, el recubrimiento de concreto de la tubería requerido para la estabilidad puede llegar a ser extremo, causando complicaciones en el manejo de la tubería durante su construcción. Es por lo anterior, que muchas tuberías son normalmente atrincheradas.

Tramos no apoyados y obstrucciones.

Cuando los tramos no apoyados de la tubería están expuestos a flujos de corriente cerca del lecho marino, estos tramos pueden vibrar debido a la formación de vórtices. Obstrucciones, tales como lomas, pueden existir sobre el fondo marino a lo largo de la tubería. Estas obstrucciones pueden inducir esfuerzos excesivos de flexión en la tubería, incrementando así los riesgos de daño en la tubería.

Disminución de la resistencia del suelo debido a fuerzas del oleaje.

Cuando una tubería permanece sobre el fondo marino o embebida en él, la estabilidad del suelo a lo largo de la ruta de la misma se examina bajo condiciones estáticas y bajo condiciones de presiones causadas por el paso de una superficie de ola. Si la tubería está parcial o totalmente enterrada, en condiciones de tormenta puede flotar o hundirse, dependiendo del peso de la tubería (incluyendo contenidos), de la densidad del suelo, y de la resistencia al corte del suelo.

Actividades de Pesca.

Los modos de posibles daños debido a actividades de pesca dependen del tipo de mecanismos de pesca usados en el área y los posibles tramos expuestos a lo largo de la ruta. El impacto de embarcaciones de pesca contra la tubería puede causar daños en el recubrimiento de concreto, dependiendo del tamaño y la velocidad del impacto de embarcación.

Anclado

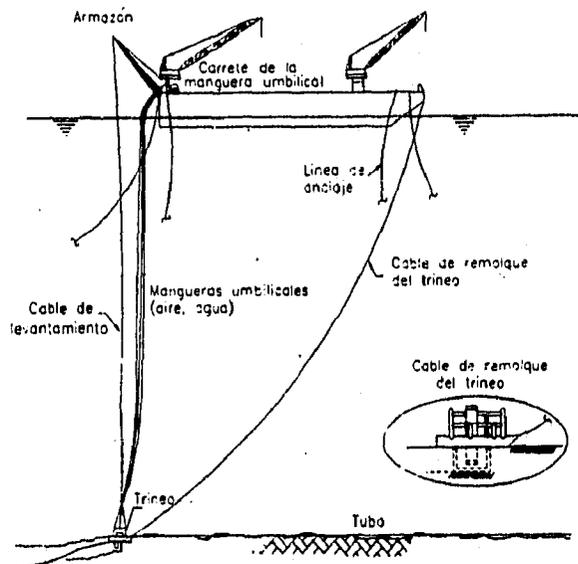
Una tubería submarina puede estar sujeta a interferencias de anclas cuando está instalada en una área de anclado. El riesgo de daño en la tubería debido al anclado puede ser minimizado si la tubería es atrincherada abajo de la profundidad de penetración de la ancla. La profundidad de penetración de la ancla en una área dada depende del tamaño de la ancla, características del suelo, y de la altura a la cual es lanzada.

IV.2.2. Método de Atrincheramiento.

Método Jettling (A chorro)

Este es el método más común para atrincherar una tubería. Como su nombre lo dice, este método consiste en arrojar chorros de agua o de aire sobre el lecho marino por donde va a pasar la tubería submarina y así formar la trinchera. Este método se ilustra en la figura 4.10.

Sin embargo, desde los primeros usos de este método, poco ha sido hecho para mejorar la operación en aguas profundas, es decir, este método es más eficaz en aguas someras (poco profundas), por lo que es usado principalmente en aguas poco profundas, sin embargo también puede usarse en aguas profundas. Los sistemas de succión de aire son poco efectivos para remover el suelo en aguas profundas, debido al incremento de la presión hidrostática.



4.10. Método Jetting (A Chorro)

Método de Fluidización.

Los métodos de fluidización están diseñados para condiciones de suelos no cohesivos. Este método es más efectivo en arena y sedimentos poco cohesivos, tales como arcillas limosas. La fluidización involucra forzar un gran volumen de agua dentro del suelo que rodea a la tubería, reduciendo así la densidad del mismo y permitiendo que la tubería se entierre en el suelo.

La principal ventaja de este método es que, durante la fluidización, la tubería es cubierta inmediatamente con arena y la operación de tapar la tubería, para protegerla, se lleva a cabo satisfactoriamente.

La principal desventaja de este método es que sólo es efectivo en suelos arenosos, y a lo largo de la ruta de la tubería, se encuentra comúnmente considerables en el tipo de suelo. Otra desventaja es que el equipo de fluidización es voluminoso y requiere grandes cantidades de agua.

