



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Diseño de Tramos Libres de Tuberías Submarinas Sometidas a Fuerzas Hidrodinámicas

Autores:

Jasper van Dillewijn

Roselma Velásquez

Tutor: Ing. José Antonio Noriega

Caracas, Marzo 2011

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, por acompañarme en cada una de las metas que he emprendido y ser siempre mis más fervientes cómplices.

A mis padres, Juan Velásquez y Claribel Florián a quienes amo muchísimo por todo lo que me han dado en esta vida, especialmente por sus sabios consejos y por estar a mi lado en los buenos y malos momentos.

A mi querida hermana Vanessa, con quien he compartido toda mi vida y siempre me ha dado una palabra de aliento cuando más la necesito.

A mi primita Selma por escucharme, soportarme y contagiarme la alegría de vivir.

A mis abuelitas, a quienes adoro por siempre desearme lo mejor del mundo y brindarme cada día una sonrisa.

A todos mis amigos que se convirtieron en una segunda familia con quienes he compartido todos estos años de estudios.

A todos ellos les dedico este trabajo, ya que de alguna u otra manera han aportado un granito de arena para mi crecimiento personal y profesional.

Atte.
Roselma Velásquez Florián

Agradecimientos

Antes que a todos quiero agradecer a Dios por darme las fuerzas necesarias en los momentos en que más las necesité y bendecirme con la posibilidad de caminar a su lado durante toda mi vida.

A mis padres quienes me dieron la vida y que con esfuerzo siempre me brindaron su apoyo incondicional para seguir adelante con mis estudios y con todas las metas que me he trazado.

Quiero darles las gracias a todos los profesores que ayudaron a mi formación como ingeniero y una mejor persona.

En particular a mi tutor José A. Noriega por sus aportes y conocimientos brindados durante el tiempo que duró este trabajo especial de grado.

No puedo dejar de agradecer a mi frenético compañero de tesis Jasper van Dillewijn con quien compartí todos estos años de estudios y se ha convertido en un amigo excepcional.

Quiero agradecer además a mi amiga María Daniela González, por apoyarme y siempre estar ahí para decirme que “todo saldrá bien”.

A todos ustedes mis más sinceros agradecimientos.

Atte.
Roselma Velásquez Florián

Dedicatoria

A Brenda E. Rada de van Dillewijn, Jasper C. van Dillewijn, José Guillermo Vallejo Rada, Derkje “Deedee” van Dillewijn de Aguirre, Santiago “Santi” Aguirre, Pía “3.1416-A” Vallejo de Pino, Carlos “Jimmy” Pino, Gisela “Gigi” van Dillewijn de Quiroz, Luis Carlos “Luigi” Quiroz, Pedro “Peter” Acosta van Dillewijn, Isis “Sisi” Acosta van Dillewijn, Eunice “Café con leche” Martínez Vallejo, Anneke “Acneke” Molina van Dillewijn, Cynthia “Cintillo” Pino Vallejo, Rebeca “Rebe” Vallejo, Miroslava “Miros...” Pino Vallejo, Sebastian “Sebas” Quiroz van Dillewijn, Sofía “popi” Quinal Molina, Nicolás “Nico” Quiroz van Dillewijn, Leomar Flores, Hemilsy de Flores.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor, Profesor José A. Noriega quién desde un principio nos apoyó para el desarrollo y culminación del presente proyecto.

A mis padres Jasper C. van Dillewijn y Brenda E. Rada de van Dillewijn, y familiares por su apoyo, educación y valores que me han enseñado; a ellos les debo la vida.

A Roselma Velásquez, mi compañera de tesis y amiga por los buenos momentos que he compartido con ella y apoyo durante la realización de este trabajo.

A mi querida Universidad Católica Andrés Bello y profesores por aportarme conocimientos y formarme como ingeniero, los recordaré siempre.

Un especial agradecimiento a mis amigos Osdaly Paz y Oscar Peña, por su incalculable apoyo durante mis estudios en la Universidad y buenos recuerdos.

A mi novia Corina Haro por su ayuda, entusiasmo y creer en mí.

A todas las personas que de alguna manera han pasado por mi vida y dejado una huella.

A todos ustedes mis más sinceros agradecimientos.

Tabla de contenido

Índice de figuras.....	viii
Índice de Tablas.....	x
Índice de Símbolos	xii
Sinopsis.....	1
INTRODUCCIÓN	2
Capítulo 1	4
1.1 Planteamiento del Problema.....	4
1.2 Objetivos de la Tesis	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Justificación	5
1.4 Alcance y limitaciones	6
1.4.1 Alcance.....	6
1.4.2 Limitaciones.....	6
1.5 Antecedentes	6
Capítulo 2 Marco Teórico.....	7
2.1 Tramos libres	7
2.1.1 Clasificación de los tramos libres.....	8
2.2 Condiciones ambientales a tomar en cuenta:.....	10
2.2.1 Regímenes de Flujo y acciones a tomar en cuenta	10
2.2.2 Condiciones de oleajes	12
2.3 Teorías de olas.....	13
2.3.1 Teoría de olas regulares.....	13
2.3.2 Teoría de ola de poca amplitud (Airy)	15
2.3.3 Teoría de olas de Stoke.....	17
2.3.4 Teoría Sinusoidal.....	19
2.3.5 Teoría de Ola Solitaria	19
2.3.6 Teoría de la Ola en función de la Corriente (Stream Function).....	19
2.4 Análisis estadísticos de las olas	20
2.5 Espectro de oleaje	22
2.5.1 Momentos espectrales.....	23
2.6 Condiciones de Corriente.....	26

2.6.1 Tipos de corrientes.....	26
2.6.2 Velocidad de corriente.....	28
2.6.3 Mediciones de corrientes	29
2.7 Ecuación de Morison	31
2.7.1 Coeficientes de la ecuación de Morison	34
2.7.2 Parámetros Adimensionales	34
2.7.3 Coeficientes de arrastre y de masa.....	35
2.8 Fuerza de Sustentación.....	42
2.8.1 Coeficientes de sustentación	44
2.8.2 Frecuencia de desprendimiento de vórtices.....	44
2.8.3 Vibraciones inducidas por vórtices	46
2.8.4 Frecuencia natural de tubería.....	47
2.9 Fatiga y Curvas S-N	48
2.10 Estado último de agotamiento	50
2.11 Interacción Suelo-Tubería.....	54
2.12 Resistencia del suelo.....	56
2.13 Modelaje de interacción tubería suelo.....	56
2.13.1 Modelo 1	56
2.13.2 Modelo 2	63
2.14 Modelo bilineal de fuerza-desplazamiento	64
Capítulo 3 Desarrollo	67
3.1 Características y propiedades de la tubería	68
3.2 Condiciones ambientales de diseño	69
3.2.1 Oleaje	69
3.2.2 Corriente	69
3.3 Modelaje del suelo	70
3.4 Sección equivalente.....	70
3.5 Modelaje de tubería en SAP	71
3.5.1 Frecuencia Natural de la Tubería	72
3.6 Estado límite de Fatiga (FLS).....	73
3.6.1 Aplicación de cargas al modelo.....	77
3.6.2 Esfuerzos generados por oleaje $\alpha < 0.8$	78
3.6.3 Daños por Fatiga	78

3.6.4 Esfuerzos generados por vibraciones inducidas por vórtices $\alpha > 0.8$.	83
Capítulo 4 Conclusiones y Recomendaciones	85
4.1 Conclusiones	85
4.2 Recomendaciones	86
Capítulo 5 Referencias Bibliográficas	87
Capítulo 6 Apéndice	89

Índice de figuras

Figura 1 Generación de vórtices detrás de un cilindro. (Frank White)	4
Figura 2 Tramo libre por socavación de fondo marino	7
Figura 3 Clasificación del tramo libre (DNV-RP-F105)	8
Figura 4 Parámetros de una ola (Basic Coastal Engineering)	14
Figura 5 Validación de teoría de olas (U.S. Shore Protection Manual)	14
Figura 6 Relación entre período de ola y longitud de ola. (DNV-RP-F105)	16
Figura 7 Celeridad de la onda. (DNV-RP-F105).....	17
Figura 8 Distribución de Rayleigh	21
Figura 9 Velocidad significativa del flujo a nivel de la tubería. (DNV-RP-F105) ..	25
Figura 10 Período de ola significativa T_z . (DNV-RP-F105)	25
Figura 11 Espectros de olas. (Fuente el autor).....	26
Figura 12 Perfil de corriente. (DNV-RP-F105)	28
Figura 13 Definición de zona interna y zona externa. (DNV-RP-F105)	31
Figura 14 Gráfico de fuerzas generadas por oleaje en un período	34
Figura 15 Resultados de experimentos de coeficientes de masa realizados por Sarpkaya. (Offshore Hydromechanics).....	36
Figura 16 Resultados de experimentos de coeficientes de arrastre presentados por Sarpkaya. (Offshore Hydromechanics)	37
Figura 17 Coeficientes de arrastre (U.S. Army Coastal Engineering Reserch Center).....	38
Figura 18 Factores de corrección por inestabilidad del flujo. (DNV-RP-F105)....	39
Figura 19 Definición de parámetro de tubería.....	40
Figura 20 Valores de amplitud de flujo cruzado de vibraciones indicadas por vórtices (A_z/D). (DNV-RP-F105).....	41
Figura 21 Coeficiente de masa. (DNV-RP-F105)	41
Figura 22 Punto de velocidad cero. (Summer & Fredsoe, 1997)	43
Figura 23 Fuerza resultante por vórtices y sus componentes.	43
Figura 24 Coeficientes de sustentación (Summer & Fredsoe, 1997)	44

Figura 25 Número de Strouhal. (Offshore Hydromechanics)	45
Figura 26 Desprendimiento de vórtice. (Flow Induced Vibration, Robert D. Blevins).....	46
Figura 27 Curva S-N. (DNV-RP-C203, 2010)	49
Figura 28 Valores de Amplitud en línea en función de la Velocidad reducida y Parámetro de Estabilidad reducido. (DNV-RP-F105)	52
Figura 29 Factor de capacidad N_q y N_y vs ángulo de fricción (DNV-RP-F105)	57
Figura 30 Factor de Corrección F para tuberías lisas y rugosas (DNV-RP-F105)..	59
Figura 31 K_s vs Índice de Plasticidad I_p (%) (DNV-RP-F105)	61
Figura 32 Sección Transversal del Tramo libre. (Fuente el autor)	67
Figura 33 Tubería con recubrimiento. (Fuente el autor)	68
Figura 34 Montaje del modelo en SAP	72
Figura 35 Modo 1 de vibración horizontal.....	73
Figura 36 Fuerza Hidrodinámica para el caso 1	75
Figura 37 Fuerzas Hidrodinámicas para el caso 2	75
Figura 38 Fuerzas Hidrodinámicas para el caso 3	76

Índice de Tablas

Tabla 1 Rugosidades del fondo marino para un tipo de suelo.....	31
Tabla 2 Rugosidad externas de tuberías	39
Tabla 3 Valores de constantes de borde. (Offshore Pipelines, 2005)	48
Tabla 4 Factores de multiplicación para frecuencias distintas al primer modo. (DNV-RP-F105).....	48
Tabla 5 Valores de factores de daño permitido. (DNV-OS-F101, 2010)	50
Tabla 6 Factores de seguridad.....	53
Tabla 7 Parámetros típicos geotécnicos de las arenas. (DNV-RP-F105)	55
Tabla 8 Parámetro típicos geotécnicos de las arcillas. (DNV-RP-F105).....	55
Tabla 9 Factores de rigidez dinámica y rigidez vertical estática para interacción suelo-tubería en arenas. (DNV-RP-F105)	63
Tabla 10 Factores de rigidez dinámica y rigidez vertical estática para interacción suelo tubería en arcillas con OCR=1. (DNV-RP-F105).....	64
Tabla 11 Rigidez equivalente k_2 (DNV-RF-105 2006)	65
Tabla 12 Característica de ls tramo libre para cada caso	67
Tabla 13 Propiedades de la tubería.....	68
Tabla 14 Material a transportar	68
Tabla 15 Masa de la tubería	69
Tabla 16 Valores de rigideces de resortes.....	70
Tabla 17 Valores de Inercias de tubería y recubrimiento	70
Tabla 18 Frecuencia natural de la tubería en dos direcciones.....	72
Tabla 19 Valores de Ola significativa y Períodos	73
Tabla 20 Parámetros adimensionales para cada caso	74
Tabla 21 Coeficientes de fuerzas para cada caso.....	74
Tabla 22 Frecuencia de vórtices y verificación de resonancia	76
Tabla 23 Daños por fatiga Caso 1	80
Tabla 24 Daños por fatiga Caso 2	81
Tabla 25 Daños por fatiga Caso 3	82

Tabla 26 Verificación de daños por fatiga para 30 años.....	82
Tabla 27 Valores de coeficientes para análisis por vibraciones.	83

Índice de Símbolos

Símbolos Latinos

A	Área transversal en la dirección perpendicular al flujo
A_C	Altura de la cresta de la ola
A_{CF}	Esfuerzo debido a la deformación de la tubería igual a su diámetro en el primer modo en la dirección del flujo cruzado
A_{IL}	Esfuerzo debido a la deformación de la tubería igual a su diámetro en el primer modo en la dirección del flujo
A_p	Área de sección transversal de la parte penetrado de la tubería
A_T	Altura del punto más bajo “valle” de la ola
A_y/D	Relación de la máxima amplitud en línea debido a vibraciones inducidas por vórtices
A_Z/D	Relación de la máxima amplitud en flujo cruzado debido a vibraciones inducidas por vórtices
B	Ancho de contacto de transferencia de carga de tubería del suelo
c	Celeridad de ola $= \frac{\lambda}{T}$
C_A	Coeficiente de masa agregada
C_e	Constante que depende de la condición de borde
C_D	Coeficiente de arrastre
C_D^0	Coeficiente de arrastre para flujo constante
C_L	Coeficiente de sustentación
C_M	Coeficiente de masa
$C_{M,0}$	Coeficiente de masa para flujo constante
C_V	Factores de Rigidez dinámico vertical
d	Profundidad del agua
D	Diámetro exterior de la tubería, incluyendo su recubrimiento

D_a	Diámetro externo de la tubería de acero
e/D	Relación de brecha
e_s	Relación de vacíos
E_a	Módulo de elasticidad o de Young del acero
E_c	Módulo de elasticidad o de Young del concreto
E_{equi}	Módulo de elasticidad o de Young equivalente de la sección de la tubería
f	Frecuencia de la ola
f_n	Frecuencia natural de la tubería
f_v	Frecuencia de desprendimiento de los vórtices
f_y	Esfuerzo de cedencia del acero
F	Factor de corrección en función de la rugosidad de la tubería
F_L	Fuerza lateral por unidad de longitud de la tubería
F_{Lmax}	Fuerza lateral máxima por unidad de longitud de tubería
F_V	Fuerza vertical de contacto por unidad de longitud de la tubería en el apoyo
g	Aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
$G(\omega)$	Función de transformación de frecuencia a velocidades de flujo inducidas por ondas en el nivel de la tubería
G	Módulo de corte del suelo
h	Altura divisoria de la zona externa de la interna o profundidad media
H	Altura de la ola = $A_c + A_T$
H_{max}	Altura máxima de ola para un estado de mar
H_S	Altura significativa de ola para un estado de mar
I	Inercia de la sección
I_a	Inercia de la tubería de acero
I_a	Inercia del recubrimiento de concreto
I_p	Índice de plasticidad, suelos cohesivos

k	Número de ola $= \frac{2\pi}{\lambda}$
K_L	Rigidez lateral dinámica
K_V	Rigidez vertical dinámica
$K_{V,S}$	Rigidez vertical estática
k/D	Rugosidad de la tubería
KC	Número de Keulegan Carpenter $= \frac{V \cdot T}{D}$
k_o	Coeficiente de empuje en reposo
K_1	Rigidez equivalente secante hasta la movilización completa de la fricción
K_2	Rigidez equivalentes para la movilización de deformaciones pasado el punto fricción completa
L	Longitud de tramo libre
L_{sh}	Longitud de apoyo del tramo (para la transferencia de la mitad del peso de la luz libre)
m	Valor negativo de la pendiente inversa de la curva
M	Momento máximo generado por la fuerza hidrodinámica
M_e	Masa efectiva por unidad de longitud
M_n	Momento espectral de orden n
M_y	Momento generado por la fuerza de sustentación
M_z	Momento generado por la fuerza de arrastre
n_i	Cantidad de repeticiones a la que está sometida tubería a un esfuerzo.
N	Número de orden de la teoría de ola
N_c	Factores de Capacidad del suelo
N_i	Valor máximo a la que puede estar sometida la tubería a un esfuerzo.
N_q	Factores de Capacidad del suelo
N_γ	Factores de Capacidad del suelo
OCR	Relación de sobre consolidación para suelos arcillosos
P_x	Presión que actúa en dirección del flujo

q	Peso sumergido de la tubería por unidad de longitud del tubo (kN/m)
r	Radio externo de la tubería de acero
R_c	Factor de reducción de la corriente
Re	Número de Reynolds $= \frac{v \cdot D}{\nu}$
R_k	Factor de reducción de la amplitud debido al amortiguamiento
R_V	Reacción vertical estática por unidad de longitud
S	Pendiente de la ola
S_{CF}	Rango de esfuerzo para flujo cruzado debido a vibraciones inducidas por vórtices (VIV)
S_{IL}	Rango de esfuerzo en línea debido a vibraciones inducidas vórtices
$S_{\eta\eta}$	Densidad espectral de la ola
St	Número de Strouhal $= \frac{f_v \cdot D}{U}$
S_U	Fuerza cortante sin drenar, suelos cohesivos
S_{UO}	Fuerza cortante sin drenaje en los fondos marinos
S_{UU}	Espectro de velocidad inducida por ola
t	Tiempo (Seg)
t_a	Espesor de la tubería de acero
t_c	Espesor del recubrimiento de concreto
t_d	Espesor de diseños (valor a introducir en el SAP)
T	Período de ola
T_P	Período pico del estado de mar
T_Z	Período de la ola significativa
u	Velocidad inducida de ola significativa a nivel de la tubería
U	Velocidad de la corriente
U_C	Velocidad de la corriente normal de la tubería
Ur, U_R	Número Ursell para olas regulares

U_s	Velocidad de la ola significativa
V	Penetración vertical de la tubería necesaria para movilizar la reacción
V_{eff}	Penetración efectiva
V_{Rd}	Velocidad reducida $= \frac{U}{f_n \cdot D}$
$V_{Rd,CF}$	Velocidad reducida para flujo cruzado
$V_{Rd,IF}$	Velocidad reducida para flujo en línea
y	Desplazamiento lateral de la tubería en el apoyo
$\bar{y}$	Distancia de la fibra más alejada al centroide de la figura $= \frac{D}{2}$.
z	Elevación sobre el fondo marino
z_m	Parámetro de “macro-rugosidad”
z_r	Altura de referencia a partir del lecho marino
$\bar{z}$	Distancia de la fibra más alejada al centroide de la figura $= \frac{D}{2}$
Z_o	Parámetro de rugosidad del fondo marino

Símbolos Griegos

α	Relación de la Velocidad del flujo de Corriente $= \frac{U_c}{U_c + u}$
β	Dirección de propagación medida desde el eje “x” positivo.
Δ/D	Profundidad de la brecha
ΔF_L	Fuerza dinámica horizontal entre el tubo y el suelo por unidad de longitud de la tubería
ΔF_V	Fuerza dinámica vertical entre la tubería y el suelo por unidad de longitud de tubería
$\Delta \delta_L$	Desplazamiento asociado horizontal de la tubería.

$\Delta\delta_V$	Desplazamiento vertical de la tubería, medida en relación con la posición estática de la tubería
γ	Factor de mayoración pico para el espectro para el espectro de JONSWAP o parámetro de localización de Weibull
γ_{agua}	Unidad de peso del agua (10 kN/m³)
γ_s	Factor de seguridad = 1.3
γ_{soil}	Unidad de peso total del suelo = $\gamma_{soil}' + \gamma_{agua}$
γ_{soil}'	Peso sumergido del suelo
λ	Longitud de ola
λ_o	Longitud de onda en la profundidad media del agua
η	Factor de de daño permitido
μ	Superficie de la ola
μ_L	Coeficiente de fricción lateral
ν	Relación de Poisson
φ_s	Angulo de fricción, suelos no cohesivos
ψ_k^{CM}	Factor de corrección que toma en cuenta la rugosidad de la tubería
ψ_{proxi}^{CM}	Factor de la tubería por la cercanía al fondo marino
ψ_{trench}^{CM}	Factor de corrección que toma en cuenta el efecto de la tubería en la zanja
$\psi_{KC,\alpha}^{CD}$	Factor de corrección que toma en cuenta la inestabilidad del flujo
ψ_{proxi}^{CD}	Factor de corrección que toma en cuenta la proximidad de la tubería al fondo marino
ψ_{trench}^{CD}	Factor de corrección por la zanja de la tubería.
ψ_{VIV}^{CD}	Factor de corrección de vibraciones inducidas por vórtices
ρ	Densidad del agua
ρ_a	Densidad del acero
ρ_c	Densidad del concreto

ρ_s/ρ	Relación de masa específica entre la masa de la tubería (sin incluir la masa agregada) y el desplazamiento del agua.
σ	Esfuerzo provocado por los vórtices
σ_a	Presión atmosférica (100 KPa)
σ_s	Esfuerzo efectivo del suelo
ν	Viscosidad cinemática
θ	Angulo de fase = $k(X \cos \beta + Y \sin \beta) - \omega t$
θ_{rel}	Ángulo relativo que forma la corriente contra el eje de la tubería
ζ_h	Amortiguamiento hidrodinámico. Para VIV sin entrar en resonancia puede ser tomado como cero = 0.00
ζ_{soil}	Amortiguamiento del suelo, que puede ser tomado como = 0.01
ζ_{str}	Amortiguamiento estructural = 0.005
ζ_T	Relación total de amortiguamiento modal
ϕ_d	Diámetro de diseño (valor a introducir al SAP)
ω	Frecuencia angular de la ola = $\frac{2\pi}{T}$
ω_p	Frecuencia angular pico del espectro

Sinopsis

Los tramos libres son zonas donde un tramo de la tubería está apoyado en sus extremos y queda suspendido en el agua, simulando el comportamiento de una viga simplemente apoyada. La suspensión de la tubería en el agua se debe a los cambios batimétricos del lecho marino, cruce de tuberías y/o por erosión provocado por el oleaje y la corriente.