Método Plowing (zurcar)

Existen tres diferentes modos de acanalar, estos son:

Prezurcado. Se llama así al procedimiento donde un ancho de terreno, por donde pasará la tubería, es cortado previamente a la instalación de la misma. Este método ha sido usado para formar trincheras en profundidades de agua de hasta 130 m. para tuberías de 36" de diámetro. La trinchera podrá permanecer abierta hasta que la tubería sea puesta dentro de la misma, aunque en algunos casos, las corrientes en el fondo marino pueden causar que el material regrese a la trinchera antes de que la tubería sea bajada. Este método no es favorable para aguas profundas.

Zurcado Simultáneo. Se llama así al procedimiento donde la trinchera es hecha en una operación simultánea con la instalación de la tubería. Esta técnica ha sido usada con instalaciones de embarcaciones de tendido en aguas poco profundas. Este método es efectivo sólo en aguas someras.

Postzurcado. Se llama así al procedimiento donde la trinchera es cortada en una operación separada después de que la tubería ha sido instalada en el fondo marino. Las principales ventajas de este modo son: que puede ser usado en aguas profundas, que tiene un gran rango de producción, y que puede proteger rápidamente a la tubería después de su instalación.

IV.2. 3. Factores que intervienen en el Atrincheramiento.

Cabe hacer mención que la eficiencia de un método de atrincheramiento depende de muchos factores, incluyendo el tipo del suelo, tamaño y peso de la tubería, profundidad del agua, estado del mar, estabilidad de la trinchera, por citar algunos.

Los parámetros del suelo son los más importantes. Estos parámetros incluyen la densidad del suelo, contenido del agua, resistencia al corte, índice de plasticidad, ángulo de fricción, distribución granular, y permeabilidad. Por ejemplo la resistencia al corte del suelo decrece cuando el contenido de agua es incrementado, generalmente las máquinas de atrincheramiento son más eficientes en cortar el suelo con contenidos altos de agua.

También, la eficiencia d la operación de atrincherar es altamente afectada por la profundidad del agua.

En operaciones convencionales de atrincheamiento, el suelo debe ser removido, permitiendo así, que la tubería se introduzca dentro de la zanja. La cantidad de suelo que va a ser removido se incrementa substancialmente para una tubería de diámetro grande.

El efecto del peso sumergido de la tubería es significativo para determinar la eficiencia d la operación del atrincheramiento.

La estabilidad de la trinchera es determinada por el tipo de suelo que va a ser cortado. En suelo arcillosos se puede tener trincheras con taludes casi verticales. Sin embargo, el atrincherar en suelos frecuentemente produce trincheras con inclinaciones de sus taludes muy pequeños.

IV.3. Inspección.

IV.3.1. Aspectos Generales.

Las áreas de un sistema de tubería submarina pueden requerir inspección después de una de las siguientes eventualidades:

- Eventos ambientales de gran significancia.
- Contactos significantes de la tubería con objetos tirados al mar o escombros que se encuentran flotando en la superficie marina.
- Cualquier evidencia de movimiento inesperado.

- Cualquier otra condición que pueda afectar adversamente la estabilidad, integridad estructural o seguridad del sistema de tubería submarina.

El daño que afecte o pueda afectar a la tubería debe ser reportado por el operador al supervisor para la examinación de este daño. Todas las reparaciones que considere el supervisor deben ser llevadas a cabo para el adecuado funcionamiento de la tubería.

Los supervisores estarán capacitados para inspeccionar un sistema de tubería en cualquier momento que ellos consideren razonables. El operador notificará a los supervisores en todas las ocasiones cuando partes del sistema, no accesible ordinariamente, van a ser examinadas. Si en cualquier visita un supervisor encuentra un área que el considere que deba ser reparada, él debe notificarle al operador inmediatamente para tomar una acción apropiada. Al menos se debe llevar a cabo la inspección completa de la tubería una vez al año.

Se debe elaborar un manual de mantenimiento el cual proveerá un procedimiento detallado para inspeccionar un sistema de tubería y así asegurar que la tubería trabaje en forma deseada. Como un mínimo este manual debe incluir previsiones para la ejecución anual de los siguientes conceptos, los cuales van a ser complementados para satisfacer los requerimientos del supervisor:

- a) Las partes no enterradas de la tubería y del ducto ascendente (riser) completo debe ser visualmente inspeccionado para verificar que no hayan ocurrido daños al sistema y que no este siendo corroído. La inspección bajo el agua puede ser llevada a cabo utilizando cámaras u otros medios adecuados.
- b) La inspección de la protección catódica debe ser evaluada por medio de medidores potenciales.
- c) Se debe hacer una corrida de un diablo a lo largo de la tubería para detectar abolladuras y/o pandeo de la misma.
- d) Los mecanismos de seguridad y de control deben ser probados e inspeccionados.

IV.3.2. Inspección con diablo inteligente.

La necesidad de inspeccionar internamente tuberías ha resultado en un alto rango de diseño de diablos inteligentes para detectar pérdidas de metal, fugas y defectos similares. Las herramientas más comúnmente usadas inducen un flujo magnético en el acero de la tubería, detectan y graban la información a cerca de las anomalías que pudiera tener está.

Un diablo se puede definir brevemente como un pistón de movimiento libre el cual es introducido dentro de una línea de tubería para llevar a cabo una cierta función.

Los diablos pueden dividirse en dos clases:

- a) **Vehículos no inteligentes.** Diablos que ejecutan una función de mantenimiento.
- b) **Vehículos inteligentes.** Diablos que proporcionan información acerca de la condición de ejecución de la tubería.

Las funciones ejecutadas por diablos convencionales (vehículos no inteligentes) incluyen:

- Remover líquidos o grasas.
- Separación de fluidos que no son similares.
- Limpiar (Remover líquidos)

Diablos Inteligentes.

Los requerimientos de las corridas de diablos variarán con el tipo del sistema de tubería en cuestión y el estado de desarrollo. Las instalaciones Costafuera de gas y de petróleo, son muy pocas excepciones, están relacionadas con la producción y exportación de hidrocarburos.

Para tuberías de gas a altas presiones las consecuencias de fallas pueden ser devastadoras, y la inspección cuidadosa es fundamental para la operación segura. Por razones de seguridad, es recomendable monitorear, donde sea posible, el espesor de la pared del tubo de ductos ascendentes, particularmente en tuberías que transportan gas.

En general los diablos inteligentes constan de tres partes las cuales son: Una sección de manejo que provee el manejo por el medio (gas o

líquido); una fuente de poder (sección de baterías); secciones de magnetización que también lleven los sensores, y por supuesto la sesión de grabación de los datos. En todos los casos las secciones están unidas por juntas articuladas que permitirán que el diablo pueda pasar por curvas de la tubería.

Sección de manejo.

Como se mencionó anteriormente las copas de raspado en esta sección (dos o más) sirven para manejar la herramienta a lo largo de la tubería.

Magnetizar.

Como su nombre lo dice, este es el electro-imán, que forma el corazón del sistema. Montados entre los polos del imán están una serie de sensores arreglados en dos columnas. Los sensores están montados para mantener contacto con la pared de la tubería en el trayecto de la inspección. Cepillos de acero flexible están montados en cada pieza de polo para conducir el campo del flujo magnético en la pared de la tubería para proporcionar al magnetizador algún grado de flexibilidad cuando la herramienta pasa por curvas.

Grabador de Información.

Aquí las señales capturadas por los sensores son amplificadas. La grabación es continua. El paquete de grabación también lleva las ruedas de medición; estas ruedas están equilibradas para inducir un grado de giro a la herramienta, la herramienta se desplomará en tuberías de grandes longitudes,

lo que conducirá a pérdidas de información de la inspección y posiblemente a la pérdida del diablo.

Técnicas de Inspección.

El método consiste en aplicara un campo mangnético fuerte a la pared del tubo tal que un cambio, causado por corrosión o cualquier otra discontinuidad, producirá una distorsión a fuga del campo de flujo aplicado. Esta fuga es detectada y grabada a lo largo con su información de posición. La señal generada por una anomalía es proporcional al área de pérdida de metal.

Método de Inspección.

Una vez que la herramienta ha sido ensamblada, probada y calibrada entonces tiene que ser introducida en la línea de la tubería. Para hacer esto se requiere de trampas de dimensiones considerables en cada extremo de la tubería, estas trampas se ilustran en la figura 4.11. Estas trampas se clasifican dentro de dos grupos:

- a) Trampa de envío de diablos. Donde sale el diablo e inicia la inspección de la tubería.
- b) Trampa de recibo de diablos. Como su nombre lo dice, es donde será recuperado el diablo después de haber realizado su función.

Estas trampas pueden utilizarse tanto para tubería terrestre como marina. Para cargar una herramienta, las válvulas A y C estarán cerradas, y la válvula D estará abierta.

Procedimiento de envío de un diablo inteligente.

Para iniciar el envío de un diablo, la válvula C se abre lentamente y se usa para controlar la presión del barril del envío. Cuando el barril está lleno de presión, se cierra la válvula D y se abre la válvula A. Después de que la herramienta (diablo) es enviada, la válvula B se abre completamente y se cierran las válvulas A y C. La herramienta correrá a través de la tubería a la velocidad del producto que transporta.

Procedimiento de recibo de un diablo inteligente.