En el diseño de una tubería submarina es importante considerar su comportamiento operacional. Aunque se intenta predecirlo, siempre se genera cierto grado de incertidumbre ya que la tubería está sometida a fuerzas hidrodinámicas, lo que implica que ocurran desprendimientos de vórtices sometiéndola a fuerzas alternantes que hacen que la tubería comience a vibrar. De esta manera se pueden generar fallas por fatiga sobre todo en los puntos más débiles, que son las soldaduras.

El siguiente trabajo especial de grado tiene por objeto desarrollar una metodología con el uso de programas estructurales para el diseño y verificación de tuberías en tramos libres capaces de resistir las fuerzas hidrodinámicas y así establecer de esta manera un análisis empleando las normas Det Norske Veritas (DNV) y la American Bureau of Shipping (ABS) y la generación de modelos aplicando el programa SAP2000V14.

En esta investigación se revisan los esfuerzos producidos bajo las fuerzas hidrodinámicas (oleaje y corriente marina), el efecto de resonancia al comparar la frecuencia natural de la tubería con la frecuencia del desprendimiento de vórtices y los daños por fatiga que la tubería pueda presentar por efecto de dichas fuerzas.

Se desarrolló una metodología de investigación documental y experimental; documental por la revisión y obtención de los requisitos y especificaciones que establecen las Normas *DNV-RP-F105* y la *ABS "Subsea Pipeline Systems"* en conjunto con las normas *DNV-OS-F101*, *DNV-RP-C205* y *DNV-RP-C203*. A su vez se hizo referencia a artículos técnicos y bibliografía especializada en el tema y experimental por el uso de hojas de cálculos y programas estructurales para el diseño.

INTRODUCCIÓN

Las tuberías submarinas tienen como función transportar el fluido (petróleo, gas u otros hidrocarburos) desde su yacimiento en el mar hasta las plantas procesadoras en la costa en donde se procede a su refinamiento.

La extracción petrolera cada vez se está realizando en lugares alejados de las costas de los países que poseen estas riquezas naturales. Esto se debe al incremento constante de la demanda energética mundial. La utilización de tuberías submarinas surge como una alternativa económica en comparación con el transporte de hidrocarburos en embarcaciones.

Las tuberías suelen estar ubicadas sobre el fondo marino, pero hay zonas donde la tubería deja de estar apoyada en el suelo bien sea por erosión debido a las mareas o por el cruce con otras tuberías y comienzan a estar suspendidas en el agua. Esto recibe el nombre de “tramos libres”. Es entonces cuando las fuerzas producidas por oleaje y mareas empiezan a afectar a la tubería a través de procesos hidrodinámicos de generación y desprendimiento de vórtices, los cuales ocasionan vibraciones en la tubería que pueden generar daños por fatiga.

Debido a la poca experiencia de Venezuela en el estudio de tramos libres de tuberías submarinas, a causa de la ausencia de normativas propias para su evaluación, se recurre a los códigos y normativas extranjeras, como las normas Det Norske veritas (DNV) y la American Bureau of Shipping (ABS).

Este trabajo especial de grado sigue una línea de investigación que toma en cuenta los efectos producidos por las fuerzas de oleaje y de la corriente, permitiendo una metodología de análisis que sirva para futuros proyectos.

Para cumplir el objetivo planteado se presenta la información necesaria para conocer los esfuerzos producidos por las fuerzas hidrodinámicas a las que está sometida la tubería, lo cual es fundamental el uso de hojas de cálculo y de programas estructurales como el SAP2000V14 para facilitar el estudio de esta investigación.

Con el propósito de facilitar la claridad del contenido, este trabajo se encuentra estructurado en cuatro capítulos, donde se contempla una explicación detallada que enriquece el desarrollo de los objetivos planteados al inicio de la investigación.

El *Capítulo 1*, presenta el planteamiento del problema, definición del objetivo general y objetivos específicos, la justificación para el avance de este trabajo, los alcances y limitaciones.

El *Capítulo 2*, lo conforma el marco teórico de la investigación, el cual sirvió como base para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, el marco teórico está definido como el compendio de una serie de elementos conceptuales que conciernen al principio de la investigación a realizar. En éste, se señalan las consideraciones que se deben tomar en cuenta para el diseño de los tramos libres. Asimismo se establecen las normas y códigos aplicados en la metodología de diseño utilizada, comprendida dentro del alcance de esta investigación.

El *Capítulo 3*, presenta el desarrollo, es decir, los ejemplos de diseños de tramos libres de tuberías submarinas para distintas condiciones ambientales haciendo uso del programa SAP2000V14, ilustrando cada modelo y explicando detalladamente las consideraciones establecidas por las Normas DNV y la ABS; comprobando sus resultados con hojas de cálculo creadas en Microsoft Excel.

El *Capítulo 4*, muestra las conclusiones alcanzadas a medida que se fue desarrollando este trabajo, partiendo desde los objetivos. Conjuntamente, se presentan las recomendaciones pertinentes para la realización de trabajos futuros y a su vez mejorarlos.

Capítulo 1

1.1 Planteamiento del Problema

La extracción petrolera cada vez se está realizando en lugares alejados a las costas debido al incremento constante de la demanda energética mundial de hidrocarburos, lo que hace que las compañías petroleras se vean en la necesidad de transportar el petróleo desde sus yacimientos en los mares hasta plantas procesadores ubicadas en tierra firme por medio de tuberías.

Las tuberías suelen estar ubicadas sobre el fondo marino, pero hay tramos donde pierden el apoyo y comienzan a quedar suspendidas. Esto se debe a irregularidades en el fondo marino, por erosión causada por las corrientes marinas o por el cruce con otras tuberías, en estos casos las fuerzas producidas por el oleaje y las corrientes afectan el comportamiento de la tubería y se generan procesos hidrodinámicos y formación de vórtices que ocasionan vibraciones en la tubería.



Figura 1 Generación de vórtices detrás de un cilindro. (Frank White)

El tema de esta investigación es determinar una metodología de diseño para prevenir los daños por fatiga provocados por las vibraciones, y lograr que la tubería cumpla su función durante la vida útil estipulada o preferiblemente un lapso de tiempo mayor que el previsto de la reserva petrolera.

1.2 Objetivos de la Tesis

1.2.1 Objetivo general

Interpretar y desarrollar la metodología, con el uso de programas estructurales para el diseño y verificación de tuberías en tramos libres capaces de resistir las fuerzas hidrodinámicas

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar los fundamentos teóricos en los procesos de fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre tramos libres de tuberías submarinas así como las normativas, publicaciones y estados de arte relativas al diseño de tuberías submarinas.
- Identificar los parámetros y mecanismos involucrados en la resistencia de tuberías sobre el lecho marino.
- Definir las solicitaciones de corto y largo plazo que actúan sobre las tuberías, frecuencia de vórtices y frecuencias naturales de las tuberías, identificando vibraciones y fatiga a las que está sujeta la tubería.
- Presentar el diseño de un modelo y ejemplos prácticos de aplicación con los distintos parámetros hidrodinámicos que afectan a las tuberías incluyendo validación de resultados.

1.3 Justificación

En la actualidad no existen en el país normas que establezcan procedimientos para el diseño ni verificación de tuberías submarinas sometidas a fuerzas hidrodinámicas en el fondo marino.

La extracción del petróleo es cada vez más difícil y se requiere la explotación de yacimientos alejados de las costas del país, lo que origina la necesidad de transportar al fluido desde su yacimiento hasta la costa para su procesamiento. Este transporte es realizado por medio de tuberías que pueden sufrir daños debido a las solicitaciones del medio, por lo que es necesario conocer las condiciones a las que pueden estar sometidas, su comportamiento y tener metodologías para la verificación y diseño.

1.4 Alcance y limitaciones

1.4.1 Alcance

- La tubería se analizará exclusivamente para el efecto de las condiciones ambientales submarinas en los tramos libres.

1.4.2 Limitaciones

- Se considera un tramo libre, no se analizan tramos libres consecutivos, ni tuberías suspendidas en un punto de apoyo.
- No se consideran los efectos de las cargas operativas, tales como presión y temperatura.
- No se analizan problemas de pandeo.
- No se analizan los problemas de estabilidad lateral ni los efectos sísmicos.

1.5 Antecedentes

En la Universidad Católica Andrés Bello se ha venido trabajando en una línea de investigación que se ha dedicado a estudiar las solicitaciones y los fenómenos a los cuales puede estar sometida una tubería submarina. Este estudio es el cuarto de esta línea de investigación y tomará en cuenta las solicitaciones hidrodinámicas a las que se someten las tuberías en tramos libres.

Las investigaciones anteriores se concentraron en:

- Análisis estructural de tuberías submarinas
- Análisis y diseño sísmico de tuberías submarinas
- Análisis de estabilidad en tuberías submarinas para cargas hidrodinámicas

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Tramos libres

Los tramos libres son las zonas donde la tubería deja de estar apoyada en el suelo marino. Una tubería puede perder el apoyo sobre el fondo marino debido a las siguientes situaciones:

- Cruce de tuberías
- Cambios batimétrico en el fondo marino
- Erosión o socavamiento por efectos de olas y corriente marina.

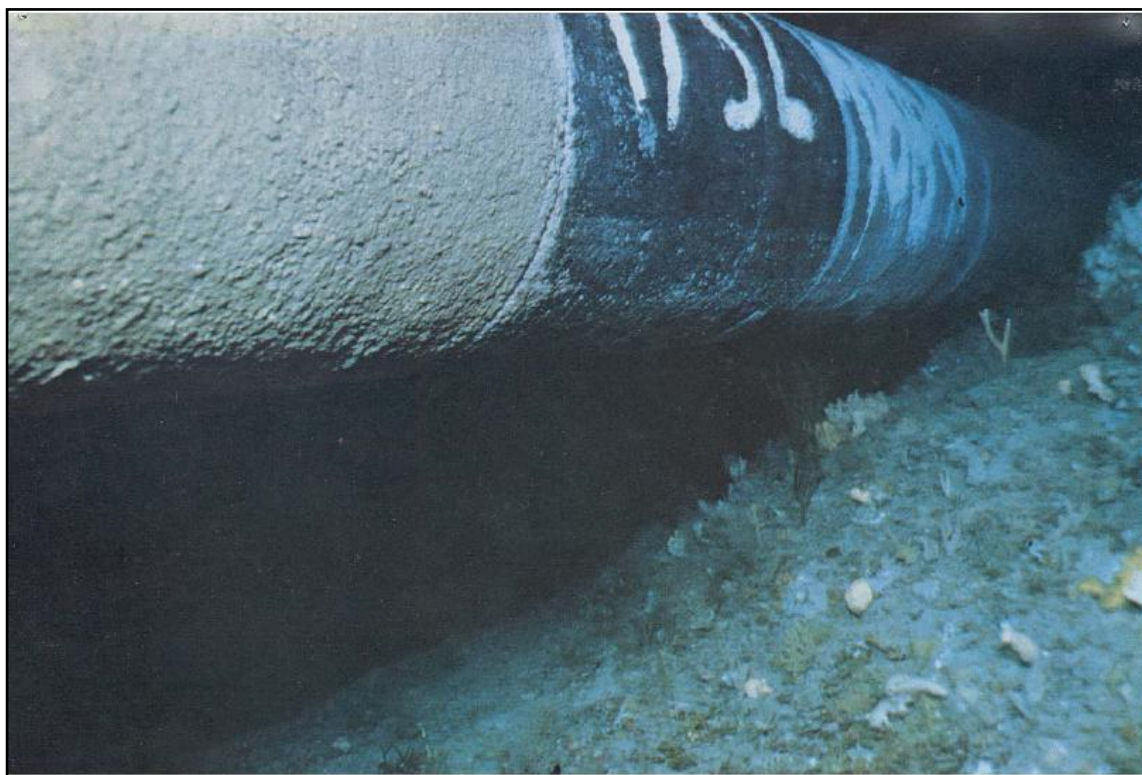


Figura 2 Tramo libre por socavación de fondo marino

En el diseño de una tubería es importante considerar este caso operacional, ya que la tubería está sometida a fuerzas hidrodinámicas producto de oleaje y de las corrientes marinas, lo que puede ocasionar que ocurra el desprendimiento de la capa límite de la corriente y se produzca un flujo cruzado (vórtices) detrás de la tubería sometiéndola a fuerzas alternantes y vibración; de esta manera se pueden ocasionar fallas por fatiga en los puntos más débiles de la tubería, que usualmente son las soldaduras.

2.1.1 Clasificación de los tramos libres

Los tramos libres son clasificados según las normas noruegas “Det Norske Veritas DNV-RP-F105” en dos grandes grupos:

1. Tramos libres causados por erosiones del fondo marino

Este tipo de tramos libres suelen ser inestables en el tiempo, su longitud y altura pueden variar con el tiempo.

2. Tramos libres causados por desniveles en el fondo marino.

Este tipo de tramos libres son estables en el tiempo, a menos que las condiciones de operaciones (presiones y temperaturas) cambien.

Estos a su vez pueden ser subdivididos en otras categorías como las que se presentan a continuación:

2.1.1.1 Según la forma de los tramos libres.

- Tramos libres aislados: son llamados así cuando las respuestas estáticas o dinámicas de un tramo libre no se ven afectados por otro tramo libre contiguo.
- Tramos libres interactivos: es cuando las respuestas estáticas o dinámicas de un tramo libre se ven afectadas por otro tramo libre contiguo.

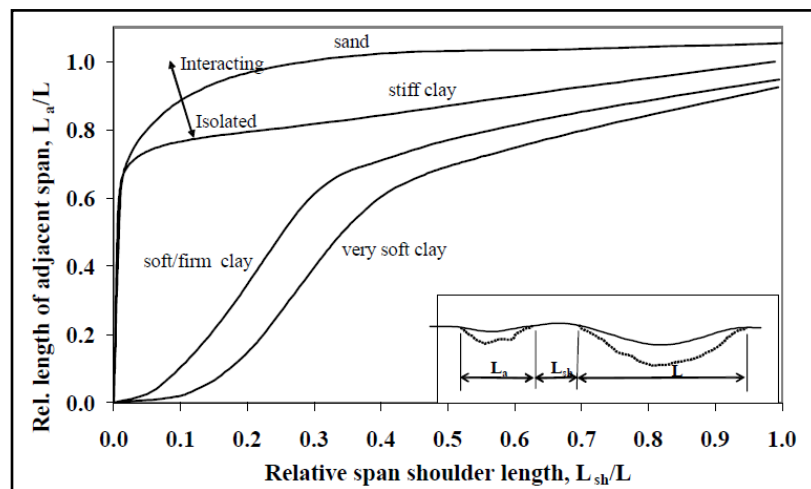


Figura 3 Clasificación del tramo libre (DNV-RP-F105)

2.1.1.2 Según los modos de vibración del tramo libre.

- Tramo libre aislado individual con un solo modo de vibración
- Tramo libre aislado individual con varios modos de vibración
- Múltiples Tramos libres interactivos con un solo modo de vibración
- Múltiples tramos libres interactivos con varios modos de vibración

Se puede conocer la categoría del tramo libre, si se sabe su velocidad reducida y cumple las siguientes condiciones:

$$\begin{array}{ll} V_{Rd,CF} > 2 & \text{Para flujo cruzado.} \\ V_{Rd,IF} > 1 & \text{Para flujo en línea.} \end{array}$$

Donde:

$V_{Rd,CF}$: Velocidad reducida para flujo cruzado

$V_{Rd,IF}$: Velocidad reducida para flujo en línea

Si se cumple uno de los dos criterios anteriores el tramo libre se considerará de un solo modo de vibración, en caso contrario se considerará de varios modos de vibración.

2.1.1.3 Según el comportamiento del tramo libre.

El comportamiento de la tubería dependerá de la relación de la longitud del tramo libre y del diámetro de la tubería (L/D) (Parámetro geométrico).

- $(L/D) < 30$

Tramos libres ocasionados por desniveles locales en el fondo marino y por erosión; **tienen muy poca amplificación dinámica.**

- $30 < (L/D) < 100$

Espacios de gran importancia entre la tubería y el fondo marino generados por erosión y condiciones de operación; **el comportamiento de la tubería es como el de una viga.**

- $100 < (L/D) < 200$

Tramos libres ocasionados por desniveles temporales; **la tubería podrá tener el comportamiento como el de un cable o viga.**

- $(L/D) > 200$

Generalmente ocurre en tuberías de diámetros pequeños; **la tubería tendrá el comportamiento de un cable.**

2.2 Condiciones ambientales a tomar en cuenta:

Las condiciones ambientales ocurren por fenómenos naturales que pueden contribuir a daños estructurales en las tuberías submarinas. Dentro de los fenómenos más importantes destacan:

- Viento
- Olas
- Corriente marina
- Marea

Las condiciones ambientales son variables físicas representadas estadísticamente, estas estadísticas deben señalar las condiciones extremas, así como las variaciones a corto y largo plazo de cada variable, por lo que es necesario trabajar con datos estadísticos representativos en la zona de los proyectos.

2.2.1 Regímenes de Flujo y acciones a tomar en cuenta

Las normas DNV y ABS tienen distintas maneras de analizar las tuberías en tramos libres, a continuación se muestran las acciones recomendadas que el ingeniero debe realizar para el análisis de los tramos libres:

2.2.1.1 Según DNV-RP-F105

Antes que nada es necesario conocer un índice que sirva de guía para conocer en qué tipo de flujo se encuentra la tubería, flujo permanente (corriente) u oscilatorio (oleaje). Este índice es definido como “Relación de la Velocidad del flujo de Corriente (α)”:

$$\alpha = \frac{U_c}{U_c + u} \quad (EC - 1)$$

Donde:

U_c : Es la velocidad de la corriente normal de la tubería

u : Es la velocidad inducida de ola significativa a nivel de la tubería

Este parámetro es indicativo de las condiciones que se generan en la tubería, estableciendo si es posible que se generen vibraciones por generación de vórtices o no.

Los regímenes de flujo se clasifican de la siguiente manera:

- **Si $\alpha < 0.5$ Domina la ola - la ola se superpone a la corriente**

Para este caso las fuerzas generadas en línea (paralelas a la dirección del flujo, fuerzas de arrastre) son calculadas con la ecuación de Morison. (Ver 2.7 Ecuación de Morison) Los daños de fatiga por vibraciones en línea debido al desprendimiento de vórtices son despreciables.

La norma (DNV-RP-F105, 2006) en la sección 4, recomienda un modelo de respuesta para evaluar la tubería debido a las fuerzas por el flujo cruzado que es causado por desprendimiento de vórtices asimétricos.

- **Si $0.5 < \alpha < 0.8$ Domina la ola- Corriente superpuesta por la ola.**

En este caso las fuerzas generadas en línea son descritas con la fórmula de Morison. (Ver 2.7 Ecuación de Morison). Las vibraciones en línea son mitigadas debido al efecto del oleaje.

La norma (DNV-RP-F105, 2006) en la sección 4, recomienda un modelo de respuesta para evaluar la tubería debido a las fuerzas por el flujo cruzado que es causado por desprendimiento de vórtices asimétricos.

- **Si $\alpha > 0.8$ Domina la corriente.**

Las fuerzas generadas en línea contienen los siguientes componentes.

- Componente dominante del arrastre constante
- Componente oscilatorio debido al desprendimiento regular de los vórtices

Para el análisis de fatiga se debe aplicar un modelo de respuesta recomendado en la sección 4 de la norma DNV-RP-F105; las fuerzas en línea formuladas de acuerdo a la ecuación de Morison son normalmente despreciables.

Las fuerzas debido al flujo cruzado son cíclicas y generadas por el desprendimiento de los vórtices; estas fuerzas puede ser halladas con el modelo de respuesta de la sección 4 de la (DNV-RP-F105, 2006).

2.2.1.2 Según ABS Subsea pipeline systems

Los procedimientos de las normas americanas son más sencillos para analizar el tramo libre, ellos sugieren lo siguiente:

- **En aguas poco profundas:** Realizar un análisis de fatiga debido a las fuerzas por oleaje utilizando la ecuación de Morison.
- **En aguas profundas:** Calcular la velocidad de la corriente crítica para los movimientos en línea y perpendiculares al flujo y calcular el esfuerzos generado por la corriente.

2.2.2 Condiciones de oleajes

Una ola es una onda que traslada en la superficie del mar a causa de una fuerza externa que perturba la superficie. Cuando la superficie es perturbada en forma vertical las fuerzas inerciales del agua y la fuerza gravedad tenderán a restablecer el equilibrio en la partícula del agua quién a su vez perturbará a otra partícula que se encuentra cercana a ella y es de esta manera que las olas se trasladan a través del mar. Las fuerzas que pueden generar esta perturbación son el viento, barcos o una fuerza sísmica.

Las condiciones de olas deben ser consideradas en los diseños estructurales de tuberías submarinas. Dependiendo de los lugares, la profundidad, del criterio del ingeniero y de ciertos parámetros que serán definidos más adelante, se escogerá un tipo de teoría de ola.

Con el tipo de teoría de ola escogida se calcularán la longitud, la cinemática y dinámicas de las olas y de esta manera se podrá obtener las fuerzas debido al oleaje a las que está sometida la tubería.

La teoría de olas más común usada es la desarrollada por Airy. Esta teoría provee ecuaciones que definen las propiedades cinemáticas y dinámicas de las partículas de la ola y su superficie. Sin embargo para ciertas condiciones no es capaz de predecir correctamente las velocidades de partículas y longitudes de la ola.