Una vez que la herramienta ha sido enviada, las válvulas A, B, y C de la trampa de recibo deben ser abiertas. La herramienta llegará y se detendrá en la conexión en T de la válvula A, la válvula B es entreabierta para controlar la presión de paso. Una vez que la herramienta se encuentra segura, la válvula B se vuelve a abrir completamente, se cierra la válvula C y después, también se cierra la válvula A. Ahora se abre el compartimiento y la herramienta es removida de la trampa para que inicie la evaluación de la tubería en base a los datos que grabó el diablo en su trayectoria.

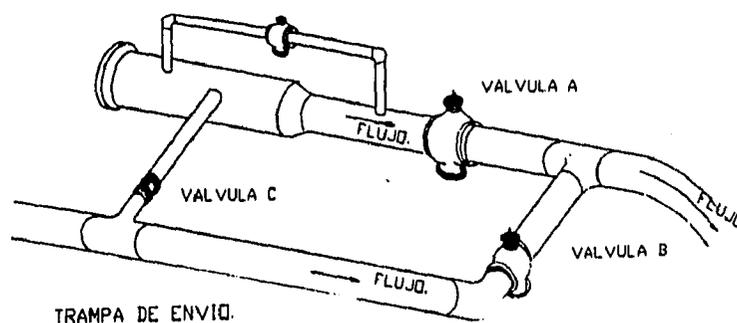


figura 4.11. Trampas de Diablos.

IV.4. Nuevas Técnicas.

En años recientes, la compañía alemán Pipetronix GmbH construyó una herramienta para la inspección de tuberías, la herramienta llamada *UltraScan*.

UltraScan aplica la precisión de la tecnología ultrasónica de medición para inspeccionar una tubería. El equipo y el programa de análisis de datos ofrecido por Pipetronix son capaces de localizar una falla con una aproximación de +/- 0.2 m., y de medir el grado de la pérdida del metal con una aproximación de +/- 0.5 mm.

El UltraScan consiste de un número de unidades unidas todas por una junta universal robusta. La herramienta completa puede pasar por codos de 90° con radios iguales a tres veces el diámetro de la tubería ($R=3D$), con una preparación especial con $R=1.5D$.

La herramienta es conducida por una unidad de manejo, la cual está equipada con copas de manejo. Las otras unidades están soportadas por rodillos.

En una herrameinta típica la unidad de manejo lleva las baterías que proveerán el poder de operación; la segunda unidad lleva el de procesador de datos y el equipo de grabación; la tercera unidad porta los sensores eléctricos, y la unidad final lleva los transductores de ultrasonido.

El UltraScan hace una medición directa y casi exacta del espesor de la pared del tubo, e indica en que lado se encuentra la pérdida del metal, ya sea interiormente o exteriormente.

Los transductores ultrasónicos están montados en un cargador flexible el cual mantiene el correcto alineamiento entre cada sensor y la pared de la tubería.

Los transductores emiten frecuencias altas las cuales son reflejadas por las paredes internas y externas de la tubería. El tiempo transcurrido entre la señal de retorno de los dos ecos es usado para grabar los dos valores siguientes:

Distancia de alejamiento (A). Es la distancia entre el sensor y la superficie interna de la tubería. Cualquier incremento de la distancia nominal indica que la tubería ha sufrido una pérdida de metal en la parte interior de su pared de la tubería.

Espesor de pared (t). Si este valor muestra un espesor reducido en un punto donde la distancia A no muestra cambio, se ha perdido metal de la parte exterior de la pared de la tubería.

Las ruedas odométricas proporcionan información acerca de la velocidad y de la distancia recorrida por el diablo. El cálculo de la distancia se lleva a cabo tomando el número de vueltas totales que da la rueda y después multiplicando este número por el perímetro de la rueda.

La inspección por medio del UltraScan provee dos vistas de la condición de la tubería, presentadas una arriba de la otra en un monitor a color.

Las dos bandas superiores constituyen el Scan. Combinan lecturas de todos los sensores en la herramienta para proporcionar una película completa de la tubería. El Scan C superior muestra la distancia A de alejamiento; el inferior muestra la medición del espesor de la pared de la tubería, es decir la distancia t. Con un poco de práctica es posible reconocer las características

de la corrosión interna y externa, varios tipos de soldadura, laminaciones y facciones de la tubería.

Las dos bandas inferiores en la pantalla son el Scan B, que muestra las lecturas de sensores individuales. Se muestra la máxima profundidad de un defecto en la pantalla, esto lo hace seleccionando el sensor que pasa por la parte más profunda de un defecto.

IV.5. Reparación de Tuberías Submarinas.

IV.5.1. Panorama General.

El impacto económico de la falla en una tubería puede conducir a una pérdida substancial de ingresos, particularmente para tuberías de grandes diámetros. Frecuentemente se requiere de una respuesta rápida para una reparación de emergencia de una falla en un sistema de tubería. Existen varios métodos para la reparación de tubería en el mar, pero ninguno de éstos es apropiado para todos los casos. Los operadores de la línea estarán informados de las reparaciones que serán hechas en una tubería en operación como resultado de la corrosión, tormentas, movimientos del lecho marino, o daños resultantes de operaciones marinas, por ejemplo, pesca, construcción, etc.

Las reparaciones efectuadas durante la construcción son usualmente realizados por la barcaza de tendido. El tubo es recuperado hacia la superficie donde la sección dañada se corta, un tubo nuevo se suelda a la demás tubería, y finalmente es bajada al lecho marino nuevamente.

La selección de un método de reparación depende de varias circunstancias las cuales pueden incluir los siguiente:

- Tamaño de la tubería y rango de la presión.
- Profundidad del agua.
- Contenidos de la tubería, por ejemplo, gas o petróleo.
- Causa de la falla (defecto de manufactura, accidente de construcción, movimiento, etc.)
- Tipo y extensión del daño (daño en el concreto, fuga, etc.)
- Localización del punto de falla con respecto a los puntos de restricción de la tubería, tales como plataformas y conexiones laterales marinas.

Cuando ocurre un daño a una tubería en operación, la línea debe cerrarse inmediatamente y se debe determinar la magnitud total del problema.

IV.5.2. Métodos de Reparación.

Muchos métodos han sido utilizados para la reparación de emergencia de tuberías Costafuera. Estos métodos pueden ser divididos en métodos de superficie y métodos bajo el agua. Los métodos de reparación bajo el agua incluyen soldadura hiperbárica y conexiones mecánicas de una pieza. Estos métodos han sido utilizados para reparar daños en puntos medios de la tubería o daños cerca del riser. La técnica de reparación de soldadura de

superficie es comúnmente usada donde los diámetros de la tubería son relativamente pequeños, donde las profundidades del agua son moderadas, y las condiciones ambientales son frecuentemente favorables.

La soldadura hiperbárica es más usada comúnmente para diámetros grandes de tubería, grandes profundidades de agua, y condiciones ambientales severas.

Los conectores mecánicos disponibles para construcciones nuevas son también usados para reparar tuberías.

IV.5.2.1. Soldadura Superficial.

Este método utiliza equipo de soldadura de superficie sobre un barco de trabajo, comúnmente una barcaza de tendido. Este procedimiento involucra levantar los extremos de una porción de tubería, donde se encuentra el daño, a la superficie por el uso de pescantes (mecanismos para alzar anclas), después transportarla adecuadamente y soldar una pieza del carrete para puntear el espacio entre los extremos del tubo, inspeccionar las soldaduras, y finalmente, bajar la porción de la tubería al fondo marino. Este método involucra los siguientes pasos:

- Inspección del daño en la tubería.
- Planear el procedimiento de reparación.
- Movilización de embarcación (es) al sitio del área dañada.
- Inspeccionar el daño en la tubería, y si ésta se encuentra enterrada, desenterrar una sección de aproximadamente de 150 m. a cada lado de la zona dañada.

- Cortar el área deteriorada y recuperar la tubería dañada.
- Conectar los cables de levantamiento de cada sección de la tubería del fondo marino.
- Levantar los extremos de la sección de la tubería cortada a la superficie jalando los cables pescantes de acuerdo con las cédulas preplaneadas de levantamiento.
- Cortar y limpiar los extremos de la tubería dañada.
- Fabricar una pieza de carrete recta o curva para ajustarla entre los extremos de la tubería. Soldar la pieza a los extremos de la tubería y recubrir las juntas de campo.
- Bajar la tubería al fondo marino mientras la embarcación se mueve lateralmente hasta que sea colocada en su posición original.
- Probar hidrostáticamente la tubería y si es necesario volver a enterrarla.

IV.5.2.2. Soldadura Hiperbárica.

En este método, la sección dañada de la tubería es cortada y recuperada. Una pieza del carrete de longitud requerida se fabrica en el barco. La pieza es bajada al lecho marino y se usan dos juntas para conectarla a cada extremo de la tubería. La soldadura se realiza dentro de un hábit de soldado bajo presión ambiental del fondo marino en un medio ambiente seco. Este método no se utiliza para reparaciones en aguas profundas.

En este método comúnmente se usa un armazón de alineamiento, un hábitat de soldado, y una campana transferible para realizar la reparación de la tubería.

Este proceso de reparación involucra los siguientes pasos:

Supervisión del daño de la tubería.

Planear el procedimiento de reparación.

Movilizar una embarcación de trabajo cerca del sitio donde se encuentra el área dañada de la tubería.