Las variables anunciadas abajo son los parámetros que definen a las olas:

- Longitud de ola (λ): es la distancia entre crestas sucesivas.
- Período de ola (T): es el intervalo de tiempo entre crestas sucesivas pasando por un punto.
- Celeridad de ola (c): es la velocidad de propagación de la ola, se denota $c = \frac{\lambda}{T}$.

- Frecuencia de la ola (f): es el inverso del período, se denota $f = \frac{1}{T}$.
- Frecuencia angular de la ola (ω): se denota $\omega = \frac{2\pi}{T}$.
- Número de ola (k): $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.
- Elevación de superficie (η): es la distancia entre el nivel medio y la superficie del agua.
- Altura de la cresta de la ola (A_C): es la distancia desde el nivel medio del agua hasta la cresta.
- Profundidad de la ola (A_T): es la distancia desde el nivel medio del agua hasta el punto más bajo de la ola.
- Altura de la ola (H): es la distancia vertical desde el punto más bajo de la ola (valle) hasta la cresta, se denota $H = A_C + A_T$

En la Figura 4 se muestra algunos de los parámetros que definen a las olas

2.3 Teorías de olas

2.3.1 Teoría de olas regulares

Tres parámetros determinan que teoría de ola usar en un problema específico. Estos son la altura de ola (H), período de ola (T) y la profundidad de agua (d). Estos parámetros son usados para hallar tres parámetros adimensionales que determinan los rangos de validación de las teorías de olas.

- Pendiente de la ola (S):

$$S = \frac{2\pi H}{gT^2} = \frac{H}{\lambda o} \quad (EC - 2)$$

- Superficie de la ola (μ):

$$\mu = \frac{2\pi d}{gT^2} = \frac{d}{\lambda o} \quad (EC - 3)$$

- Número Ursell (Ur):

$$Ur = \frac{H\lambda^2}{d^3} = \frac{S}{\mu^3} \quad (EC - 4)$$

El número Ursell también puede ser definido como:

$$U_r = \frac{H}{k_o^2 d^3} \quad (EC - 5)$$

Donde λ_o es la longitud de onda en la profundidad media del agua y k_o es el número de ola correspondiente al período.

Los rangos de aplicación de las teorías de olas se muestran en la Figura 5.

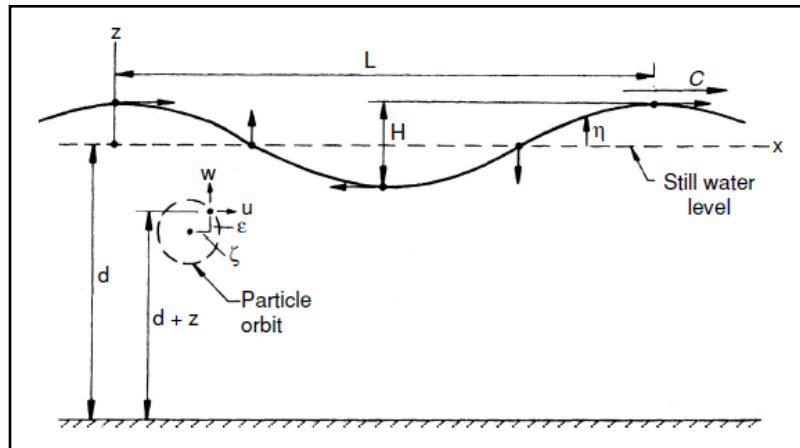


Figura 4 Parámetros de una ola (Basic Coastal Engineering)

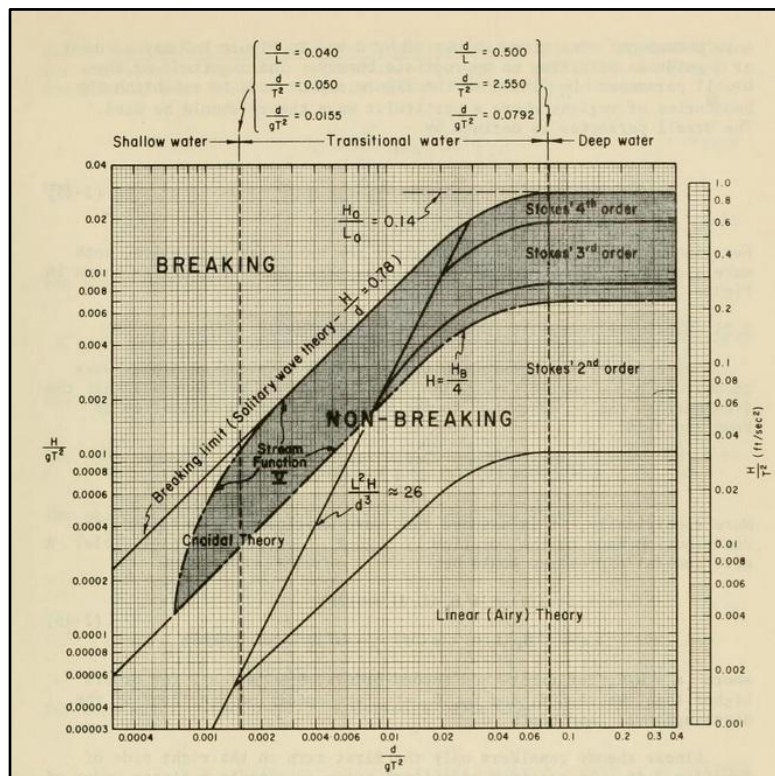


Figura 5 Validación de teoría de olas (U.S. Shore Protection Manual)

2.3.2 Teoría de ola de poca amplitud (Airy)

La validez de esta teoría es para aguas profundas, donde la altura de la ola es más pequeña que la profundidad media del mar y que la longitud de la ola. La altura de la ola viene definida por la altura de la cresta de la ola (A_c) y la altura del valle de la ola (A_T) que en este caso son iguales, por lo tanto:

$$(A_c = A_T)$$

El perfil de la ola viene dado por la siguiente ecuación:

$$\eta(X, Y, t) = \frac{H}{2} \cos \theta \quad (EC - 6)$$

Donde: $\theta = k(X \cos \beta + Y \sin \beta) - \omega t$ es la fase, β es la dirección de propagación medida desde el eje "x" positivo.

El período de la ola viene dado por la siguiente expresión:

$$T = \left[\frac{g}{2\pi\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^{-1/2} \quad (EC - 7)$$

Y la frecuencia angular en función del número de ola:

$$\omega = [gk \tanh(kd)]^{1/2} \quad (EC - 8)$$

Para calcular la longitud de onda en función del período, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\lambda = T(gd)^{1/2} \left(\frac{f(\varpi)}{1 + \varpi f(\varpi)} \right)^{1/2} \quad (EC - 9)$$

Donde: $f(\varpi) = 1 + \sum_{n=1}^4 \alpha_n \varpi^n$ $\wedge$ $\omega = (4\pi^2 d)/(gT^2)$ y

$$\alpha_1 = 0,666; \alpha_2 = 0,445; \alpha_3 = -0,105; \alpha_4 = 0,272$$

La solución gráfica de la ecuación (EC – 9) es la siguiente:

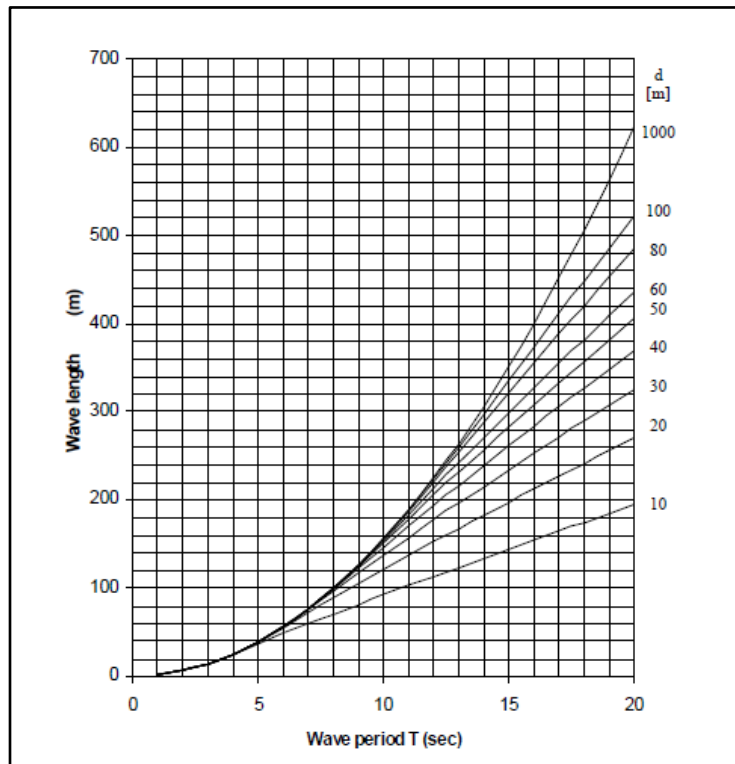


Figura 6 Relación entre período de ola y longitud de ola. (DNV-RP-F105)

La celeridad de la ola está dada por la siguiente ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \quad (EC - 10)$$

Para aguas profundas donde $d > \frac{\lambda}{2}$ la fórmula se simplifica:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{g}{\omega} = \frac{gT}{2\pi} \quad (EC - 11)$$

Y la longitud de onda queda:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \text{ o } \lambda = 1,56T^2 \quad (EC - 12)$$

Con "T" en segundos

La solución gráfica de la ecuación (EC – 10) se presenta a continuación:

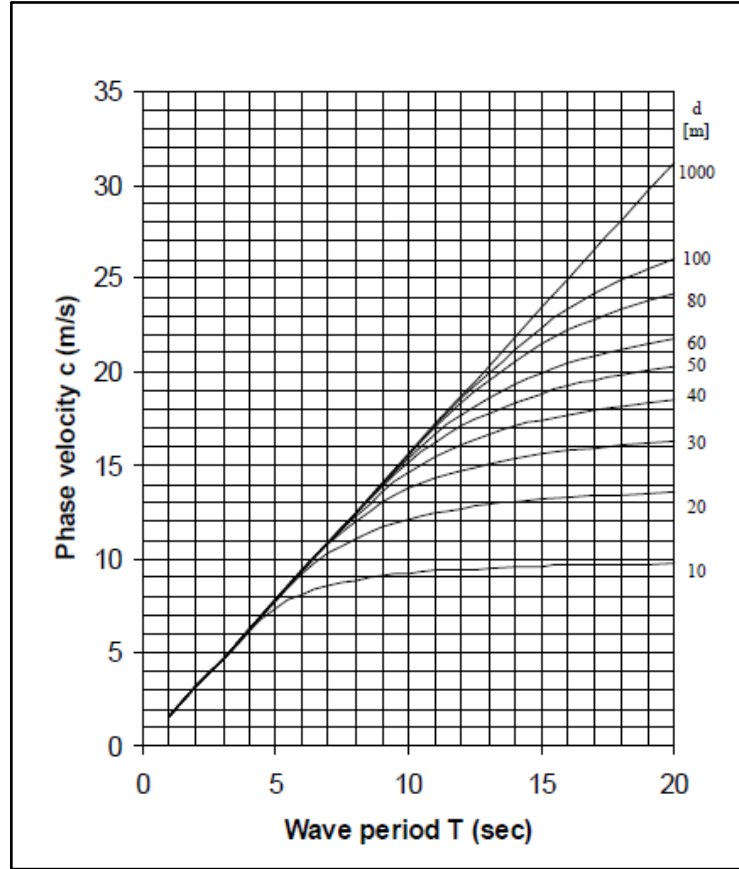


Figura 7 Celeridad de la onda. (DNV-RP-F105)

2.3.3 Teoría de olas de Stoke

Las teorías de Stokes son una ampliación a la ecuación de la superficie de ola de la teoría lineal de olas y las olas son asimétricas con $A_C > A_T$. Las crestas son más empinadas y los valles más amplios. Para conocer su validez puede usarse la “Figura 5 Validación de teoría de olas (U.S. Shore Protection Manual)”.

Usualmente se emplean formulaciones de segundo y tercer orden como se indican a continuación:

a. De segundo orden

El perfil de la superficie de la ola viene dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} [2 + \cosh(2kd)] \cos 2\theta \quad (EC - 13)$$

Donde: $\theta = k(X \cos \beta + Y \sin \beta) - \omega t$

En aguas profundas $d > \frac{\lambda}{2}$ la ecuación se reduce a:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta + \frac{\pi H^2}{4\lambda} \cos 2\theta \quad (EC - 14)$$

Para las olas de segundo orden en aguas profundas:

$$A_c = \eta(\theta = 0) = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{\pi H}{2\lambda} \right) \quad (EC - 15)$$

$$A_T = |\eta(\theta = \pi)| = \frac{H}{2} \left(1 - \frac{\pi H}{2\lambda} \right) \quad (EC - 16)$$

Así, la altura de la cresta viene incrementada por el factor $1 + \frac{\pi H}{2\lambda}$. Los cálculos de la longitud de ola y de la celeridad de la onda son los mismos que para la teoría lineal de olas. Ecuaciones (EC - 9) y (EC - 10).

b. Tercer Orden

En la Teoría de Stokes de tercer orden la velocidad de fase depende de la altura de la ola y la fórmula viene dada por:

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd) \left\{ 1 + \left(\frac{kH}{2} \right)^2 \left[\frac{9 - 8 \cosh^2(kd) + 8 \cosh^4(kd)}{8 \sinh^4(kd)} \right] \right\} \quad (EC - 17)$$

Para aguas profundas $d > \frac{\lambda}{2}$ la fórmula se simplifica:

$$c^2 = \frac{g}{k} \left[1 + \left(\frac{kH}{2} \right)^2 \right] \quad (EC - 18)$$

Las fórmulas para desplazamientos de partículas de fluidos, velocidad de partículas, aceleración y presión en la sub superficie en Olas de Stokes de segundo orden, están dados en el Apéndice 2.

La teoría de Stokes de quinto orden es utilizada para olas con parámetros $S < S_{máx}$ y $U_r < 30$ (Fenton, 1985). El método para cálculo de olas de Stoke de cualquier orden es presentado por Schwartz (Schwartz, 1974) y Longuet-Higgins (Longuet-Higgins, 1975)

Las teorías de Stokes tienen una restricción y es que la máxima relación de altura cresta y altura de ola para olas es 0,635.

La teoría de Stokes no es aplicable para aguas poco profundas y con $U_R > 30$. Para este tipo de condiciones es recomendable usar la Teoría de Sinusoidal de Olas o la Teoría de la Ola en Función de Corrientes (Stream Function). En casos donde $U_R \approx 30$ la Teoría Sinusoidal y de Stokes de Quinto orden, tienen inexactitudes, para este caso es recomendable utilizar el método de Olas en Función de Corrientes.

2.3.4 Teoría Sinusoidal

La ola Sinusoidal es una ola con crestas afiladas y valles anchos. Esta teoría debe ser usada cuando los factores $\mu < 0,125$ y $U_R > 30$. La relación entre altura de crestas y altura de olas está comprendida entre 0,65 y 1,00. La teoría Sinusoidal de Ola está descrita por (Wiegley, 1960), (Mallery&Clark, 1972) y en (Dean R. G., 1984).

2.3.5 Teoría de Ola Solitaria

Para altos número de Ursell, la longitud de onda para la Teoría Sinusoidal tiende al infinito y es por esto que se llama a la teoría Ola Solitaria. Las olas solitarias se propagan sobre aguas poco profundas y la elevación de la superficie se encuentra totalmente por encima del nivel medio del agua, de esta manera $A_c = H$. El perfil para Olas Solitaria es el siguiente:

$$\eta(x, t) = H \cosh^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}\varepsilon}{2d} \left(1 - \frac{5}{8}\varepsilon \right) (x - ct) \right] \quad (EC - 19)$$

Donde: $\varepsilon = H/d$. La celeridad de la ola es $c = 1.33\sqrt{gd}$

2.3.6 Teoría de la Ola en función de la Corriente (Stream Function)

Este método es un procedimiento numérico para la aproximación de un perfil de ola y tiene una validación mucho más amplia que la de las teorías anteriores.

La teoría de Ola en función de la corriente tiene la siguiente solución:

$$\psi(x, z) = cz + \sum_{n=1}^N X_{(n)} \sinh(kz)(z + d) \cosh(nkx) \quad (EC - 20)$$

Donde c es la celeridad de la ola y N es el número de orden de la teoría de ola.

El número de orden requerido para la Teoría de Ola en función de la corriente es determinado por los parámetros de pendiente S y de superficialidad μ . Para $N = 1$, la teoría en función de la corriente se simplifica a la Teoría Lineal de Ola.

Mientras se desee llegar con mayor exactitud a la altura de rompimiento de la ola, será necesaria la utilización de mayor cantidad de términos. (Dean R. , Stream Functions Representation of nonlinear ocean waves, 1965) (Dean R. , Relative validities of water wave theories, 1970) han hecho referencia.

2.4 Análisis estadísticos de las olas

La necesidad de tener un análisis estadístico de las olas es que de un gran conjunto de datos durante un largo tiempo se logre obtener un valor significativo y representativo de los datos. Para alturas de olas donde pueden variar significativamente, los datos generan una curva asimétrica que puede ser estudiada por la distribución de Rayleigh.

La distribución de Rayleigh indica que la altura significativa (H_S) es:

$$H_S = 4\sigma \quad (EC - 21)$$

Donde σ es la desviación estándar de los datos.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \eta_n^2} \quad (EC - 22)$$

Siendo η la altura de ola medida

La distribución de Rayleigh es la siguiente:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}} \right)^2 \right\} \quad (EC - 23)$$

A continuación se muestra una curva de distribución de Rayleigh típica:

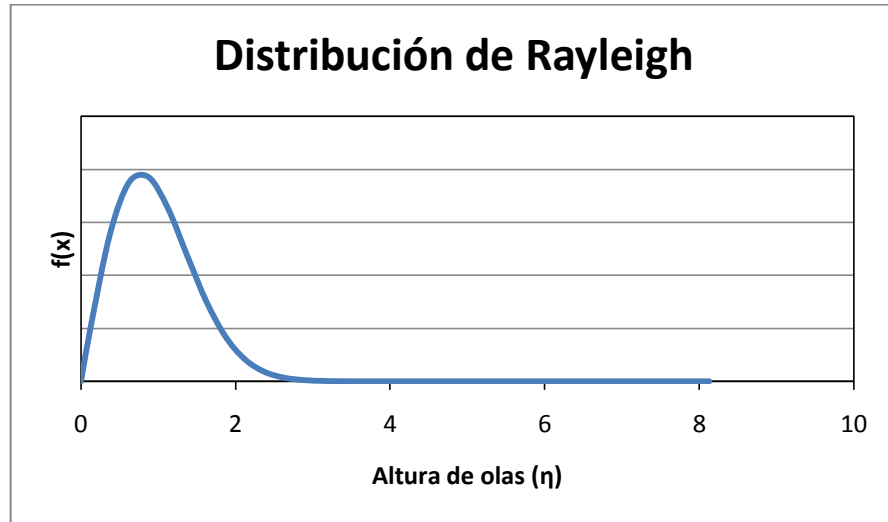


Figura 8 Distribución de Rayleigh

También se puede relacionar la altura significativa de ola con la altura máxima y período pico del estado de mar. Es importante acotar que esta relación se cumple solo para distribución de Rayleigh.

$$H_{max} = 1.86H_S \quad (EC - 24)$$

$$T_p = \sqrt{190 \frac{H_S}{g}} \quad (EC - 25)$$

La probabilidad que tiene una altura de ola en ser excedida por otra, puede ser calculada usando la siguiente expresión:

$$P\{H_S > H\} = \exp\left\{-2\left(\frac{H}{H_S}\right)^2\right\} \quad (EC - 26)$$

En la expresión anterior se estaría hallando la probabilidad en que una altura H en ser excedida por la altura significativa.

2.5 Espectro de oleaje

La utilidad del espectro de ola, es que con él se pueden hallar los valores de las olas y las velocidades significativas que produce el oleaje al nivel de la tubería requerido para el cálculo o verificación del tramo libre. El espectro que se presenta es llamado “JOSWAP o Pierson-Moskowitz”, es un espectro de energía que relaciona la frecuencia angular de la ola con su energía. Como se verá más adelante el espectro de energía se puede transformar en espectro de velocidades a nivel de la tubería.

La función de densidad espectral es:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \gamma \exp\left(-0.5\left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2\right) \quad (EC - 27)$$

Donde:

$\omega = 2\pi/T_W$ Es la frecuencia angular de la ola

T_W Período de Ola

T_p Período Pico

$\omega_p = 2\pi/T_p$ Es la frecuencia angular pico del espectro.

g La aceleración gravitatoria

La constante de Phillip (α) es dada por:

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} (1 - \ln \gamma) \quad (EC - 28)$$

El parámetro de anchura del espectro es:

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{si } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{si } \omega > \omega_p \end{cases}$$

El factor de mayoración pico es dado por:

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \varphi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi) & 3,6 < \varphi < 5 \\ 1 & \varphi \geq 5 \end{cases} \quad (EC - 29)$$

Donde:

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (EC - 30)$$

H_s viene dada en metros y T_p en segundos.

Cuando $\gamma = 1$ el espectro se convierte en el espectro de Pierson-Moskowitz.

Ambos espectros JONSWAP y Pierson-Moskowitz describen las condiciones de Olas por viento marino, que son razonablemente los peores casos. Sin embargo para casos de mares moderados y bajos, no dominados por el fetch, es común usar una composición de dos espectros, olas generadas por vientos marinos y por olas generadas en lugares remotos. Deben ser considerados dos picos de espectros (bi-modal) tomando en cuenta las olas hinchadas (swell).

El espectro de velocidad inducida por ola, al nivel de la tubería $S_{UU}(\omega)$ puede ser obtenido usando una transformación espectral de las olas al nivel del mar usando la teoría de olas de primer orden (Airy).

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega)S_{\eta\eta}(\omega) \quad (EC - 31)$$

$G^2(\omega)$ es la función de transformación de frecuencia del nivel del mar a velocidades de flujo inducidas por ondas en el nivel de la tubería, y es de la siguiente forma:

$$G(\omega) = \frac{\omega \cosh(k \cdot (D + e))}{\sinh(k \cdot h)} \quad (EC - 32)$$

Donde h es la profundidad de agua y k es el número de ola, establecido a partir de iteraciones de la transcendente ecuación:

$$k \cdot h = \frac{\omega^2 h}{g} \cosh(k \cdot h) \quad (EC - 33)$$

Nota: La función de transferencia es válida solo para teorías de primer orden y está estrictamente prohibida su aplicabilidad para aguas poco profundas.

2.5.1 Momentos espectrales

Los Momentos espectrales de orden “n” son definidos como:

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega \quad (EC - 34)$$

Los momentos espectrales permiten hallar parámetros de estados de mar, que como se dijo antes serán importante a la hora de la verificación del tramo libre.

Para el espectro de JONSWAP los momentos espectrales aproximados son:

$$M_{-1} = \frac{1}{16} H_S^2 \omega_p^{-1} \frac{4.2 + \gamma}{5 + \gamma} \quad (EC - 35)$$

$$M_0 = \frac{1}{16} H_S^2 \quad (EC - 36)$$

$$M_1 = \frac{1}{16} H_S^2 \omega_p \frac{6.8 + \gamma}{5 + \gamma} \quad (EC - 37)$$

$$M_2 = \frac{1}{16} H_S^2 \omega_p^2 \frac{11 + \gamma}{5 + \gamma} \quad (EC - 38)$$

Los siguientes parámetros espectrales derivados aparecen:

- Amplitud significativa de velocidad del flujo a nivel de la tubería:

$$U_S = 2\sqrt{M_0} \quad (EC - 39)$$

- Período de ola significativa:

$$T_Z = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (EC - 40)$$

U_S y T_Z pueden ser obtenidos usando las siguientes gráficas, asumiendo teoría de Ola lineal.

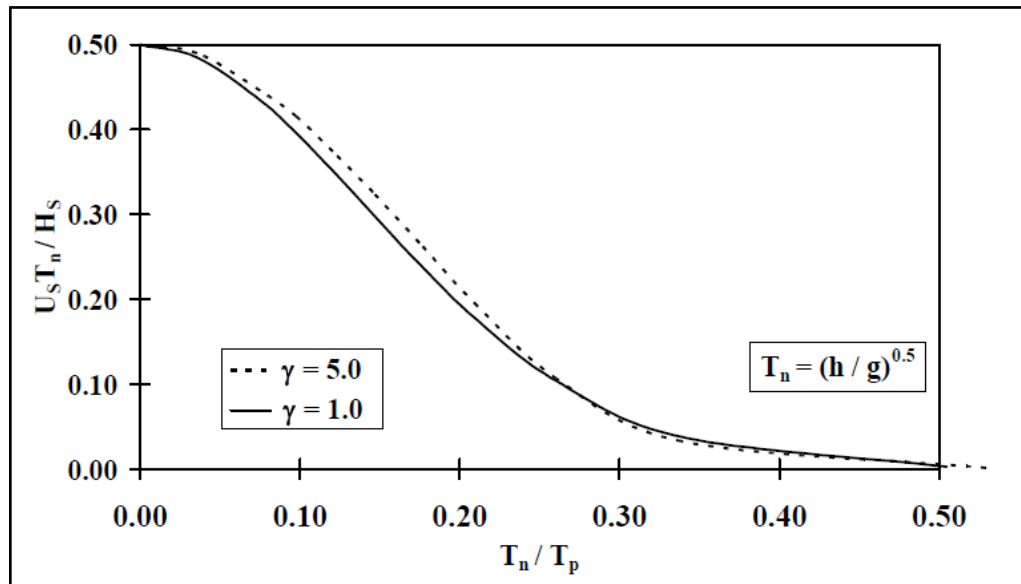


Figura 9 Velocidad significativa del flujo a nivel de la tubería. (DNV-RP-F105)

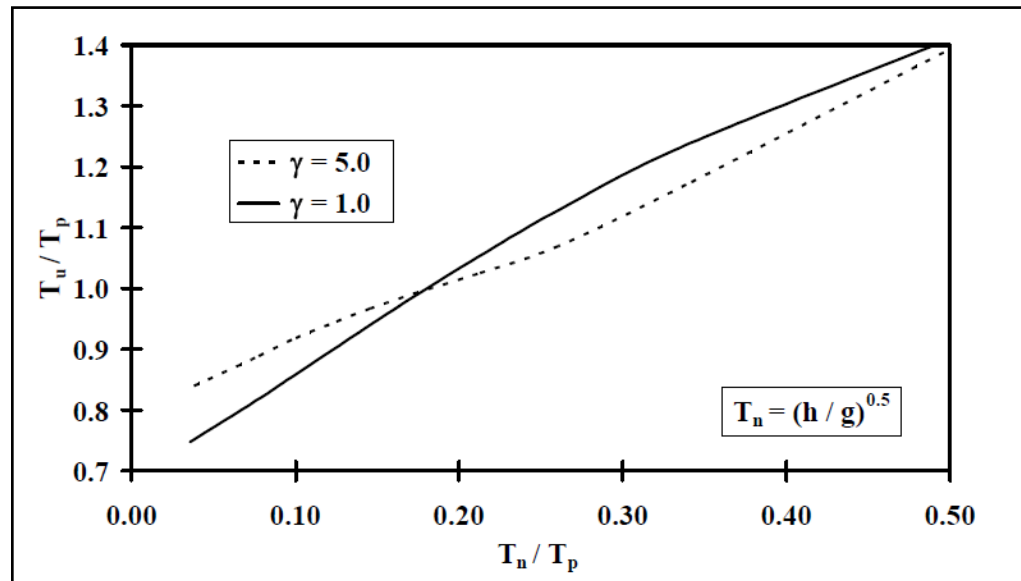


Figura 10 Período de ola significativa T_z . (DNV-RP-F105)

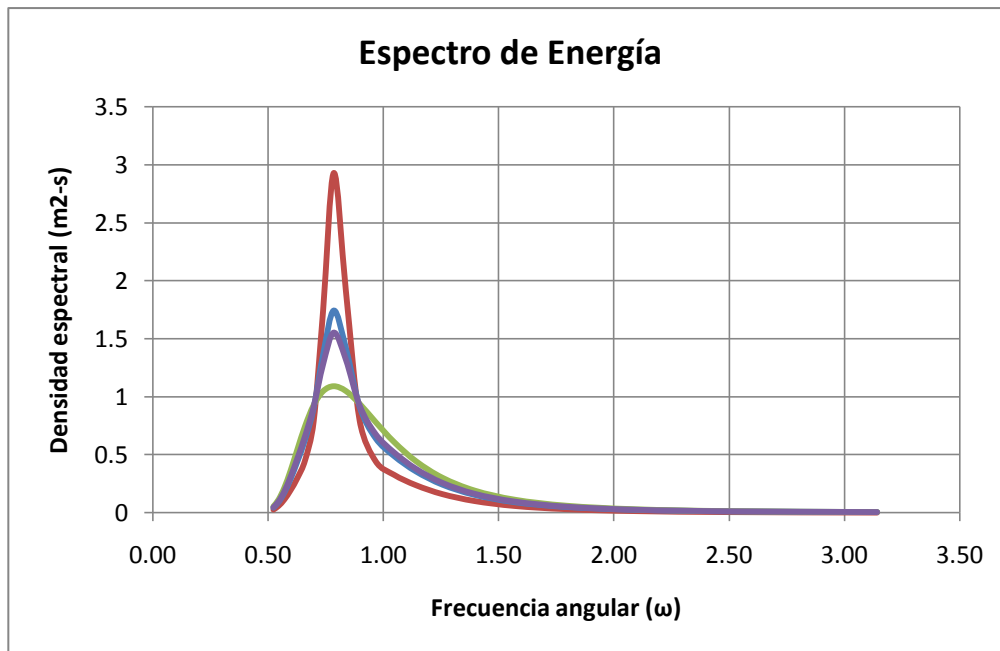


Figura 11 Espectros de olas. (Fuente el autor)

2.6 Condiciones de Corriente

Las corrientes es otro factor que incide en el diseño de las tuberías submarinas, ya que ellas pueden generar lo siguiente:

- Fuerzas de arrastre y de sustentación en estructuras sumergidas.
- Vibraciones inducidas por vórtices en elementos esbeltos, y movimientos inducidos por vórtices en estructuras de gran volumen.
- Las interacciones entre fuertes corrientes y olas conlleva a cambios en la altura y períodos de las olas.
- Erosión en el fondo marino alrededor de las partes bajas de las estructuras apoyadas en el suelo marino.

2.6.1 Tipos de corrientes

Las corrientes oceánicas son divididas comúnmente de la siguiente manera:

- Corrientes generadas por vientos: causadas por la presión del viento y por gradientes de presión debido a tormentas.

- Corrientes de Marea: son regulares y siguen el movimiento astronómico armónico de los planetas. En aguas profundas no tienen mayor relevancia, pero en regiones de costa y en estrechos si.
- Corrientes circulantes: son constantes, corrientes de gran escala de la circulación general oceánica. Pueden romper y pasar a ser corrientes Loop/Eddy.
- Corrientes Loop/Eddy: son corrientes que pueden penetrar profundo en la columna de agua.
- Corrientes Soliton: son debidas a olas internas generadas por gradientes de densidad.
- Corrientes de costa: corrientes que corren paralelas a las costas litorales, debido al rompimiento de las olas con un ángulo en la costa. Suelen ser llamadas corrientes de litoral.

El flujo constante de corrientes al nivel del tramo libre puede tener los siguientes componentes:

- Corrientes de Marea
- Corrientes generadas por Viento
- Corrientes generadas por tormentas
- Corrientes soliton

Los efectos por olas internas, usualmente visto al sur-este de Asia, deben tomarse en cuenta para el estudio de los tramos libres. Las olas internas pueden tener partículas de fluidos a altas velocidades que pueden ser modeladas como una distribución de corrientes equivalentes.

En aguas con profundidades mayores a 100 metros, las corrientes marinas pueden ser caracterizadas en términos de sus agentes de manejo y dirección:

- Los agentes de manejo son fuerzas de mareas, gradientes de presiones debido a la elevación de la superficie o cambios de densidad, viento y fuerzas de mareas por tormentas.
- Los agentes de dirección son topográficos y de rotación de la tierra.

El modelaje de las corrientes debe tomar en cuenta adecuadamente todos los agentes.

El flujo puede ser dividido en dos zonas:

- Una zona exterior lejana al fondo marino donde la velocidad media de la corriente y la turbulencia varía muy poco en la dirección horizontal.
- Una zona interior donde la velocidad media de la corriente y turbulencia tienen variaciones significativas en la dirección horizontal, la velocidad y la dirección de la corriente son función de la geometría local del fondo marino.

La zona externa en batimetrías irregulares está localizada al doble de la altura de las crestas del fondo marino. En caso de fondos marinos planos la zona exterior estará localizada aproximadamente a una altura dada según:

$$h = 3600Z_o \quad (EC - 41)$$

Donde Z_o es la rugosidad del fondo, ver Tabla 1 Rugosidades del fondo marino para un tipo de suelo.

2.6.2 Velocidad de corriente

El vector de la velocidad de la corriente varía con la profundidad del agua. Cercano a la superficie del agua el perfil de velocidad de corriente será de mayor o menor magnitud debido a la superficie de las olas ver Figura 12. En general el vector de velocidad de corriente varía en tiempo y espacio.

$$V_c = V_c(x, y, z, t) \quad (EC - 42)$$

La dependencia del tiempo es debido a las fluctuaciones que tiene el flujo debido a la turbulencia.

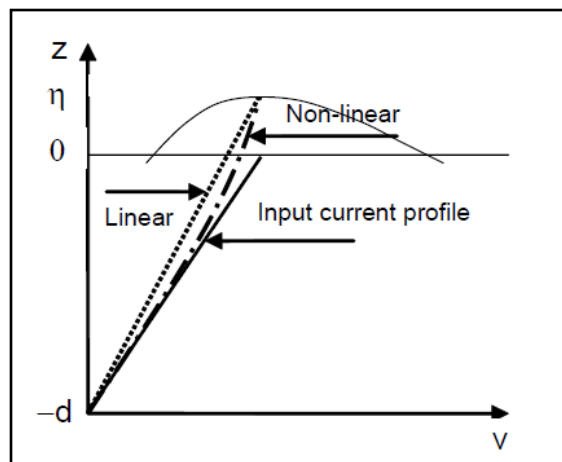


Figura 12 Perfil de corriente. (DNV-RP-F105)

Para la mayoría de las aplicaciones para cálculos de fuerzas debido a la corriente, la velocidad de la corriente puede ser considerada como un campo de flujo constante donde el vector velocidad (en magnitud y dirección) es solamente función de la profundidad. En el diseño de ciertas estructuras sensibles a corrientes dinámicas, debe ser tomado en cuenta la turbulencia.

La velocidad de corriente total dada una posición (x, y) debe ser tomada como el vector suma de los componentes de corrientes presentes, generadas por viento, marea, corrientes circulantes, etc.

$$V_c(Z) = V_{c,viento}(Z) + V_{c,marea}(Z) + V_{c,circ}(Z) + \dots \quad (EC - 43)$$

2.6.3 Mediciones de corrientes

Hay dos tipos de mediciones disponibles para obtener información acerca de las velocidades de las corrientes en los océanos:

- **Mediciones Directas:** Provee información acerca de la velocidad de la corriente en un número finito de puntos fijos. Los ejemplos son un correntómetro de rotor, usando unas propelas que giran alrededor de un eje vertical y correntómetros acústicos, que emitiendo una pequeña serie de sonidos de pulsos de olas y midiendo la señal reflejada de las partículas que viajan con las corrientes.
- **Medidas indirectas:** son las medidas donde se realizan mediciones de la salinidad y temperaturas en ciertos lugares que son usados para estimar la densidad; y las velocidades medias de las corrientes pueden ser derivadas de las ecuaciones Geostróficas. (Pickard, 1990) y (Dean R. G., 1984)

Las medidas de las corrientes deben ser hechas con un correntómetro en la zona exterior de la capa límite. Para corrientes de gran escala, tales como las manejadas por los vientos y corrientes de marea, la elección de las posiciones de medición puede ser basada en las variaciones de la topografía del fondo asumiendo que las corrientes son geostróficas¹, por ejemplo, principalmente paralelas a gran escala a los contornos del fondo.

Sobre lomas lisas la separación del flujo ocurre cuando la pendiente de la loma excede los 20° de inclinación. La información de mediciones de corrientes en la capa límite sobre fondos de forma irregular son valores poco prácticos cuando se extrapolan a valores de corrientes de otros lugares.

En la zona interna el perfil de velocidades de corrientes es aproximadamente logarítmico en aéreas donde la separación del flujo no ocurre:

$$U(z) = R_c \cdot U(z_r) \frac{(\ln(z) - \ln(z_o))}{(\ln(z_r) - \ln(z_o))} \quad (EC - 44)$$

¹ Son corrientes generadas por el balance de la carga hidráulica y un gradiente de presión horizontal que se opone al componente horizontal de Coriolis. $\nabla_h P = -\rho(2\Omega \times u)_h$

Donde:

$R_c = \sin \theta_{rel}$ y θ_{rel} es el ángulo relativo que forma la corriente contra el eje de la tubería

z : Elevación sobre el fondo marino

z_r : Altura de medida de referencia (en la zona exterior)

z_o : Parámetro de rugosidad a ser tomado de la Tabla 1

Si no se realiza un análisis detallado de la velocidad de las corrientes en la zona de desarrollos de los proyectos, debe usarse los valores de los puntos cercanos más apropiados para el cálculo de la velocidad de la corriente a nivel de la tubería. El flujo y la macro rugosidad es normalmente tridimensional y la transformación de las características de las corrientes deberían tomar en cuenta topografía local del fondo.

Para Condiciones donde la corriente media es extensa sobre sectores pequeños y el flujo pueda ser considerado bidimensional, el siguiente modelo puede ser aplicado hallando la velocidad de la corriente en la zona exterior cercana al punto de medición. Se asume que la velocidad de corriente $U(z_r)$ es conocida en la zona exterior, ver “Figura 13 Definición de zona interna y zona externa. (DNV-RP-F105)”. El perfil de velocidad $U(z^*)$ en una localidad cercana al punto de medición puede ser aproximado por:

$$U(z^*) = U(z_r) \frac{(\ln(z^*) - \ln(z_m))}{(\ln(z_r^*) - \ln(z_m))} \quad (EC - 45)$$

El parámetro de “macro-rugosidad” z_m es dado por:

$$\ln(z_m) = \ln(z_r^*) - \frac{z_r^*}{(z_r^* - z_r) + \frac{z_r}{\ln(z_r) - \ln(z_o)}} \quad (EC - 46)$$

z_m debe ser tomado menor a 0,2

Tabla 1 Rugosidades del fondo marino para un tipo de suelo

Fondo marino	Rugosidad Z_0 (m)
Limo	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
Arena fina	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Arena Media	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
Arena gruesa	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Grava	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Guijarro	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Piedras Redondas	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Rocas/Peña/Canto Rodado	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

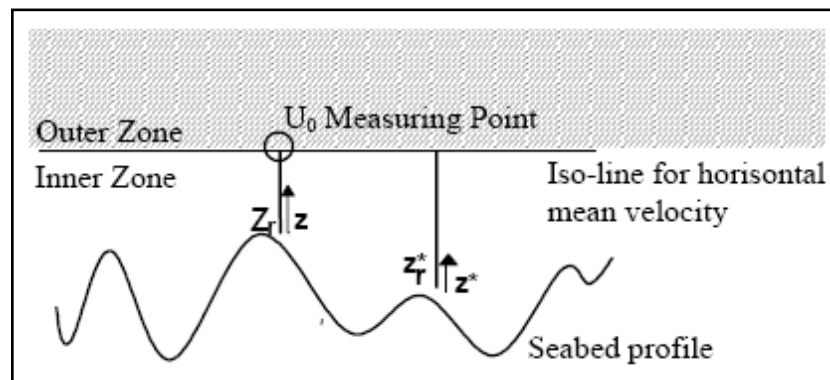


Figura 13 Definición de zona interna y zona externa. (DNV-RP-F105)

2.7 Ecuación de Morison

Las partículas de agua se encuentran en constante movimiento debido a las olas, por lo que sufren aceleraciones y desaceleraciones generando fuerzas sobre los cuerpos que están inmersos en el agua. Estas fuerzas tienen dos componentes una debido a la velocidad de la partícula y otra debido a su aceleración. La manera de cuantificar estas fuerzas es por medio de la fórmula de Morison, quién fue el primero en estudiar las fuerzas de olas ejercidas en pilotes.

El primer componente de la ecuación viene dado por la velocidad de la partícula y es conocida como la fuerza de arrastre.

$$F = \frac{C_D}{2} \rho A u^2 \quad (EC - 47)$$

Donde:

C_D : Coeficiente de arrastre

ρ : Densidad del fluido

A : Área transversal en la dirección perpendicular al flujo

u : Velocidad de la partícula de agua

El segundo componente de la ecuación de Morison es conocido como las fuerzas inerciales debido a las aceleraciones de las partículas. Esta fuerza inercial tiene dos componentes, el primero es que para que haya aceleración de las partículas debe existir un gradiente de presión que obligue a las partículas a acelerar, y el segundo componente es función de la densidad del fluido, aceleración, forma del cuerpo y su volumen.

Por lo que la fuerza hidrodinámica sobre el cuerpo queda de la siguiente manera:

$$F = \frac{C_D}{2} \rho A u^2 + \int_A P_x dA + C_A \rho V \frac{du}{dt} \quad (EC - 48)$$

Donde:

V : Es el volumen del cuerpo.

$\frac{du}{dt}$: Es la aceleración de la partícula de agua.

P_x : Es la presión que actúa en dirección del flujo

dA : Es el diferencial de área donde la presión actúa.

C_A : Es la relación de una masa hipotética teniendo una aceleración $\frac{du}{dt}$ con la masa real del fluido puesto en movimiento por el cuerpo con la aceleración del cuerpo.

El segundo término de la fuerza, es la fuerza inercial debido a las aceleraciones de las partículas causadas por el gradiente de presión. El tercer término es la fuerza inercial debido a la masa añadida²

El término debido a la presión puede cambiarse sabiendo que la presión ejerce una fuerza capaz de acelerar una masa de fluido es igual al volumen del cuerpo pero a una aceleración $\frac{du}{dt}$. Por lo tanto:

$$\int_A P_x dA = \rho V \frac{du}{dt} \quad (EC - 49)$$

² La masa añadida es una masa de agua igual al volumen que ocupa la tubería

Entonces la ecuación de Morison queda:

$$F = \frac{C_D}{2} \rho A u^2 + (1 + C_A) \rho V \frac{du}{dt} \quad (EC - 50)$$

$(1 + C_A)$ es usualmente llamado C_m coeficiente de masa o coeficiente inercial.

Como las velocidades de partículas en ocasiones pueden ser negativas, entonces ocurrirán fuerzas en la dirección contraria, por lo que no se puede dejar el término de la velocidad al cuadrado (u^2) ya que elimina el signo, es necesario hacer un cambio matemático para no eliminar el signo ni el cuadrado de la velocidad, por lo tanto la ecuación debe expresarse de la siguiente manera:

$$F = \frac{C_D}{2} \rho A u |u| + C_m \rho V \frac{du}{dt} \quad (EC - 51)$$

Es de importancia saber que para aplicar la fórmula de Morison es necesario que la estructura sea más pequeña que la órbita de las partículas de agua, de esta forma existe un campo de flujo pasando por la tubería.

Cuando la estructura está muy cercana a la superficie del mar generará otras olas que causan mayores fuerzas sobre la estructura en este caso no puede emplearse la ecuación de Morison.

Según el cuerpo de ingeniería de costas de los Estados Unidos se debe cumplir $\frac{D}{\lambda} < 0.05$ para aplicar la ecuación de Morison.