- Si la tubería está enterrada, desenterrar cierta longitud a cada lado de la sección dañada.
- Inspeccionar la tubería dañada, cortar y recuperar la sección que se encuentra en mal estado.
- Medir la longitud requerida de una pieza nueva.
- Bajar la pieza del carrete al fondo marino con una grúa o pescantes y colocarla entre los extremos de la tubería.
- Bajar el armazón de alineamiento y colocarlo sobre el primer extremo de la tubería para que sea soldado, alinear los dos extremos de la tubería para que sean unidos y puestos en su posición.
- Bajar el hábitat de soldado y colocarlo en el tope del armazón de alineamiento y cubriendo los extremos de la tubería que van a ser conectados.
- Secar el hábitat mediante bombas. Varios soldadores entran al hábitat seco, cortan y preparan los extremos de la tubería, efectúan la soldadura en un ambiente seco y finalmente aplican su recubrimiento.

- Repetir el proceso para conectar la pieza del carrete en el otro extremo de la tubería.
- Probar hidrostáticamente la tubería y en el caso de que sea necesario volver a enterrarla.

IV.5.2.3. Conectores Mecánicos.

Los conectores mecánicos también se utilizan para unir extremos de tuberías durante una operación de reparación. Los conectores mecánicos son sistemas que incluyen un medio de conexión a los extremos de la tubería, previsiones para ajustar longitudes, y placas giratorias para acomodar desalineamientos angulares.

Este proceso de reparación comúnmente se realiza de la manera siguiente:

- Supervisión del daño de la tubería.
- Planear el procedimiento de reparación.
- Movilizar el equipo a las proximidades del área dañada de la tubería.
- Si la tubería está enterrada, desenterrar una parte de la tubería a cada lado de la sección dañada.
- Cortar y recuperar la sección dañada.
- Conectar las abrazaderas de levantamiento de un armazón de maniobras o armazón a cada sección de la tubería.
- Levantar los extremos de la tubería cuidadosamente cerca del fondo marino y prepararlos para la conexión removiendo cualquier recubrimiento.

- Colocar el conector a cada extremo.
- Medir longitud requerida de la pieza y fabricarla en la embarcación.
- Bajar la pieza, alinear los conectores con mitades de tubería (machos o hembras), poner los conectores en los extremos de la tubería, y probarlos.
- Bajar la tubería al lecho marino.
- Probar hidrostáticamente la tubería y en el caso de que sea necesario volver a enterrarla.

Costos y Tiempo.

En general, la soldadura de superficie y los conectores mecánicos son los métodos más rápidos para la reparación de tubería submarina. Las reparaciones mediante el método de soldadura hiperbárica consumen mucho más tiempo para su ejecución, resultando en un costo muy alto. Los conectores mecánicos son usualmente el método de reparación más barato. La soldadura de superficie puede ser más cara si se utilizan dos bacos para el levantamiento de los extremos de la tubería a la superficie, como cuando se requiere reparar tubería de diámetros grandes.

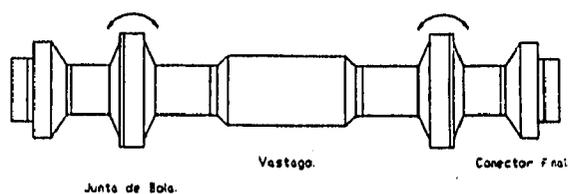


figura 4.12. Reparación con conectores mecánicos "Flexiforge"

PROCEDIMIENTO:

- 1. Los extremos de la tubería son cortados y limpiados.**
- 2. Los conectores finales son bajados y colocados en los extremos de la tubería.**
- 3. La pieza curva, consiste de un vastago y de 2 juntas de bola es fabricada y bajada al fondo marino.**
- 4. Los conectores finales y la pieza curva son alineados, y finalmente ambos son insertados.**

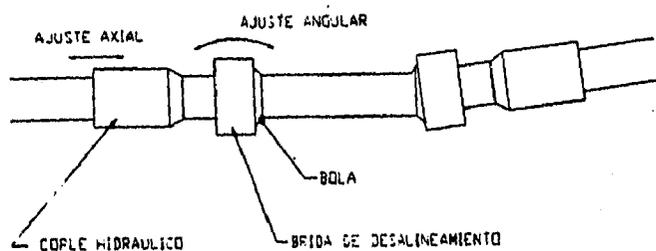


Figura 4.13. Reparación por conectores mecánicos "Hydrotech".

PROCEDIMIENTO

1. Los extremos de la tubería dañada son cortado y limpiados.
2. Los conectore Hydrocouple son bajados.
3. Los conectores son colocados a los extremos de la tubería
4. Una pieza de tubería es fabricada con una bola en cada extremo.
5. Esta pieza es bajada y conectada.
6. Las conexiones son selladas y probadas.

IV.6. Documentación para la certificación.