Las corrientes marinas deben ser consideradas en la ecuación de Morison ya que ellas generan una fuerza de arrastre adicional. No es permitida la suma de las componentes de las fuerzas de arrastre por corriente mas la fuerza de arrastre por oleaje ya que los términos de velocidades están elevados al cuadrado y la suma de los cuadrados es distinta que la suma al cuadrado.

$$(V_c^2 + u^2) \neq (V_c + u)^2$$

Por lo tanto para realizar un buen cálculo de las fuerzas ejercidas en los cuerpos sumergidos en corrientes marinas y sometidas a oleaje, es necesario sumar las componentes de las velocidades en la misma dirección de la corriente y aplicar la fórmula.

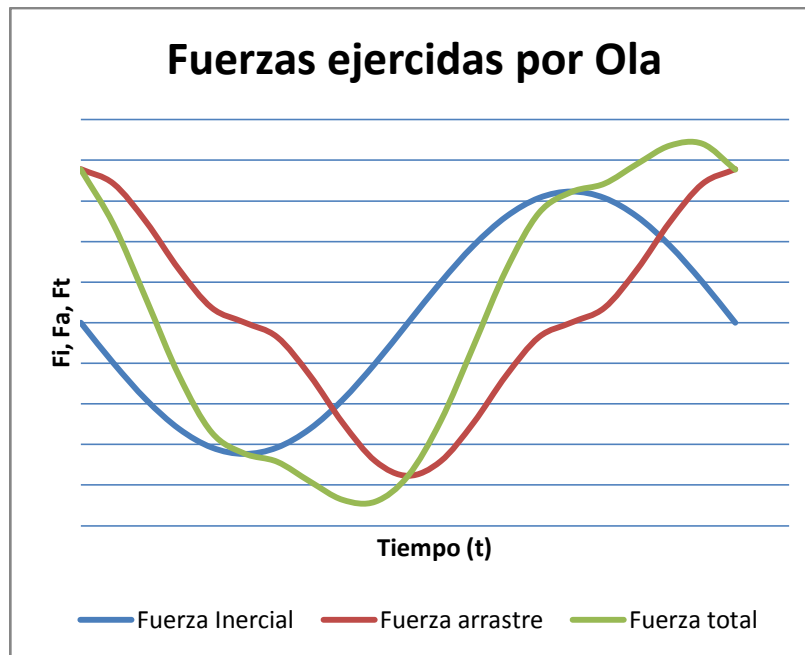


Figura 14 Gráfico de fuerzas generadas por oleaje en un período
(Referencia el autor)

2.7.1 Coeficientes de la ecuación de Morison

Como ya se dijo antes la ecuación de Morison depende de unos coeficientes, Estos coeficientes han sido hallados experimentalmente por institutos (API³, Det Norske Veritas⁴) e investigadores en el área quienes han tratado de cuantificarlos de la mejor manera para la mejor estimación de las fuerzas.

2.7.2 Parámetros Adimensionales

Los investigadores han llegado a relacionar los coeficientes de arrastres y de masas con ciertos parámetros adimensionales que son mostrados a continuación:

³ Instituto Americano de Petróleo

⁴ Es una sociedad de clasificación con Sede en Noruega, con el objetivo de promover la seguridad de la vida humana y propiedades, por medio de códigos, prácticas recomendadas, etc.

- Número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (EC - 52)$$

Donde:

V : Es la velocidad de las partículas de agua en la cresta más la velocidad de corriente $\left[\frac{m}{seg}\right]$

D : Diámetro de la tubería $[m]$

ν : Es la viscosidad cinemática $\left[\frac{m^2}{seg}\right]$

- Número de Keulegan Carpenter:

$$KC = \frac{V \cdot T}{D} \quad (EC - 53)$$

Donde:

T : Es el período de la ola

- Sarpkaya Beta

$$\beta = \frac{D^2}{\nu \cdot T} \quad (EC - 54)$$

También puede ser expresado como la relación del Número de Reynolds y Keulegan Carpenter:

$$\beta = \frac{Re}{KC} \quad (EC - 55)$$

2.7.3 Coeficientes de arrastre y de masa

A continuación se presentan gráficas de ensayos realizados y procedimientos recomendados para los cálculos de los coeficientes, muchos de ellos pueden ser conseguidos en cualquier texto de mecánica de fluidos, sin embargo las normas (DNV-RP-F105, 2006) proponen unos procedimientos que serán los aplicados en este trabajo.

Los coeficientes a ser usados en la ecuación de Morison (C_D y C_M) son en función de:

- Número de Keulegan Carpenter (Kc)
- La relación de velocidad de corriente (α)
- La relación de brecha (e/D)
- Profundidad de la brecha (Δ/D)
- Número de Reynolds (Re)
- Rugosidad de la tubería (k/D)

Los gráficos que abajo se muestran son ensayos realizados por Sarpkaya en laboratorios con el fin de definir los coeficientes para distintos Números de Keulegan Carpenter (Kc) y Sarpkaya beta (β)

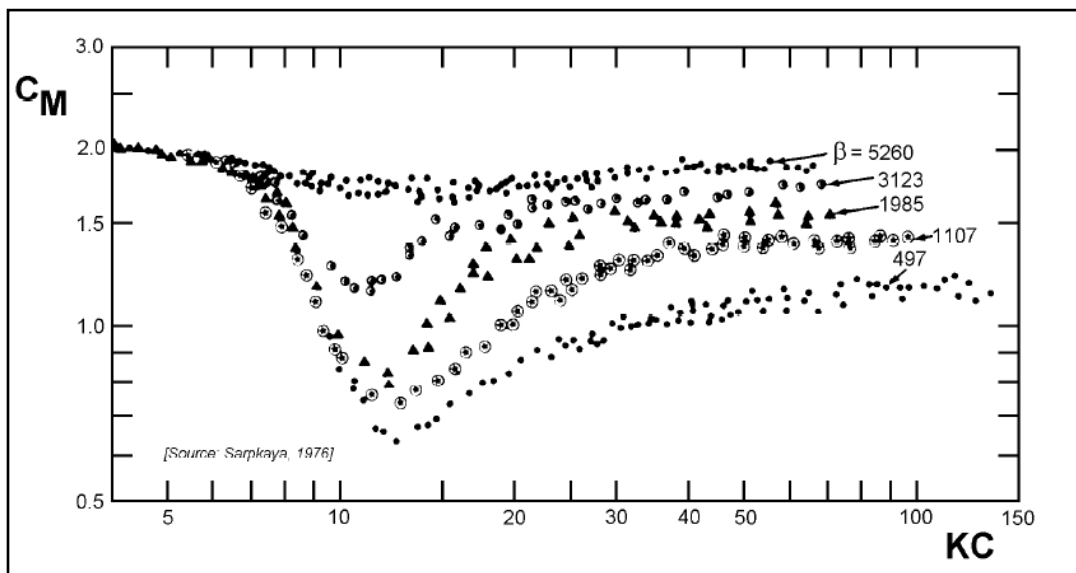


Figura 15 Resultados de experimentos de coeficientes de masa realizados por Sarpkaya. (Offshore Hydromechanics)

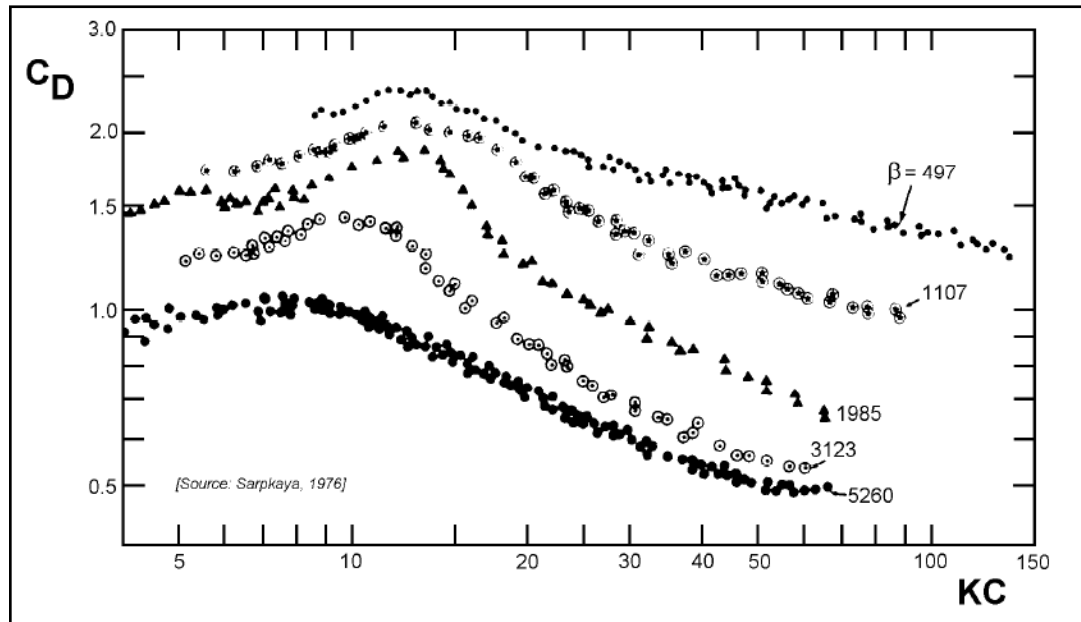


Figura 16 Resultados de experimentos de coeficientes de arrastre presentados por Sarpkaya. (Offshore Hydromechanics)

Valores recomendados por el U.S. Coastal Engineering Research Center:

Este procedimiento es bastante antiguo y no se recomienda su uso, ya que no toma en cuenta todas las condiciones a las que puede estar la tubería en el tramo libre.

○ **Coeficiente de arrastre:**

$$Re < 10^5 \rightarrow C_d = 1.2$$

$$10^5 < Re < 4 \cdot 10^5 \rightarrow C_d = [1.2 \text{ a } 0.7 - 0.6]$$

$$Re < 4 \cdot 10^5 \rightarrow C_d = 0.6 - 0.7$$

○ **Coeficientes de masa:**

$$Re < 2.5 \cdot 10^5 \rightarrow C_m = 1.2$$

$$2.5 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5 \rightarrow C_m = 2.5 - \frac{Re}{5} 10^{-5}$$

$$Re > 5 \cdot 10^5 \rightarrow C_m = 1.5$$

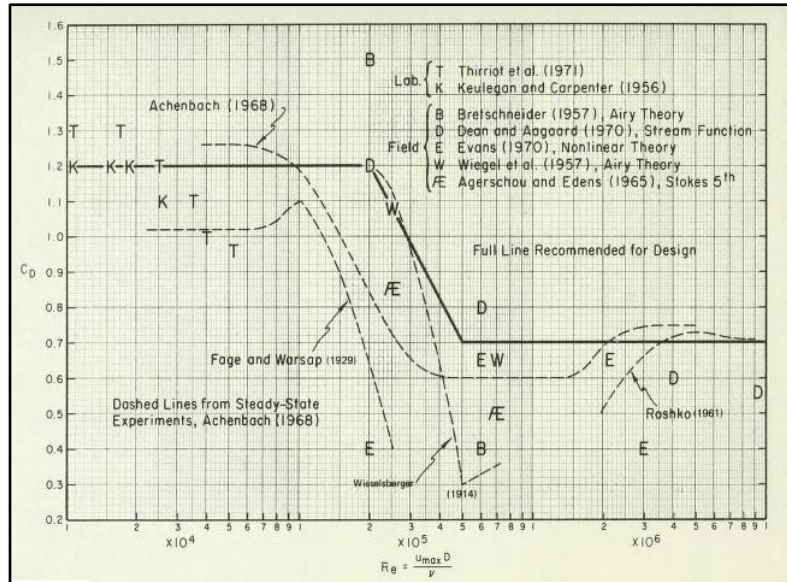


Figura 17 Coeficientes de arrastre (U.S. Army Coastal Engineering Research Center)

Cálculo de coeficiente de arrastre según la (DNV-RP-F105, 2006)

- Coeficiente de arrastre**

$$C_D = C_D^0(k/D) \cdot \psi_{KC,\alpha}^{CD} \cdot \psi_{proxi}^{CD} \cdot \psi_{trench}^{CD} \cdot \psi_{VIV}^{CD} \quad (EC - 56)$$

Donde $C_D^0(k/D)$ es el coeficiente de arrastre para flujo constante

$$C_D^0(k/D) = \begin{cases} 0.65 & ; k/D < 10^{-4} \\ 0.65 \cdot \left(\frac{29}{13} + \frac{4}{3} \log_{10}(k/D) \right) & ; 10^{-4} < k/D < 10^{-2} \\ 1.05 & ; k/D > 10^{-2} \end{cases} \quad (EC - 57)$$

Siendo k la rugosidad externa de la tubería hallado de la Tabla 2 Rugosidad externas de tuberías.

La relación k/D es con el diámetro externo de la tubería.

Tabla 2 Rugosidad externas de tuberías

Superficie de la tubería	k (metros)
Hierro pintado	10^{-6}
Hierro sin recubrimiento, sin óxidos	10^{-5}
Concreto	$1/300$
Crecimiento marino	$1/300 \rightarrow 1/20$

$\psi_{KC,\alpha}^{CD}$ es un factor de corrección que toma en cuenta la inestabilidad del flujo.

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0.85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & ; \alpha \leq 0.5 \\ 0.6 + \frac{6}{KC} & ; \alpha > 0.5 \end{cases} \quad 5 < KC < 40 \quad (EC - 58)$$

Para valores de KC mayores a 40 el término $\frac{6}{KC}$ debe ser sustituido por 0.15

Generalmente para valores de KC menores que 5 la fuerza de arrastre es de poca importancia y el valor de KC puede ser hallado por interpolación de la Figura 18 Factores de corrección por inestabilidad del flujo. (DNV-RP-F105).

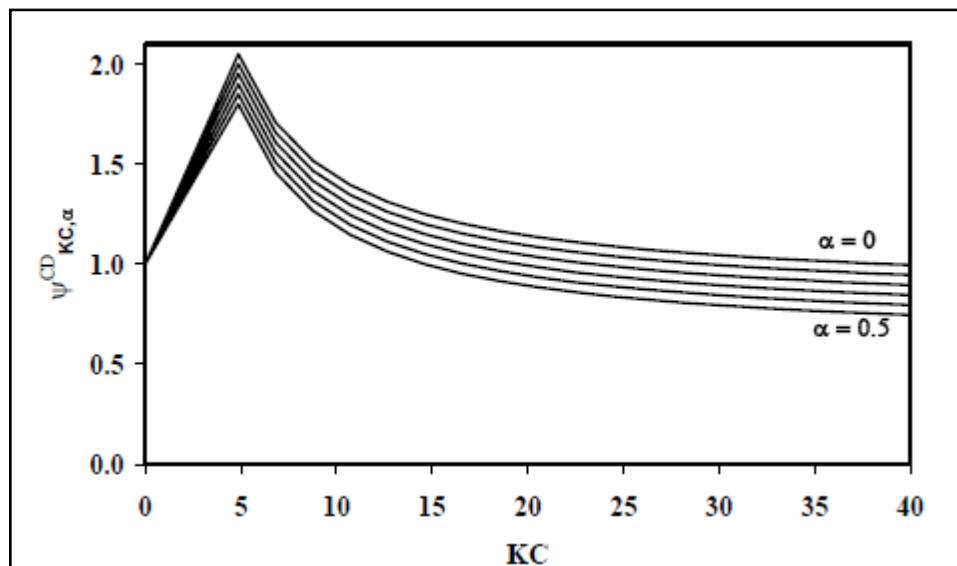


Figura 18 Factores de corrección por inestabilidad del flujo. (DNV-RP-F105)

ψ_{proxi}^{CD} es un factor de corrección que toma en cuenta la proximidad de la tubería al fondo marino.

$$\psi_{proxi}^{CD} = \begin{cases} 0.9 + \frac{0.5}{(1 + 5(e/D))} & e/D < 0.8 \\ 1 & \text{sino} \end{cases} \quad (EC - 59)$$

ψ_{trench}^{CD} es un factor de corrección por la zanja de la tubería.

$$\psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\Delta}{D} \right) \quad (EC - 60)$$

Siendo:

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{1.25d - e}{D} \quad (EC - 61)$$

La profundidad de la zanja debe ser tomada con respecto a una distancia de 3 veces el diámetro desde los extremos de la tubería, como se muestra a continuación.

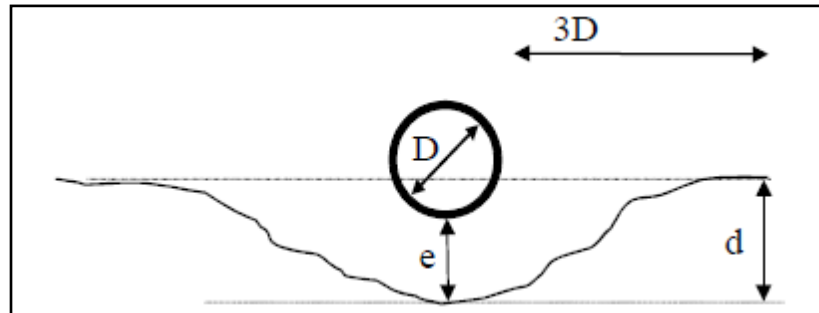


Figura 19 Definición de parámetro de tubería

ψ_{VIV}^{CD} Es un factor de corrección de vibraciones inducidas por vórtices, que debe tomarse en cuenta solo cuando la tubería entra en resonancia con la frecuencia de los vórtices.

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \left(\sqrt{2} \cdot \frac{A_z}{D} \right)^{0.65} \quad (EC - 62)$$

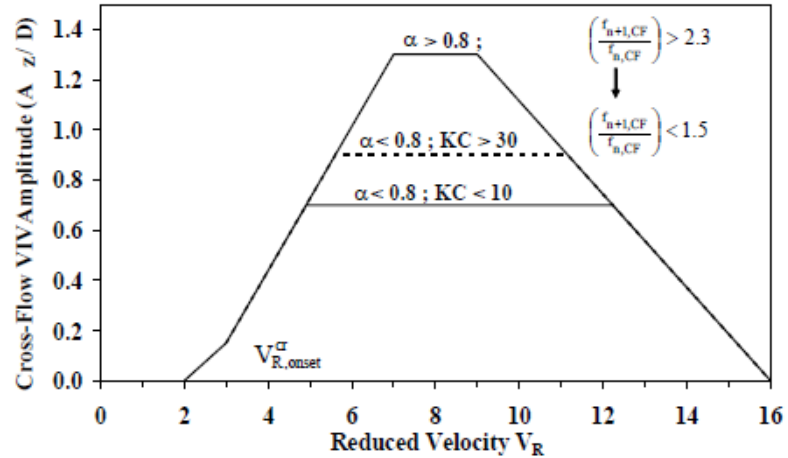


Figura 20 Valores de amplitud de flujo cruzado de vibraciones indicadas por vórtices (A_z/D). (DNV-RP-F105)

Cálculo de coeficiente de masa según la (DNV-RP-F105, 2006)

El coeficiente de masa es definido como:

$$C_M = C_{M,0} \cdot \psi_k^{CM} \cdot \psi_{proxi}^{CM} \cdot \psi_{trench}^{CM} \quad (EC - 63)$$

Donde $C_{M,0}$ es el coeficiente de masa para flujo constante puede ser obtenido de la Figura 21 o de las ecuaciones abajo descritas.

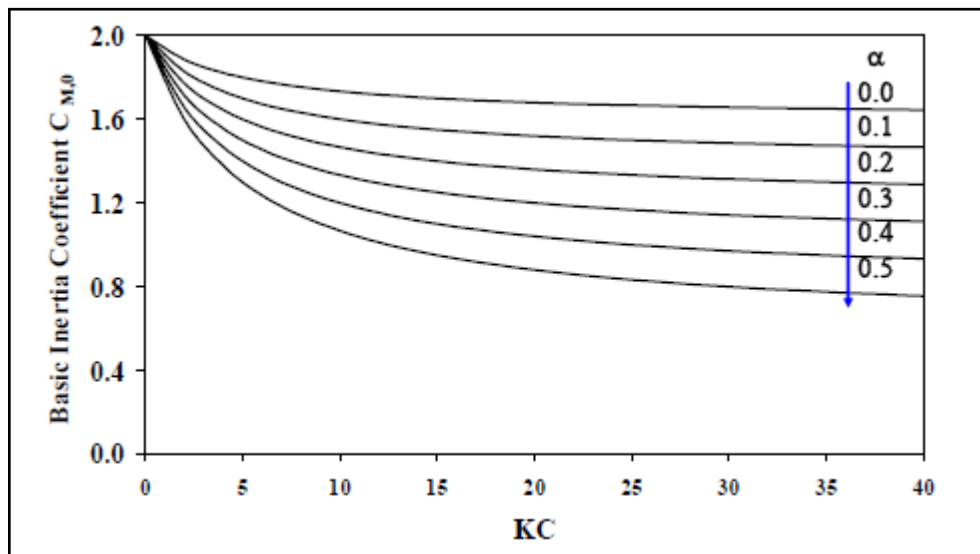


Figura 21 Coeficiente de masa. (DNV-RP-F105)

$$C_{M,0} = f_{(\alpha)} + \frac{5 \cdot (2 - f_{(\alpha)})}{(KC + 5)} \quad (EC - 64)$$

$$f_{(\alpha)} = \begin{cases} 1.6 - 2\alpha & ; \quad \alpha \leq 0.5 \\ 0.6 & ; \quad \alpha > 0.5 \end{cases} \quad (EC - 65)$$

ψ_k^{CM} es el factor de corrección que toma en cuenta la rugosidad de la tubería

$$\psi_k^{CM} = 0.75 - 0.434 \log\left(\frac{k}{D}\right) \quad (EC - 66)$$

ψ_{proxi}^{CM} es el factor de la tubería por la cercanía al fondo marino

$$\psi_{proxi}^{CM} = \begin{cases} 0.84 + \frac{0.8}{(1 + 5 \cdot (e/D))} & \text{para } e/D < 0.8 \\ 1 & \text{sino} \end{cases} \quad (EC - 67)$$

ψ_{trench}^{CM} Es el factor de corrección que toma en cuenta el efecto de la tubería en la zanja

$$\psi_{trench}^{CM} = 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta}{D} \right) \quad (EC - 68)$$

2.8 Fuerza de Sustentación

La fuerza de sustentación es usada para calcular las fuerzas generadas por el flujo cruzado. El flujo cruzado puede generarse por dos situaciones, la primera es por la proximidad de la tubería al fondo marino, ya que esto hace que el punto teórico de velocidad cero en la tubería se desplace, y se genere una fuerza perpendicular a la dirección del flujo. Ver Figura 22 Punto de velocidad cero. (Summer & Fredsoe, 1997)

La segunda razón es por el desprendimiento de vórtices asimétricos, cada vez que un vórtice se desprende ejerce una fuerza sobre la tubería con dos componentes, una es la de arrastre y la segunda es la de sustentación, ver Figura 23 Fuerza resultante por vórtices y sus componentes. La fuerza puede ser calculada por la siguiente fórmula:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 D \cdot \sin(2\pi f_v t) \quad (EC - 69)$$

Donde:

C_L : Coeficiente de sustentación

U : La velocidad del flujo, puede ser expresado como $(V_c + u) \cdot |V_c + u|$

t : El tiempo (seg)

f_v : Frecuencia de desprendimiento de los vórtices

Debido a que los vórtices son alternativos, la fuerza también lo es, y su magnitud varía más o menos en una forma sinusoidal.

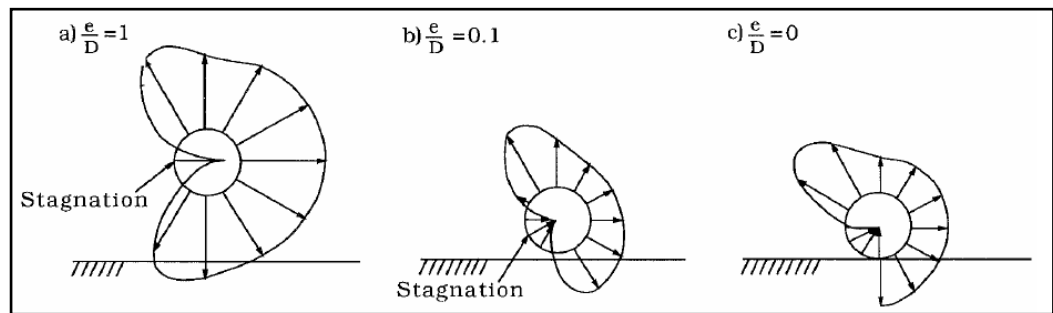


Figura 22 Punto de velocidad cero. (Summer & Fredsoe, 1997)

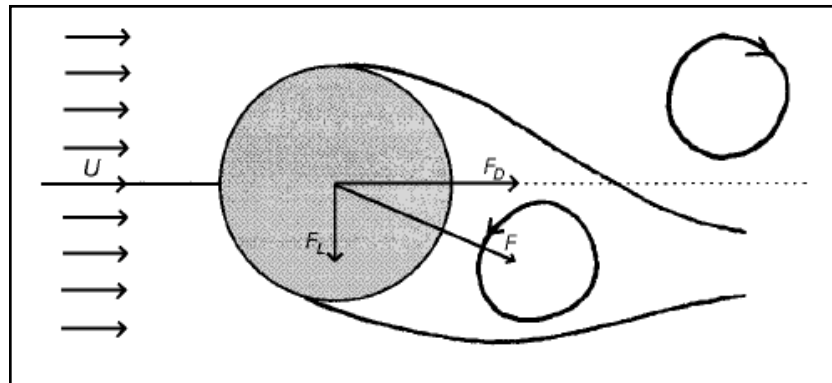


Figura 23 Fuerza resultante por vórtices y sus componentes.

2.8.1 Coeficientes de sustentación

Los coeficientes de sustentación pueden ser hallados usando la Figura 24 Coeficientes de sustentación. Cuando la fuerza de sustentación sea generada por el desprendimiento de los vórtices es recomendado usar $C_L = 0.9$. Este valor es bastante conservador y fue hallado por (Nedergaard et al, 1994) realizando ensayos.

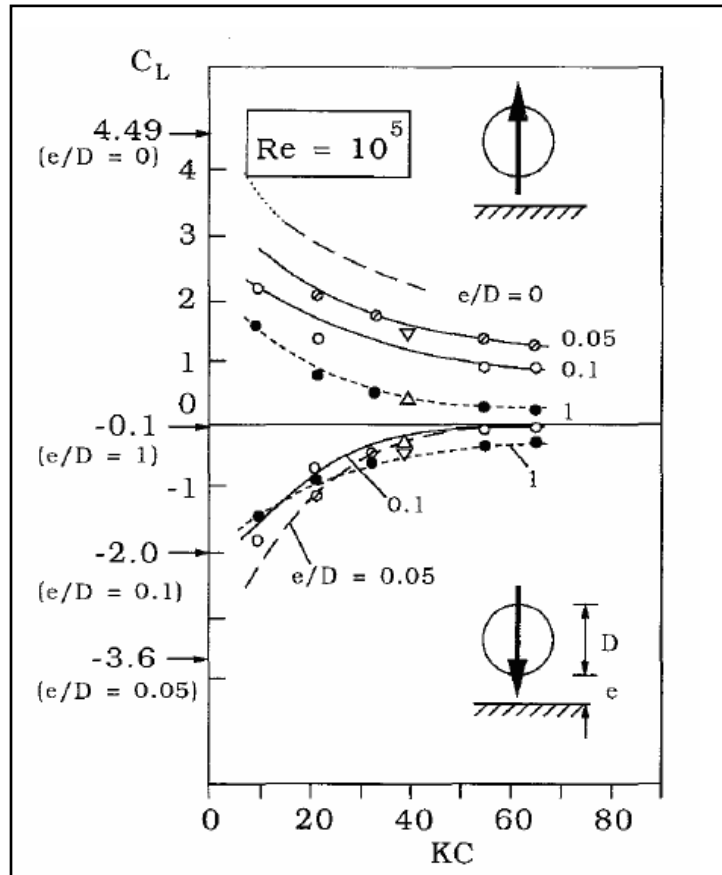


Figura 24 Coeficientes de sustentación (Summer & Fredsoe, 1997)

2.8.2 Frecuencia de desprendimiento de vórtices.

Las tuberías submarinas están sometidas a un fenómeno de desprendimiento de vórtices debido al paso del flujo. Para situaciones reales siempre habrá desprendimientos de vórtices, puesto que es muy poco probable que ocurra un flujo laminar, ver Figura 26

El desprendimiento de los vórtices ocurre de manera cíclica y casi de forma sinusoidal como fue antes mencionado. El número de Strouhal (St) un parámetro adimensional que relaciona las velocidades del flujo con las frecuencias de desprendimiento de los vórtices. El número de Strouhal depende del número de Reynolds (Re) como se muestra en la Figura 25

$$St = \frac{f_v \cdot D}{U} \quad (EC - 70)$$

Donde:

St : Número de Strouhal.

f_v : Frecuencia de desprendimiento de vórtices.

D : Diámetro de la tubería

U : La velocidad del flujo, puede ser expresado como $(V_c + u)$

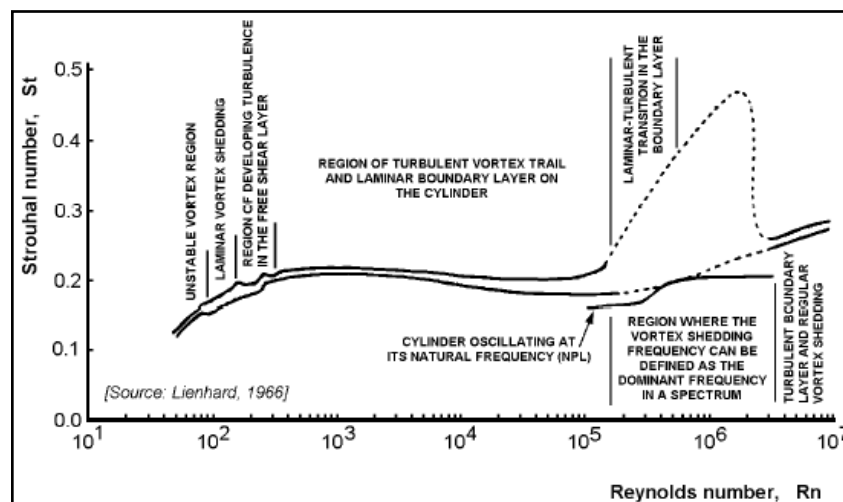


Figura 25 Número de Strouhal. (Offshore Hydromechanics)

Para valores de Reynolds $10^2 < Re < 2 \cdot 10^5$ el valor del número de Strouhal puede ser tomado como $St = 0.2$ y para valores de $Re > 2 \cdot 10^5$ incrementa un poco y por lo tanto la frecuencia de desprendimiento de vórtices y la fuerza de sustentación son difíciles de definir.

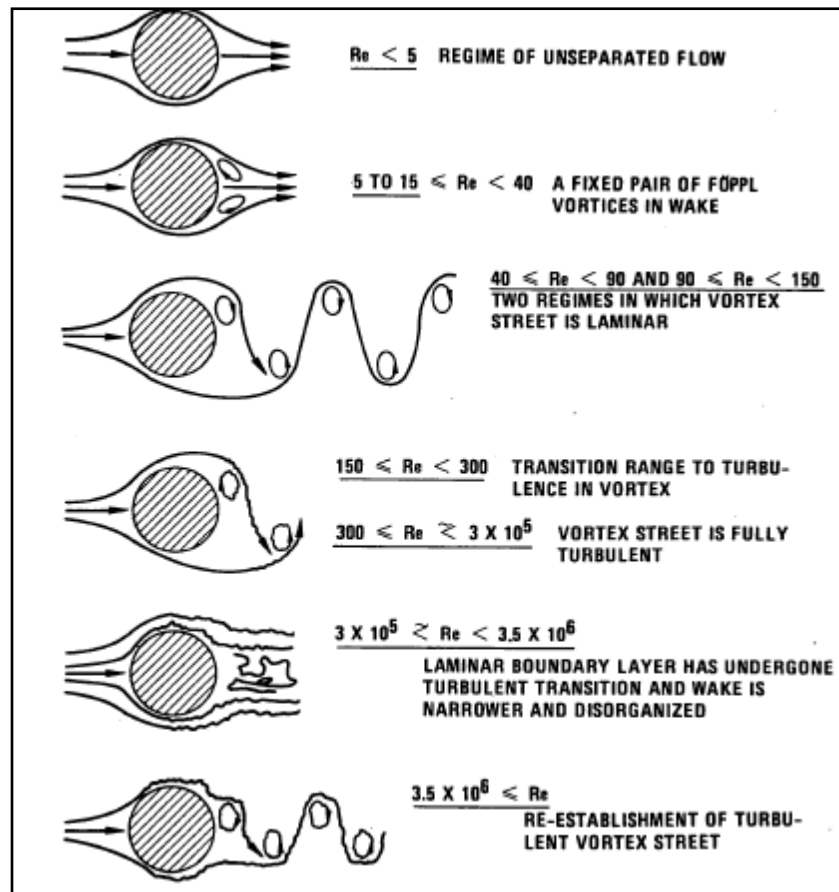


Figura 26 Desprendimiento de vórtice. (Flow Induced Vibration, Robert D. Blevins)

2.8.3 Vibraciones inducidas por vórtices

Esta es una condición que generan los desprendimientos de los vórtices y se debe tener muy en cuenta, ya que es la que causa mayores problemas en las tuberías en tramos libres debido a que amplifica las fuerzas hidrodinámicas a las que está sometida la tubería. Esta condición debe tener una consideración especial para regímenes de flujo constante. (Ver 2.2.1 Regímenes de Flujo y acciones a tomar en cuenta)

A medida que la velocidad del flujo aumenta la frecuencia de desprendimiento de vórtices también lo hace y existe la probabilidad que las frecuencias se igualen y entre en resonancia.

Entonces se puede definir un nuevo parámetro que sirve como indicativo si la tubería está propensa a entrar en resonancia con la frecuencia de desprendimiento de

los vórtices, este parámetro es la velocidad reducida y tiene como expresión lo siguiente:

$$V_{Rd} = \frac{U}{f_n \cdot D} \quad (EC - 71)$$

Donde:

V_{Rd} : Velocidad Reducida

U : Velocidad del flujo, puede ser expresada ($V_c + u$)

f_n : Frecuencia natural de la tubería

D : Diámetro de tubería

Puede ser un indicativo ya que para que entre en resonancia la tubería con los vórtices se debe cumplir que:

$$f_v = \frac{St \cdot U}{D} \rightarrow f_n$$

Entonces queda que:

$$V_{Rd} = \frac{1}{St}$$

2.8.4 Frecuencia natural de tubería

En diversas literaturas se pueden conseguir fórmulas para el cálculo de la frecuencia natural de la tubería que depende de las condiciones de borde de la tubería. Las fórmulas especificadas son generalmente con condiciones: empotrado-empotrado, empotrado-articulado y articulado-articulado y resulta que las tuberías son modeladas con resortes que no cumplen con ninguna de las condiciones antes mencionadas, por lo tanto es mejor hallar la frecuencia natural de las tuberías por medio de herramientas electrónicas.

La fórmula propuesta en (Offshore Pipelines, 2005), es la siguiente:

$$f_n = \frac{C_e}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{M_e L^4}} \quad (EC - 72)$$

Donde:

f_n : Frecuencia natural de la tubería del primer modo de vibración

C_e : Constante que depende de la condición de borde

M_e : Masa efectiva

L : Longitud del tramo libre

Tabla 3 Valores de constantes de borde. (Offshore Pipelines, 2005)

Condición	C_e
Articulado-articulado	9.87
Empotrado-articulado	15.5
Empotrado-empotrado	22.2

Para el cálculo de las frecuencias del segundo, tercer y cuarto modo de vibración la (DNV-RP-F105, 2006), señala que son valores múltiplos de la frecuencia del primer modo.

Tabla 4 Factores de multiplicación para frecuencias distintas al primer modo. (DNV-RP-F105)

Modo de vibración	Frecuencia (f_{nn})
2do Modo	$2.7f_{n1}$
3er Modo	$5.4f_{n1}$
4to Modo	$8.1f_{n1}$

2.9 Fatiga y Curvas S-N

La fatiga es un fenómeno mecánico-natural a la que se ven sometidos los materiales, en donde por aplicaciones de cargas cíclicas o continuas el material falla a un esfuerzo menor al que ella sería capaz de soportar por una carga estática

El análisis de fatiga se puede realizar con las curvas S-N para tuberías. En estos análisis se debe tomar en cuenta los esfuerzos residuales de la tubería debido a las soldaduras, a la colocación y procesos de elaboración de la misma.

La finalidad de las curvas S-N es conocer la cantidad de veces (número de ciclos) a la que la tubería puede estar sometida a un rango de esfuerzo dado.

La construcción de estas curvas es realizada en laboratorios donde someten muestras de iguales características a esfuerzos repetidamente hasta que falle. En la ocasión en la que la muestra falla es el número de ciclos a la que esa muestra puede estar sometida bajo el esfuerzo a la que se realizó el ensayo. Este ensayo se repite a un esfuerzo menor y de esta manera se van obteniendo puntos para la construcción de la curva.

La ecuación general de las curvas S-N viene dada de la siguiente manera:

$$\log N = \log \bar{a} - m \log S \quad (EC - 73)$$

Donde:

N : Número de ciclos hasta la rotura

S : Esfuerzo al que está sometido la tubería

$\log \bar{a}$: Valor donde la curva corta al eje del los ciclos.

m : Valor negativo de la pendiente inversa de la curva.

Los valores de m y $\log \bar{a}$ se obtienen del Apéndice 4.

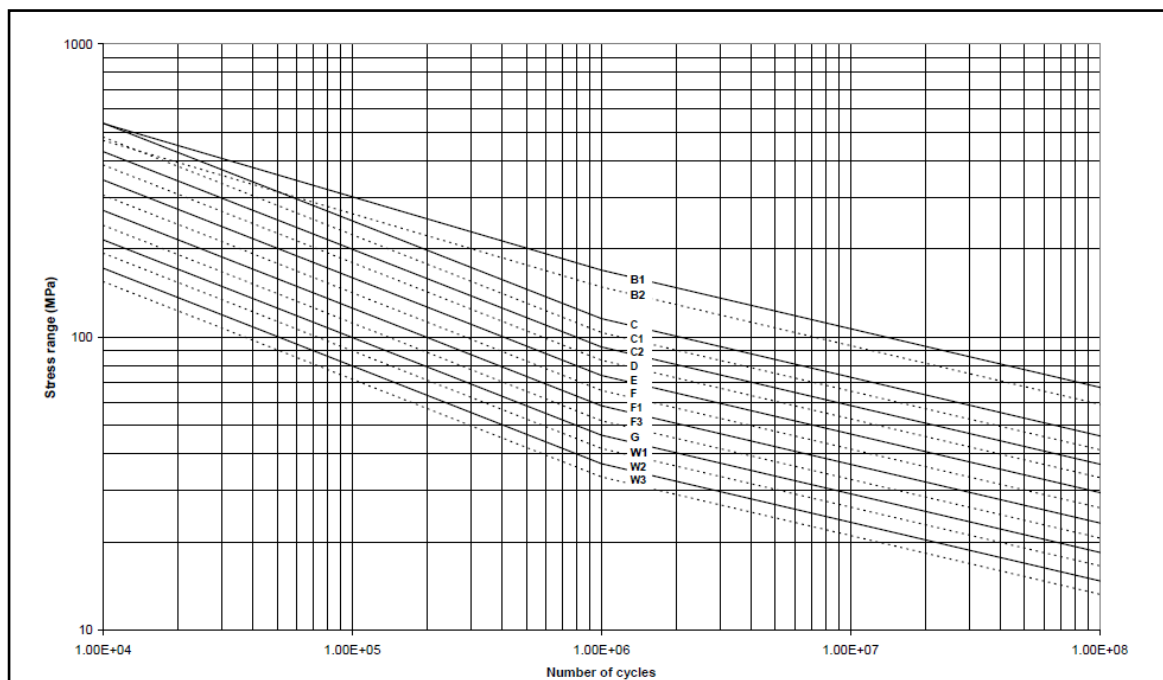


Figura 27 Curva S-N. (DNV-RP-C203, 2010)

La acumulación de daños por fatiga puede ser calculada usando la regla Palmgren Miner:

$$D = \sum_{n=1}^N \frac{n_i}{N_i} \leq \eta \quad (EC - 74)$$

Donde:

n_i : La cantidad de repeticiones a la que está sometida tubería a un esfuerzo.

N_i : Valor máximo a la que puede estar sometida la tubería a un esfuerzo.
Hallado de las curvas S-N.

η : Factor de daño permitido

Tabla 5 Valores de factores de daño permitido. (DNV-OS-F101, 2010)

Clase de protección	η
Baja	1/3
Moderada	1/5
Alta	1/10

2.10 Estado último de agotamiento

El estado último de agotamiento es una manera de verificar si la tubería es capaz de soportar las fuerzas ejercidas por un evento fuera de lo normal. Es necesario contar con registros de mares y de olas para conocer cuáles pueden ser las olas a las que puede estar sometida la tubería.

Se diseña contra una ola máxima asociada a un período de retorno dado (10, 20, 50 años). El período de retorno dependerá de la importancia de la tubería y del tiempo de vida útil estipulado para la tubería.

Para este trabajo se analizará:

- Los esfuerzos normales debido a la fuerza hidrodinámica (Ver 2.7 Ecuación de Morison) ejercida en la tubería. ($\alpha < 0.8$)
- Esfuerzos normales generados por las fuerzas de arrastre y de sustentación causadas por los vórtices en condiciones de flujo permanente. ($\alpha > 0.8$).

Los esfuerzos debido a la fuerza hidrodinámica serán calculados por medio de la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{M \cdot \bar{y}}{I} \quad (EC - 75)$$

Donde:

M : Es el momento máximo generado por la fuerza hidrodinámica.

$\bar{y}$: Distancia de la fibra más alejada al centroide de la figura. En este caso $\bar{y} = \frac{D}{2}$.

I : Inercia de la sección.

Los esfuerzos debido a los vórtices serán calculados usando la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{\sqrt{M_y^2 + M_z^2} \cdot r}{I} \quad (EC - 76)$$

Donde:

M_z : Momento generado por la fuerza de arrastre.

M_y : Momento generado por la fuerza de sustentación.

r : Radio de la sección.

I : Inercia de la sección.

Vale la pena mencionar que la norma (DNV-RP-F105, 2006) recomienda calcular los rangos de esfuerzos debido a vibraciones inducidas por vórtices usando las siguientes fórmulas:

$$S_{IL} = 2A_{IL} \cdot (A_y/D) \cdot \psi_{\alpha,IL} \cdot \gamma_s \quad (EC - 77)$$

Donde:

S_{IL} : Rango de esfuerzo en línea debido a vibraciones inducidas por vórtices.

A_{IL} : Esfuerzo debido a la deformación de la tubería igual a su diámetro en el primer modo en la dirección del flujo.

(A_y/D) : Relación de la máxima amplitud en línea debido a vibraciones inducidas por vórtices.

γ_s : Factor de seguridad y es igual a 1.3.