La documentación necesaria para realizar la certificación de una línea debe incluir reportes, cálculos, dibujos y otra información necesaria para demostrar que el diseño del sistema de la tubería submarina es el adecuado. Específicamente la documentación requerida debe incluir los siguientes puntos:

Reportes.

- a) **Reporte de las condiciones ambientales.** Este reporte debe describir las condiciones ambientales que tienen probabilidad de presentarse durante el tendido de la tubería, así como también las condiciones ambientales de diseño. Los conceptos que van a ser evaluados deberán incluir información apropiada de: viento, oleaje, corrientes, temperatura, mareas, vegetación marina, componentes químicos del aire y del agua, condiciones de hielo (en zonas donde éste aparece), sismos y otros fenómenos.
- b) **Investigación de la ruta.** Este reporte deberá dirigirse
- c) a las inmediaciones de la ruta propuesta del sistema de la tubería submarina, los tópicos de las propiedades geotécnicas y topográficas del lecho marino. En la inspección batimétrica, el ancho de la inspección a lo largo de la ruta propuesta de la tubería deberá estar

basada en consideración de la variación esperada en la ruta final en comparación con su propuesta inicial. La inspección indicará, en adición a las pendientes del fondo marino, la presencia de rocas u otras obstrucciones que podrían requerir una reubicación de estas obstrucciones, barrancas, pendientes inestables, y obstrucciones permanentes tales como estructuras existentes hechas por el hombre.

Deberán establecerse las propiedades geotécnicas del suelo para determinar su capacidad y estabilidad a lo largo de la ruta de la tubería. Los métodos para la determinación de las propiedades pueden incluir una combinación deseable de pruebas in-situ, inspección sísmica, y técnicas de muestreo. Los procedimientos de prueba del suelo deben evaluar adecuadamente la estabilidad del fondo marino, erosión o deslave, y la posibilidad de que las propiedades del suelo puedan ser alteradas debido a la presencia de la tubería, incluyendo reducciones de la resistencia del suelo inducidas por carga cíclica. La factibilidad de llevar a cabo varias operaciones relativas al enterramiento o al cubrimiento de la tubería va a ser evaluada con respecto a las propiedades establecidas del suelo.

Cálculos

- a) **Cargas ambientales.** Se deben determinar las cargas inducidas por las condiciones ambientales obtenidas a lo largo de la línea, considerando las cargas mecánicas pertinentes las cuales pueden actuar junto con la carga inducida ambientalmente. Las cargas

mecánicas mencionadas deben incluir, las cargas generadas por los siguientes aspectos:

- El peso de la tubería, de su recubrimiento, de sus accesorios y del producto transportado.
- Flotación.
- Presiones, incluyendo la presión del producto, presiones del ambiente y del agua, y la presión de la sobrecarga del suelo.
- Efectos térmicos.
- Cargas de instalación, incluyendo las debidas a las deformaciones inducidas durante la instalación, cargas temporales tales como la tensión de la tubería y procedimientos de enterrado donde pueden llevarse a cabo deformaciones significantes de la plataforma o de otra estructura.

b) Análisis de estabilidad y resistencia estructural. Los cálculos deben ser realizados para demostrar que, con respecto a las cargas establecidas y a otras influencias, el sistema de la tubería y el suelo circundante poseen la resistencia y estabilidad con especial cuidado para no fallar debido a lo siguiente:

- Deflexiones y esfuerzos excesivos.
- Fatiga.
- Efectos dinámicos.
- Pandeo
- Movimiento de la base (lecho marino)

Se pueden requerir cálculos adicionales para demostrar que el diseño propuesto es el más adecuado. Tales cálculos deben incluir los ejecutados para condiciones y arreglos poco usuales, así como para el sistema de protección contra la corrosión.

c) **Procedimientos de instalación.** Con lo respecta al plano de los procedimientos de instalación mencionado en el punto anterior, los cálculos deben ser sometidos a revisión. Estos cálculos deben demostrar que la resistencia y la integridad del sistema de la tubería y su base no se ponen en peligro con las cargas generadas por los procedimientos seleccionados de instalación.

d) **Análisis de seguridad.** los siguientes mecanismos de seguridad deben ser parte del sistema de la tubería.

1. **Para tuberías de partida:** un censor de alta-baja presión para detener los trabajos de los pozos en la plataforma en casos críticos, y una válvula check para evitar fugas del fluido.
2. **Para tubería de llegada:** una válvula de cierre automático conectada al sistema de cierre de emergencia de la plataforma, y una válvula check para evitar fugas de fluido.
3. **Para tuberías bidireccionales:** un censor de alta-baja presión para cerrar los pozos en la plataforma, y una válvula de cierre

automático conectada al sistema de cierre de emergencia de la plataforma.