El valor (A_y/D) puede ser hallado por la siguiente figura:

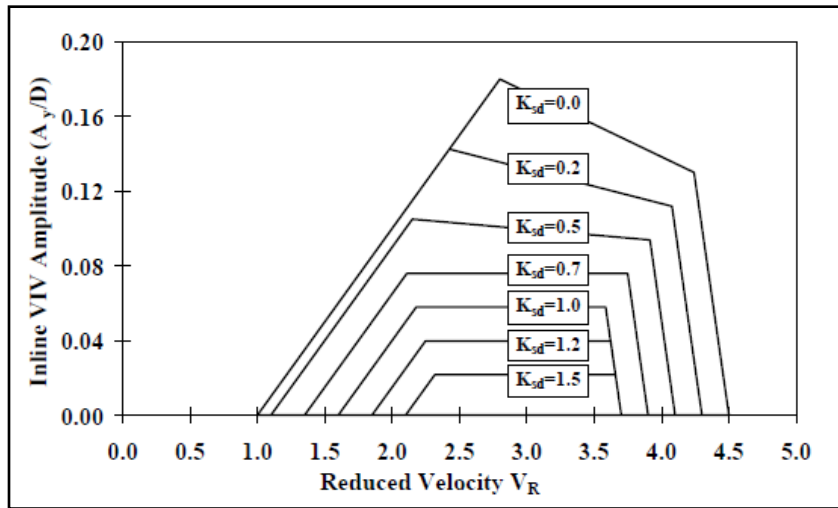


Figura 28 Valores de Amplitud en línea en función de la Velocidad reducida y Parámetro de Estabilidad reducido. (DNV-RP-F105)

$\psi_{\alpha,IL}$ es dependiente de alfa y puede ser calculado de la siguiente fórmula:

$$\psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < 0.5 \\ \frac{(\alpha - 0.5)}{0.3} & \text{para } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ 1 & \text{para } \alpha > 0.8 \end{cases} \quad (EC - 78)$$

Y la segunda ecuación es tomando en cuenta las vibraciones perpendiculares a la dirección del flujo.

$$S_{CF} = 2A_{CF} \cdot (A_Z/D) \cdot R_k \cdot \gamma_s \quad (EC - 79)$$

Donde:

S_{CF} : Rango de esfuerzo para flujo cruzado debido a vibraciones inducidas por vórtices (VIV).

A_{CF} : Esfuerzo debido a la deformación de la tubería igual a su diámetro en el primer modo en la dirección del flujo cruzado.

(A_Z/D) : Relación de la máxima amplitud en flujo cruzado debido a vibraciones inducidas por vórtices.

R_k : Factor de reducción de la amplitud debido al amortiguamiento.

γ_s : Factor de seguridad y es igual a 1.3.

El valor (A_Z/D) es calculado de la Figura 20.

El factor de reducción de la amplitud debido al amortiguamiento es dado por:

$$R_k = \begin{cases} 1 - 0.15K_{sd} & \text{para } K_{sd} \leq 4 \\ 3.2 K_{sd}^{-1.5} & \text{para } K_{sd} > 4 \end{cases} \quad (EC - 80)$$

Donde:

K_{sd} : es el factor de estabilidad reducido.

$$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma_k} \quad (EC - 81)$$

El valor de γ_k es un factor de seguridad relacionado con el amortiguamiento, sus valores son obtenidos de la

Tabla 6 Factores de seguridad

Factor de Seguridad	Clase de seguridad		
	Baja	Normal	Alta
γ_k	1.00	1.15	1.30
γ_s	1.30	1.30	1.30

El parámetro de estabilidad viene definido por la siguiente ecuación:

$$K_s = \frac{4\pi M_e \zeta_T}{\rho D^2} \quad (EC - 82)$$

Donde:

M_e : Masa efectiva

ζ_T : Relación total de amortiguamiento modal.

ρ : Densidad del agua

La relación de amortiguamiento total modal (ζ_T) comprende:

- El amortiguamiento estructural $\zeta_{str} = 0.005$
- El amortiguamiento del suelo, que puede ser tomado como $\zeta_{soil} = 0.01$
- El amortiguamiento hidrodinámico. Para VIV sin entrar en resonancia puede ser tomado como cero $\zeta_h = 0.00$

2.11 Interacción Suelo-Tubería

El modelo de suelo- tubería consiste en la interacción de la rigidez de los fondos marinos y la definición de fricción equivalente para representar la resistencia del suelo al movimiento de la tubería. El modelo permite de una forma más precisa la estimación del comportamiento estático y la respuesta dinámica del tramo libre al simular el efecto del suelo mediante un número finito de resortes elásticos con características propias de cada suelo.

Los suelos cohesivos (arcillas) y los no cohesivos (arenas), son los tipos de suelos típicos que se pueden encontrar en el lecho marino. Para la evaluación de la interacción suelo-tubería es fundamental conocer los siguientes parámetros:

- Tipo de Suelo.
- Ensayos in situ
- Condiciones de esfuerzo In situ.
- Parámetros de los Esfuerzos Cortantes para condiciones drenadas y no drenadas incluyendo el remodelado de las fuerzas cortantes para las arcillas.
- Coeficientes de amortiguamiento y modulo del suelo como función del ciclo del esfuerzo cortante.
- Datos generales del suelo como peso sumergido, relación de vacíos, contenido del agua y límites de plasticidad.

Adicionalmente si se desea considerar la rigidez del suelo, entonces los siguientes parámetros también son necesarios para la evaluación de la interacción suelo-tubería:

- Peso sumergido del suelo, γ_{soil}'

- Relación de Poisson, ν
- Relación de Vacíos, e_s
- Angulo de fricción, suelos no cohesivos, ϕ_s
- Esfuerzo cortante sin drenar, suelos cohesivos, S_U
- Relación de Sobreconsolidación, OCR
- Índice de plasticidad, suelos cohesivos, I_p

Todos estos parámetros se obtienen mediante estudios geotécnicos en muestras no perturbadas y que son representativas de un lugar en particular de la ruta de la tubería.

En las siguientes tablas se muestran valores típicos de los parámetros para diversos tipos de suelo. Estos valores pueden ser usados en caso de no disponer de información detallada en las primeras etapas del diseño:

Tabla 7 Parámetros típicos geotécnicos de las arenas. (DNV-RP-F105)

Tipo de suelo	Φ_s	γ_{soil}' (kN/m ³)	ν	e_s
Suelta	28-30	8.5-11.0	0.35	0.7-0.9
Media	30-36 ^º	9.0-12.5	0.35	0.5-0.8
Densa	36-41 ^º	10.0-13.5	0.35	0.4-0.6

Tabla 8 Parámetro típicos geotécnicos de las arcillas. (DNV-RP-F105)

Tipo de suelo	S_u (kN/m ²)	γ_{soil}' (kN/m ³)	ν	e_s
Muy suave	<12.5	4-7	0.45	1.0-3.0
Suave	12.5-25	5-8	0.45	0.8-2.5
Firme	25-50	6-11	0.45	0.5-2.0
Rígido	50-100	7-12	0.45	0.4-1.7
Muy rígido	100-200	10-13	0.45	0.3-0.9
Duro	>200	10-13	0.45	0.3-0.9

En general un suelo con poca resistencia es beneficioso porque conlleva a una mayor penetración de la tubería dentro del suelo, reduce la longitud de los tramos libres y aumenta la resistencia lateral.

2.12 Resistencia del suelo

En general la resistencia del suelo consta de dos partes: una parte exclusivamente dependiente de la fricción de Coulomb, y una parte de resistencias pasivas debido al efecto de penetración de la tubería en el subsuelo.

Los suelos arenosos serán definidos como suelos permeables con efectos cohesivos despreciables. Los parámetros más importantes para describir la interacción de un suelo arenoso con la tubería son los coeficientes de fricción y peso de la arena sumergida.

Los suelos arcillosos serán definidos como suelos impermeables con efectos cohesivos significativos.

El coeficiente de fricción para una tubería con recubrimiento de concreto puede ser tomado, para la arena y arcilla, como 0.6 y 0.2 respectivamente.

2.13 Modelaje de interacción tubería suelo

2.13.1 Modelo 1

Las expresiones que se muestran a continuación se aplican, cuando las condiciones topográficas son complejas, el suelo está estratificado y es heterogéneo, si se cumplen estos escenarios se hará un análisis más detallado para el cálculo de la rigidez vertical y lateral del suelo.

2.13.1.1 Penetración y el suelo rígido

La penetración de una tubería por carga estática en el suelo se puede calcular en función de la presión de contacto vertical, los parámetros del suelo (resistencia al corte sin drenar o constante de la arcilla y el ángulo de fricción interna, en las arenas) y la densidad del suelo sumergido.

Esta penetración es hasta cierto punto complicada de estimar, por la forma circular de la tubería, lo que conduce a un efecto combinado de la fricción y la resistencia a la penetración de la capacidad portante del suelo.

2.13.1.2 Cálculo de la reacción vertical estática por unidad de longitud:

- Para arenas:

$$R_V = \gamma_{soil}' B (N_q V_{eff} + 0.5 N_\gamma B) \quad (EC - 83)$$

Donde:

V_{eff} : Penetración efectiva. Será el mayor valor de $(V - \frac{D}{4})$ y 0, que representa el efecto de empotramiento de la tubería de manera simplificada.

N_q, N_γ : Factores de Capacidad del suelo

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi_s} \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi_s}{2} \right) \quad (EC - 84)$$

$$N_\gamma = 1.5 (N_q - 1) \tan \varphi_s \quad (EC - 85)$$

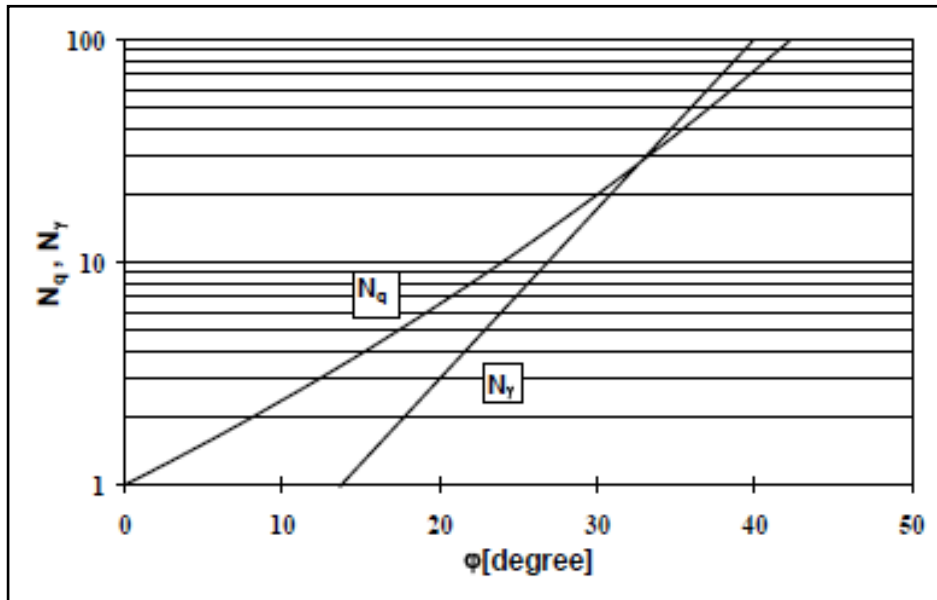


Figura 29 Factor de capacidad N_q y N_γ vs ángulo de fricción (DNV-RP-F105)

- Para Arcillas:

- S_U constante con la profundidad:

$$R_V = N_C S_U B + A_p \gamma_{soil}' \quad (EC - 86)$$

- **S_U variación lineal con la profundidad:**

$$R_V = BF(N_c S_{U0} + 0.25kB) + A_p \gamma_{soil}' \quad (EC - 87)$$

Donde:

B : Ancho de contacto de transferencia de carga de tubería del suelo:

$$\begin{aligned} & 2\sqrt{(D - V)V} \quad \text{para } v \leq 0.5D \\ & D \quad \text{para } v > 0.5D \end{aligned} \quad (EC - 88)$$

D : Diámetro exterior del tubo (incluyendo cualquier revestimiento)

γ_{soil}' : Unidad de peso sumergido del suelo

S_U : Resistencia al corte sin drenaje

S_{U0} : La fuerza cortante sin drenaje en los fondos marinos

N_c : 5.14 Factor de Capacidad del suelo

k : Profundidad gradiente de resistencia al corte sin drenaje

A_p : Área de sección transversal de la parte penetrado de la tubería

F : Factor de corrección que toma en cuenta el aumento de la resistencia al corte con la profundidad en función de la rugosidad de la tubería, se pueden interpolar entre los valores en la Figura 30 para superficies rugosas y lisas.

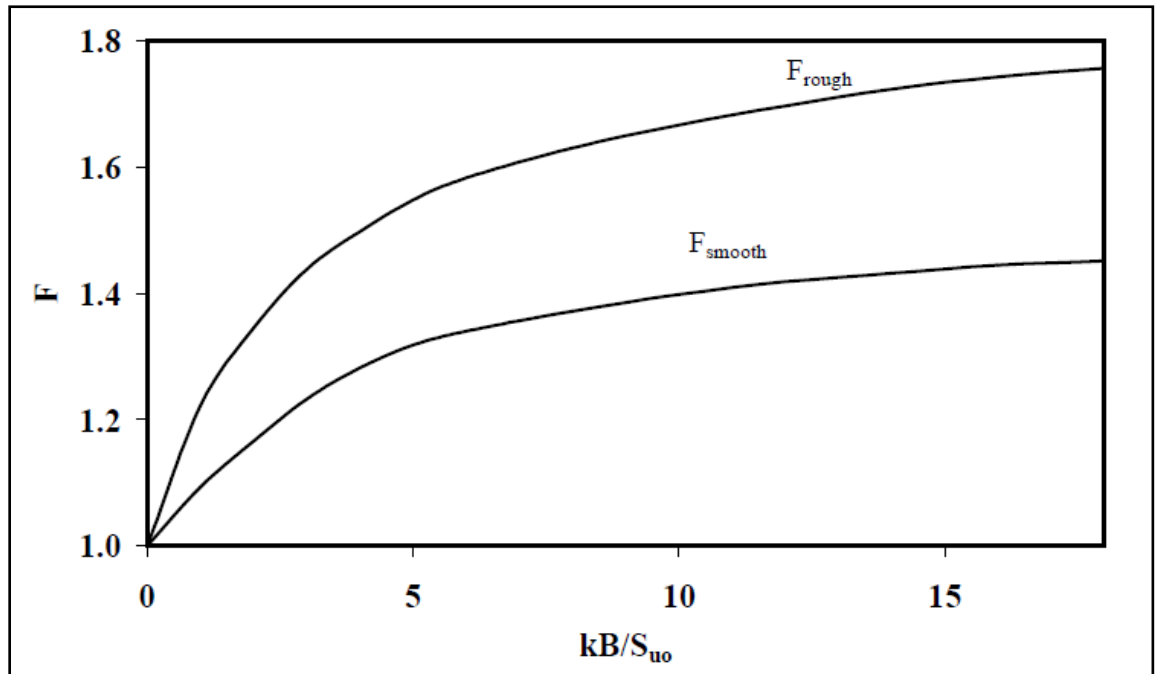


Figura 30 Factor de Corrección F para tuberías lisas y rugosas (DNV-RP-F105)

Para suelos arcillosos el ángulo de fricción es igual a 0 °.

2.13.1.3 Cálculo de la rigidez vertical estática

La rigidez vertical estática $K_{V,S}$ es una representación de la rigidez secante para las condiciones tales como la penetración durante la instalación y la erosión y durante el desarrollo de tramos libres.

La rigidez vertical estática $K_{V,S}$ es definido como:

$$K_{V,S} = \frac{R_V}{V} \quad (EC - 89)$$

Donde:

R_V : Reacción estática vertical del suelo por unidad de longitud de la tubería.

V : Penetración vertical de la tubería.

2.13.1.4 Cálculo de la rigidez vertical dinámica:

La rigidez dinámica vertical K_V se define como:

$$K_V = \frac{\Delta F_V}{\Delta \delta_V} \quad (EC - 90)$$

Donde:

ΔF_V : Fuerza dinámica vertical entre la tubería y el suelo por unidad de longitud de tubería

$\Delta \delta_V$: Desplazamiento vertical de la tubería, medida en relación con la posición estática de la tubería.

2.13.1.5 Cálculo de la rigidez lateral dinámica

La rigidez dinámica lateral K_L se define como:

$$K_L = \frac{\Delta F_L}{\Delta \delta_L} \quad (EC - 91)$$

Donde:

ΔF_L : Fuerza dinámica horizontal entre el tubo y el suelo por unidad de longitud de la tubería

$\Delta \delta_L$: Desplazamiento asociado horizontal de la tubería.

2.13.1.6 Cálculo de la rigidez vertical y lateral dinámica K_V y K_L en función del modulo de corte

Para la determinación de K_V , se puede aplicar:

$$K_V = \frac{0.88 \cdot G}{1 - \nu} \quad (EC - 92)$$

Para la determinación de K_L , la siguiente expresión se puede aplicar:

$$K_L = 0.76G(1 + \nu) \quad (EC - 93)$$

G : Módulo de corte G , se define como un módulo secante, es una función decreciente de la amplitud de deformación de corte en el suelo. El módulo de corte G_{max} se puede calcular de la siguiente expresión:

$$G_{max} = 625 \frac{.OCR^{k_s}}{0.3 + 0.7e_s^2} \cdot \sqrt{\sigma_a \cdot \sigma_s} \quad (EC - 94)$$

Donde:

σ_a : Presión atmosférica (100 kPa)

σ_s : Signifique la tensión eficaz en el suelo

OCR : Relación sobreconsolidación para suelos arcillosos, que se fija igual a 1.0 para las arenas

e_s : Relación de vacíos

k_s : Coeficiente, tomado Figura 31 k_s vs Índice de Plasticidad I_p (%) (DNV-RP-F105)

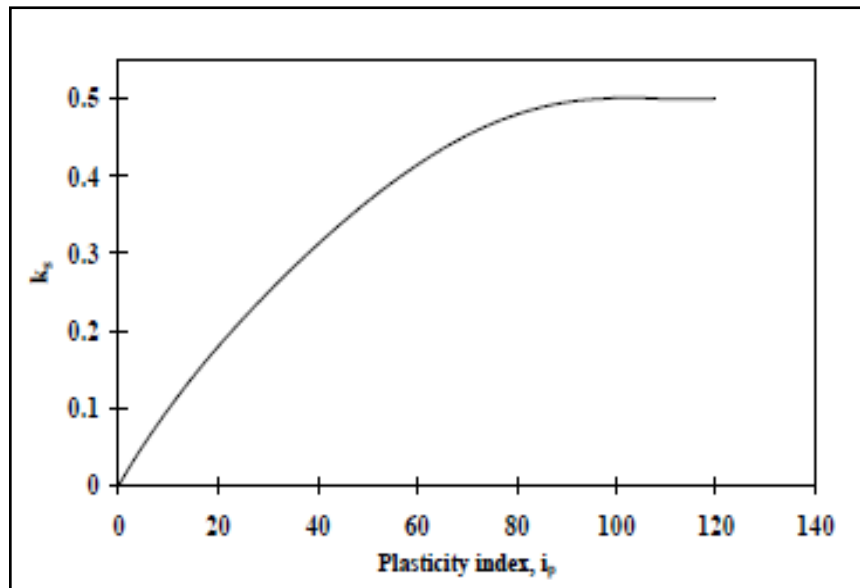


Figura 31 k_s vs Índice de Plasticidad I_p (%) (DNV-RP-F105)

Para las arcillas, el Módulo G_{max} puede ser calculado a partir de la resistencia al corte sin drenar (S_U) y del Índice de Plasticidad (I_p) de la siguiente manera, como una aproximación a los datos de pruebas de laboratorio:

$$\frac{G_{max}}{S_U} = \frac{300}{I_p} \quad (EC - 95)$$

2.13.1.6 Cálculo del esfuerzo efectivo del suelo

El esfuerzo efectivo, σ_s , del suelo en los apoyos de los tramos libres puede ser calculada a partir de las condiciones de esfuerzo, a una profundidad representativa debajo de la tubería, dicha profundidad podrá suponerse igual al ancho de contacto B . La siguiente fórmula se puede aplicar:

$$\sigma_s = \frac{1}{2}(1 + k_o)B \gamma_{soil}' + \frac{q}{3B} \left(1 + \frac{L}{2L_{sh}}\right) \quad (EC - 96)$$

Se debe tener en cuenta que las arcillas, no puede ser consolidadas por el peso de la tubería durante la etapa de instalación. Para los cálculos de una tubería en suelo muy blando en esta etapa, la fórmula para σ_s se reduce a:

$$\sigma_s = \frac{1}{2}(1 + k_o)B \gamma_{soil}' \quad (EC - 97)$$

Donde:

k_o : Coeficiente de empuje en reposo. Por lo general, $k_o = 0.5$, sin embargo, los valores de k_o en exceso de 1.0 pueden existir en arcillas con relaciones de sobreconsolidación muy grandes

γ_{soil}' : Unidad de peso del suelo sumergido (kN/m^3)

q : Peso sumergido de la tubería por unidad de longitud del tubo (kN/m)

L_{sh} : Longitud de apoyo del tramo (para la transferencia de la mitad del peso de la luz libre)

L : Longitud del tramo

La Longitud de apoyo del tramo L_{sh} , es la longitud de contacto entre el tubo y el suelo en los extremos de un tramo libre, depende de la longitud del tramo, la rigidez en los apoyos, el tipo de suelo, la geometría de los apoyos, el peso sumergido y la rigidez de la tubería.

2.13.2 Modelo 2

El siguiente modelo se aplica para cuando no hay un análisis detallado para el cálculo de las rigideces, cuando las condiciones topográficas no son complejas, el suelo es homogéneo y no está estratificado. El valor de rigidez estática puede tomarse de acuerdo a la Tabla 9 para las arenas y la tabla Tabla 10 para las arcillas y la determinación de los valores de estas rigideces (K_V y K_L) en las unidades de $kN/m/m$ se puede calcular en forma simplificada como:

2.13.2.1 Cálculo de la rigidez vertical dinámica:

$$K_V = \frac{C_V}{1 - \nu} \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D} \quad (EC - 98)$$

2.13.2.2 Cálculo de la rigidez lateral dinámica:

$$K_L = C_L(1 - \nu) \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D} \quad (EC - 99)$$

Donde:

D : Diámetro de la tubería

C_V y C_L : Factores de Rigidez dinámico vertical y lateral. Ver Tabla 9 y Tabla 10

ν : Módulo de Poisson del suelo

$\frac{\rho_s}{\rho}$: Relación de masa entre la tubería y el agua desplazada.