IV.6.1. Planos y Especificaciones.

Los planos y especificaciones deben ser proporcionados por duplicado para su aprobación, y deben contener lo siguiente:

Plano del sitio indicado: batimetría a lo largo de la ruta propuesta, la localización de obstrucciones que van a ser removidas, la localización de estructuras permanentes hechas por el hombre, las porciones de la tubería que serán enterradas y otros aspectos importantes relacionados a las características del fondo marino.

Planos estructurales y especificaciones para el sistema de la tubería, sus soportes y recubrimiento.

Especificaciones de las pruebas no destructivas y procedimientos de control de calidad.

Diagramas de flujo indicando perfiles de temperatura y presiones.

Planos y especificaciones para sistemas de instrumentación y control y para mecanismos de seguridad.

Manual de Instalación.

Deberá proporcionarse un manual describiendo procedimientos para ser empleados durante la instalación del sistema de tubería. El manual incluirá una lista de los límites tolerables de las condiciones ambientales bajo las cuales el tendido de la tubería puede ser llevado a cabo, procedimientos para ser seguidos, y procedimientos de reparación durante la instalación.

Manual de operación.

El operador preparará un manual de operación el cual proveerá una descripción detallada de los procedimientos de operación para ser seguidos en ciertas condiciones esperadas. El manual de operación incluirá procedimientos para ser seguidos durante condiciones de inicio, operación y de cierre; así como, procedimientos para ser seguidos durante condiciones de emergencia.

CONCLUSION

CONCLUSIONES

Como se pudo observar a través del desarrollo del presente trabajo, la intención principal fué mostrar un panorama general de un campo muy poco conocido de la Ingeniería Civil-estructural de diseño de estructuras no convencionales, como es el caso de las tuberías instaladas en el fondo marino, y del cual se observa involucra otras disciplinas como son:

- Oceanografía.
- Topografía.
- Hidráulica.
- Mecánica de Suelos, entre otras más.

Además de que interactúan estrechamente para llegar a la solución óptima del diseño, así mismo, es importante señalar, la intención de presentar a los ingenieros dedicados al diseño de estructuras Costafuera, el potencial desarrollo que existe en lo relacionado al diseño de tuberías en el mar y la participación en especial, y muy importante, de la Ingeniería Civil.

Este trabajo se encaminó a la transportación de los hidrocarburos, es decir, dentro de la industria petrolera. Sin embargo, puede tener muchas aplicaciones dentro de otras ramas de la Ingeniería Civil, como por ejemplo la ingeniería Hidráulica, o Sanitaria. Cabe mencionar que todavía hay muchos otros aspectos que intervienen y que se mencionan o no se desarrollan en esta Tesis de una manera extensa.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA.

American Burueau of Shipping "Guide for Building and Classing Undersea Pipeline Systems and Risers". New York, USA, 1991.

American Gas Association, "Submarine Pipelines On-Bottom Stability", Houston, 1989.

Det Norske Veritas, "Rules for Submarine Pipeline Systems. "Noruega, 1981.

Ellinas, C.P., "Prevention of Upheaval Buckling of Hot Submarine Pipelines by Means of Intermittent Rock-Dumping, Offshore Technology Conference OTC 6487, Houston, 1990.

Mousselli, A.H., "Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods. Oklahoma", 1981.

Palmer, A.C. , Ellinas, C., Richards, D.M. "Design of Submarine Pipelines Against Upheaval Buckling", Offshore Technology Conference OTC 6335, Houston, 1990.

Palmer, A.C., SAIC Sciencie and Engineering Ltd., "Deepwater Pipelines: Improving State of The Art.", Offshore Technology Conference OTC 7541., Houston, Texas. USA, 1994.

Pipetronix, "UltraScan Pipeline Metal Loss Detection", USA., 1990. (Cátalogo).

Richards, D.M., "A Submarine Pipeline Topography Monitoring System", Pipeline Piping and Integrity Monitoring Conference, Aberdeen, Nov. 1990.

Richards, D.M. "Submarine Pipeline Profile Measurement and Analysis", 1990.

Richards, D.M. "The Effect of Imperfection Shape on Upheaval Bucking Behaviour", SUT Conference, Aberdeen, Mayo 1990.

R.T. Hill, "Specification and Fabrication of steels for use in Sour Service Pipeline", Beijing China, 1985.

Tiratsoo, J.N.H., "Pipeline Pigging Technology", Houston Texas, USA., 1988.

Tollin, B.I., Wilson, G.J., and Martin R.G., Stena Offshore Ltd., "Deepwater Pipelay: Extending the Limits" , Offshore Technology Conference OTC 7542., Houston Texas, USA. 1994

Veritec, "On Botton Stability Design of Submarine Pipeline", Noruega, 1988.