Tabla 9 Factores de rigidez dinámica y rigidez vertical estática para interacción suelo-tubería en arenas. (DNV-RP-F105)

Tipo de arenas	C_V ($kN/m^{5/2}$)	C_L ($kN/m^{5/2}$)	$K_{V,S}$ ($kN/m/m$)
Suelta	10500	9000	250
media	14500	12500	530
densa	21000	18000	1350

Tabla 10 Factores de rigidez dinámica y rigidez vertical estática para interacción suelo tubería en arcillas con OCR=1. (DNV-RP-F105)

Tipos de Arcillas	C_v (kN/m ^{5/2})	C_L (kN/m ^{5/2})	$K_{v,s}$ (kN/m/m)
Muy Suave	600	500	50-100
suave	1400	1200	160-260
firme	3000	2600	500-800
rigido	4500	3900	1000-1600
Muy rigido	11000	9500	2000-3000
Dura	12000	10500	2600-4200

Es necesario evaluar si las condiciones del suelo son drenadas o no drenadas. Para las condiciones sin drenaje, la relación de Poisson es $\nu = 0.5$ mientras que para las condiciones de drenaje la relación de Poisson es $\nu < 0.5$. Las expresiones son válidas para $1.2 < \rho_s/\rho < 2.0$.

Para tramos apoyados en arena, la K_L debe calcularse bajo el supuesto de propiedades de la arena suelta, para dar cuenta adecuadamente de los efectos de la movilidad compleja del suelo, como la erosión y autopenetración.

2.14 Modelo bilineal de fuerza-desplazamiento

Este modelo debe aplicarse en situaciones donde las cargas de arrastre lateral de las olas son bastante grandes produciendo no sólo que el tubo oscile sino también que se deslice sobre los apoyos de tramo libre, esto involucra grandes desplazamientos laterales. El modelo puede representar la relación no lineal desplazamiento-fuerza entre el tubo y el suelo apropiadamente.

Este modelo cubre la transición de desplazamientos leves hasta desplazamiento extremos.

El modelo bilineal, que puede ser aplicado para apoyo de arenas y arcillas, es el siguiente:

$$F_L \begin{cases} K_1 & \text{y para } F_L < \mu_L F_V \\ \mu_L F_V + K_2 \left(y - \frac{\mu_L F_V}{K_1} \right) & \text{para } \mu_L F_V \leq F_L < F_{L_{max}} \end{cases} \quad (EC - 100)$$

Donde:

y : Desplazamiento lateral de la tubería en el apoyo

F_L : Fuerza lateral por unidad de longitud de la tubería

F_{Lmax} : Fuerza lateral máxima por unidad de longitud de tubería

F_V : Fuerza vertical de contacto por unidad de longitud de la tubería en el apoyo

μ_L : Coeficiente de fricción lateral $\begin{cases} \text{Para arenas } \mu_L = 0.6 \\ \text{Para arcillas } \mu_L = 0.2 \end{cases}$

K_1 : Rigidez equivalente secante hasta la movilización completa de la fricción

K_2 : Rigidez equivalentes para la movilización de deformaciones pasado el punto fricción completa

Para los apoyos en arena, la rigidez inicial K_1 se puede tomar como igual a la K_L rigidez lateral dinámica para arena suelta. Para el caso de suelos líquidos, la rigidez inicial K_1 se puede tomar igual a la K_L rigidez lateral dinámica para el tipo de arcilla que se trate.

La rigidez equivalente K_2 depende de la penetración vertical v de la tubería en el apoyo. Para los apoyos de tramos libres en la arena, los valores de K_2 se dan en la siguiente tabla.

Tabla 11 Rigidez equivalente k_2 (DNV-RF-105, 2006)

v/D	k_2 (kN/m/m)
0.00	0
0.25	19
0.35	28
0.50	44
1.00	105

Para apoyos de tramos libres en arcillas, la rigidez equivalente K_2 se puede calcular como:

$$K_2 = 8.26 \cdot S_u \cdot \left(\frac{S_u}{D \cdot \gamma_{soil}} \right)^{-0.4} \cdot \left(\frac{v}{D} \right)^{1.3} \quad (EC - 101)$$

Donde:

γ_{soil}' : Unidad de peso sumergido del suelo

γ_{agua} : Unidad de peso del agua (10 kN/m³)

γ_{soil} : Unidad de peso total del suelo ($\gamma_{soil} = \gamma_{soil}' + \gamma_{agua}$)

V : La penetración de la tubería vertical en el tramo libre

Esta rigidez se corresponde con un supuesto de movilización F_{Lmax} en un desplazamiento lateral adicional de $D/2$ más allá de la movilización por parte de la resistencia de fricción.

Para los apoyos de tramos libres en las arenas, la resistencia lateral máxima por unidad de longitud de la tubería es:

$$F_{Lmax} = \mu_L F_V + 5.0 \gamma_{soil}' D^2 \left(\frac{v}{D} \right)^{1.25} \quad (EC - 102)$$

Para los apoyos de tramos libres en las arcillas, la resistencia lateral máxima por unidad de longitud de la tubería es:

$$F_{Lmax} = \mu_L F_V + 4.13 D S_u \left(\frac{S_u}{D \cdot \gamma_{soil}'} \right)^{-0.4} \cdot \left(\frac{v}{D} \right)^{1.3} \quad (EC - 103)$$

Capítulo 3 Desarrollo

En el presente capítulo se muestra un ejemplo de cálculo y la verificación de una tubería por fatiga en tres tramos libres de igual longitud, cada uno de ellos con condiciones de flujo y localizado a profundidades distintas. Los casos corresponden a:

- $\alpha < 0.5$
- $0.5 < \alpha < 0.8$
- $\alpha > 0.8$

Tabla 12 Característica de los tramo libre para cada caso

Característica	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Profundidad (m)	30	15	5
Oleaje	Oleaje 1	Oleaje 2	Oleaje 3
Régimen de flujo (α)	0.90	0.59	0.30
Longitud del tramo libre (m)	16	16	16
Brecha (e) (m)	0.20	0.20	0.20
Suelo	Arena Gruesa suelta	Arena Gruesa suelta	Arena Gruesa suelta
Relieve	Plano	Plano	Plano

Las relaciones de velocidad de flujo mostradas en la tabla son para altura de olas significativas de cada oleaje. Los datos de Oleaje de la zona se encuentran en el Apéndice 1.

Para determinar las propiedades dinámicas y el comportamiento de la tubería bajo la acción de las cargas hidrodinámicas generadas por oleaje y corriente se realizará un modelo de una tubería en tramo libre con el programa SAP.

Antes de cargar el modelo es necesario conocer ciertos parámetros de suelo, tipo de tubería, y las fuerzas hidrodinámicas a las que estará sometida.

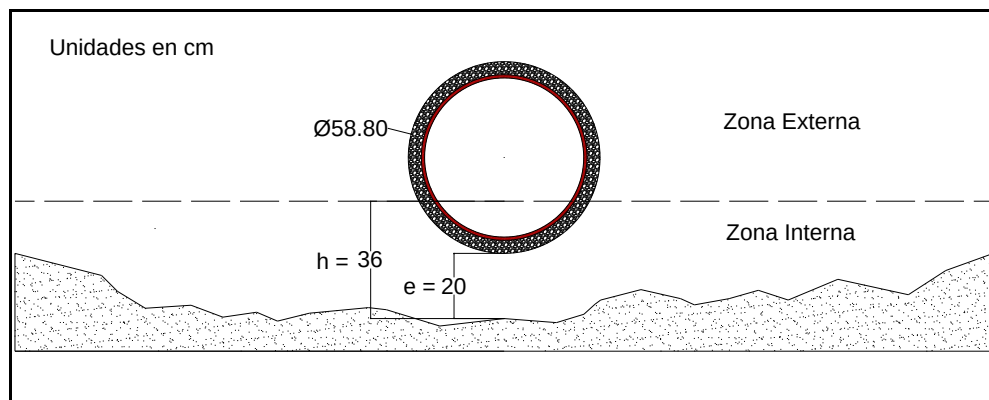


Figura 32 Sección Transversal del Tramo libre. (Fuente el autor)

3.1 Características y propiedades de la tubería

Tabla 13 Propiedades de la tubería

Parámetros	Símbolo	Magnitud	Unidad
Diámetro externo	D_a	0.508	[m]
Espesor de tubo	t_a	0.010	[m]
Densidad acero	ρ_a	7850	[kg/m ³]
Módulo de Young de acero	E_a	$0.21 \cdot 10^6$	[MPa]
Esfuerzo de Cedencia	f_y	448	[MPa]
Soldadura	A tope por ambos lados		
Recubrimiento concreto	t_c	0.040	[m]
Densidad concreto	ρ_c	3300	[kg/m ³]
Módulo de Young de concreto	E_c	$29.1 \cdot 10^3$	[MPa]

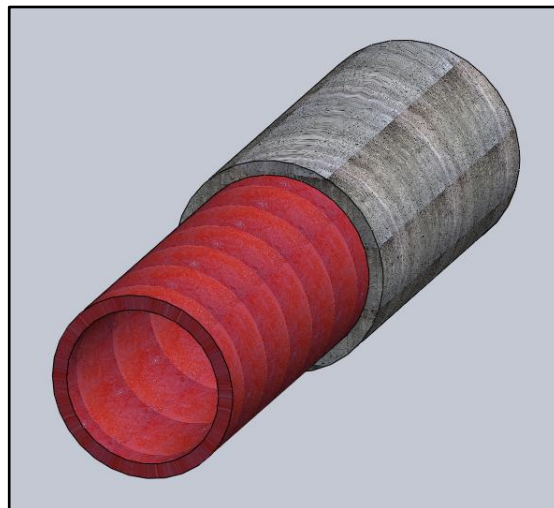


Figura 33 Tubería con recubrimiento. (Fuente el autor)

Tabla 14 Material a transportar

Material transportado	Densidad [kg/m ³]
Gas oil	870

Tabla 15 Masa de la tubería

Parámetro	Densidad [kg/m^3]	Masa por unidad de longitud [kg/m]
Acero	7850	461.66
Concreto	3300	227.25
Gas Oil	870	162.72
Masa añadida	1027	278.88
Total		1092.96

En el CD anexo se encuentra una hoja en cálculo que permite conocer la masa por unidad de longitud de cualquier tubería con cualquier recubrimiento y fluido que transporte. Ver Apéndice 11.

3.2 Condiciones ambientales de diseño

3.2.1 Oleaje

En el Apéndice 1 se muestran los records de olas del mar en el que se encontrará la tubería, las mediciones fueron hechas para 30 años de vida útil. Las velocidades a nivel de la tubería debidas al oleaje serán calculadas aplicando la Teoría de Airy ver sección 2.3.2 Teoría de ola de poca amplitud (Airy).

Además en el Apéndice 7, se muestra una tabla de cálculo. La hoja de cálculo está dentro del CD anexo, ver Apéndice 11

3.2.2 Corriente

La corriente medida en la superficie es de 1.5 nudos. Esta corriente debe ser calculada para el nivel de la tubería que se encuentra 20 cm por encima del fondo. Para esto se debe conocer la altura en la que el flujo comienza a ser estable. (División de zona externa y zona interna)

Sabiendo que el fondo marino es plano y que es una arena densa se puede calcular a partir de qué punto el flujo comienza a ser estable. Usando la ecuación (EC – 41), se halla que:

$$h = 0.36 \text{ m}$$

Como $h > e$ (ver Figura 32) la tubería se encuentra dentro de la zona interna, por estar tan cerca del fondo marino la velocidad de la corriente no se puede tomar como uniforme y se debe hallar la velocidad a nivel de la tubería. Usando la (EC – 44), se halla que:

$$U(z) = 0.72 \text{ m/seg}$$

3.3 Modelaje del suelo

El suelo por ser un material elástico puede ser modelado con resortes, para esto es necesario conocer la rigidez del resorte equivalente a la del suelo. Sabiendo el tipo de suelo y siguiendo el flujograma para cálculos de rigideces de suelo (ver: Apéndice 6), se halla los siguientes valores para resortes espaciados cada dos metros:

Tabla 16 Valores de rigideces de resortes

Rigidez dinámica	Valor $KN/m/m$
Rigidez vertical (K_V)	17423
Rigidez horizontal (K_L)	11200

3.4 Sección equivalente

Debido a que la tubería está recubierta con concreto es necesario hallar un módulo de Young equivalente. La razón por lo que se realiza esto es porque en el programa se colocará una tubería de sólo acero con el espesor de ambos materiales, esto hace que el comportamiento mecánico de la tubería no sea solo el de acero o concreto.

Tabla 17 Valores de Inercias de tubería y recubrimiento

Inercia	Valor
Acero	$4.852 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$
Concreto	$2.599 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$

$$E_{equi} = \frac{I_a \cdot E_a + I_c \cdot E_c}{I_a}$$

$$E_{equi} = 366000 \text{ MPa}$$

La inercia de la sección es:

$$I = 3.084 \cdot 10^{-3} m^4$$

La inercia es calculada por el programa.

3.5 Modelaje de tubería en SAP

Una vez determinadas las rigideces de los resortes que simulan el suelo, la masa por unidad de longitud de la tubería y Módulo de Young equivalente, se puede realizar el modelo de la tubería con el programa.

Los siguientes pasos son necesarios para el modelaje de las tuberías:

1. Elegir las unidad con las que se trabajará (N, m, C)
2. Elegir un tramo de longitud considerable, mucho mayor al tramo libre, (entre 60 y 80 m). La longitud debe ser lo suficientemente larga para que no se generen desplazamientos en los resortes en los extremos.
3. Definir un miembro tubular, con diámetro externo igual a la suma del diámetro de la tubería, el espesor de la tubería de acero y el espesor del recubrimiento de concreto.

$$\emptyset_d = D_a + t_c = 0.588 m$$

$$t_d = t_a + t_c = 0.05 m$$

4. Eliminar el peso y la masa propia de la tubería que el programa asigna automáticamente y cambiar el Módulo de Young por el equivalente calculado.
5. Dividir la tubería en tramos iguales. Mientras más pequeños mejores serán los resultados
6. Ubicar el tramo libre con la longitud en estudio en el centro del modelo
7. Asignar resortes con sus respectivas rigideces en los nodos que no serán parte del tramo libre.
8. Asignar las masas en los nodos de la tubería en la dirección horizontal o vertical.
9. Ir a la pestaña "Define → Load Cases → Seleccionar "Modal" → click en Modify/Show Load Case". Se abrirá una nueva ventana.
10. En el área de "Number of Modes" cambiar el máximo número de modos a 4.
11. Dar click en "Ok" hasta llegar a la pantalla del model
12. Correr el programa.

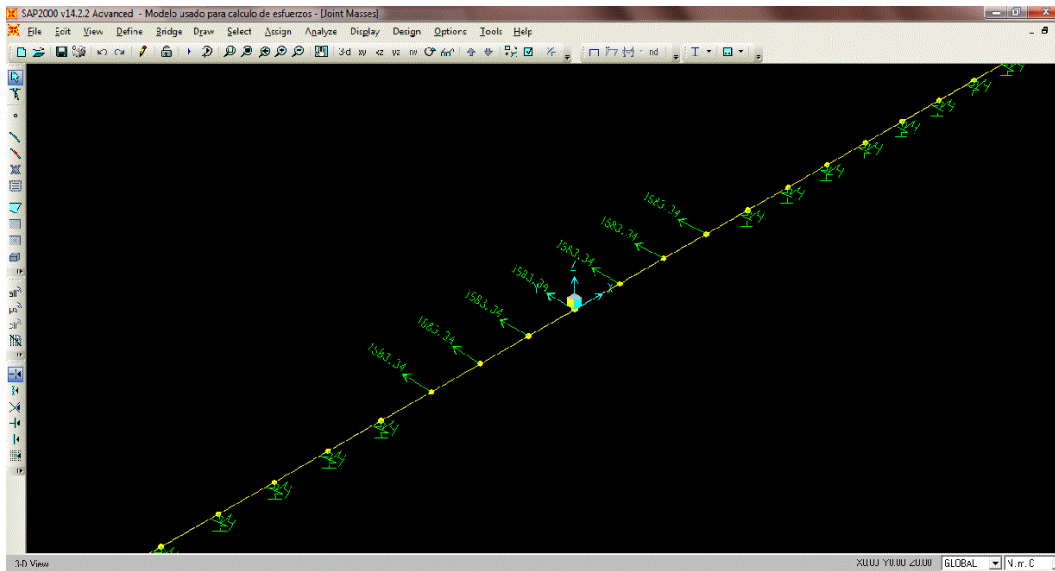


Figura 34 Montaje del modelo en SAP

Luego de haber realizado los pasos anteriores se debe realizar una corrida modal de la tubería para conocer las frecuencias naturales de vibración de la tubería.

3.5.1 Frecuencia Natural de la Tubería

Tabla 18 Frecuencia natural de la tubería en dos direcciones

Frecuencia Natural	Modo de vibración	Porcentaje de participación	Valor (Hz)
Vertical (C_f)	1	97	5.964
Horizontal (I_f)	1	98	5.404

Para este caso la separación de los nodos era cada 2 metros, por lo tanto la masa que se les asignó fue:

$$Masa = 2185.92 \text{ kg}$$

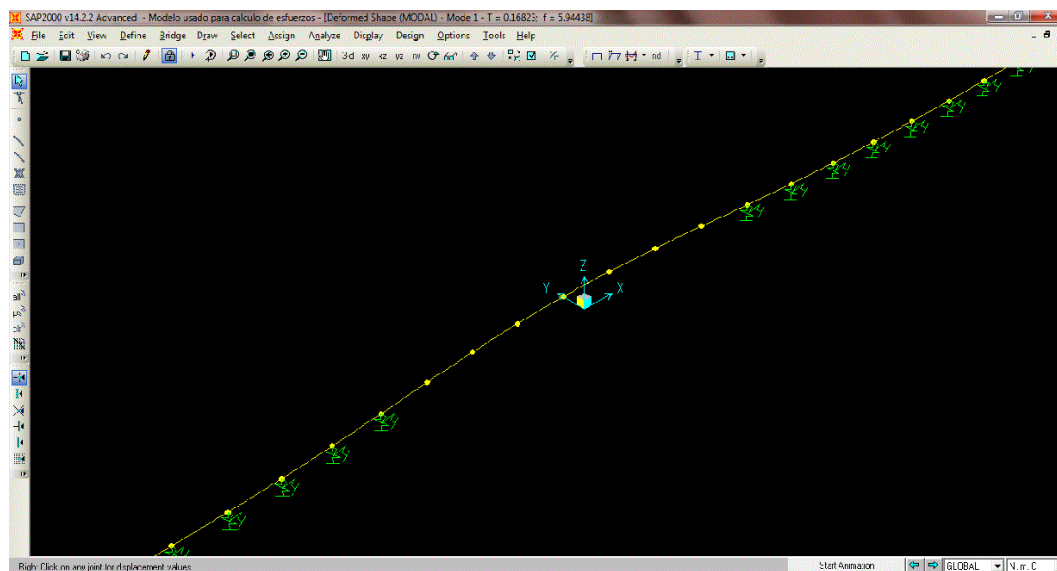


Figura 35 Modo 1 de vibración horizontal

3.6 Estado límite de Fatiga (FLS)

La verificación por FLS de la tubería se debe realizar con las fuerzas hidrodinámicas asociadas al oleaje y al número de veces que se repite la ola (número de ciclos). Las fuerzas de oleaje requieren el cálculo de los coeficientes mencionados en la página 34. Para este trabajo a fin de simplificar procedimientos, estos coeficientes se tomaran constantes para todas las olas e iguales a los calculados para las olas significativas de cada caso.

Para hallar la ola significativa se requiere procesar los datos utilizando la distribución de Rayleigh (ver 2.4 Análisis estadísticos de las olas) y luego generar el espectro para calcular el período de la ola significativa. Las distribución de Rayleigh y espectros están en los apéndice 8-9-10

A continuación se muestran los valores de olas significativas para cada caso:

Tabla 19 Valores de Ola significativa y Períodos

Olas	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Altura significativa (H_s) (m)	3.09	3.07	3.34
Período (T_z) (seg)	5.68	5.66	4.88

Los valores de Número de Reynolds, Número de Keulegan Carpenter, Número de Strouhal y la relación de corriente asociados a estos estados de mar y altura significativa (H_s) son:

Tabla 20 Parámetros adimensionales para cada caso

Números	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Reynolds (Re)	$3.21 \cdot 10^5$	$4.75 \cdot 10^5$	$9.21 \cdot 10^5$
Keulegan Carpenter (KC)	7.70	11.61	19.83
Número de Strouhal (St)	0.22	0.25	0.35
Relación de corriente (α)	0.90	0.59	0.3

Conociendo estos valores y haciendo uso de la hoja de cálculo para coeficientes de arrastre y masa (ver Apéndice 11), y usando la Figura 24 Coeficientes de sustentación (Summer & Fredsoe, 1997) se hallan los siguientes valores de coeficientes:

Tabla 21 Coeficientes de fuerzas para cada caso

Coeficientes	Caso 1	Caso 2	Caso3
C_D	1.20	0.97	0.87
C_M	2.03	1.80	2.12
C_L	2.00	1.85	1.5

Las fuerzas aplicadas a las tuberías serán calculadas con la hoja de cálculos en el CD anexo (ver Apéndice 11), suponiendo una teoría lineal de ola (Airy). Esta teoría tiene una limitación que no puede ser aplicable para aguas poco profundas, ya que cuando la ola se aproxima a la costa deja de ser simétrica y las predicciones de longitudes de olas y velocidades de partículas no son correctas. Sin embargo para algunos casos los valores de velocidad que arroja son superiores que los que arroja una teoría de ola Stream Function (2.3.6 Teoría de la Ola en función de la Corriente (Stream Function), teoría que si es aplicable para aguas poco profundas) por lo tanto los esfuerzos generados serán mayores a los que realmente esté sometida la tubería

Con los coeficientes, el oleaje, la corriente, ubicación de la tubería y condiciones ambientales donde ella se encuentra se pueden conocer las fuerzas hidrodinámicas ejercidas en la misma. A continuación se muestran las fuerzas variables en el tiempo debido a la ola de altura significativa.

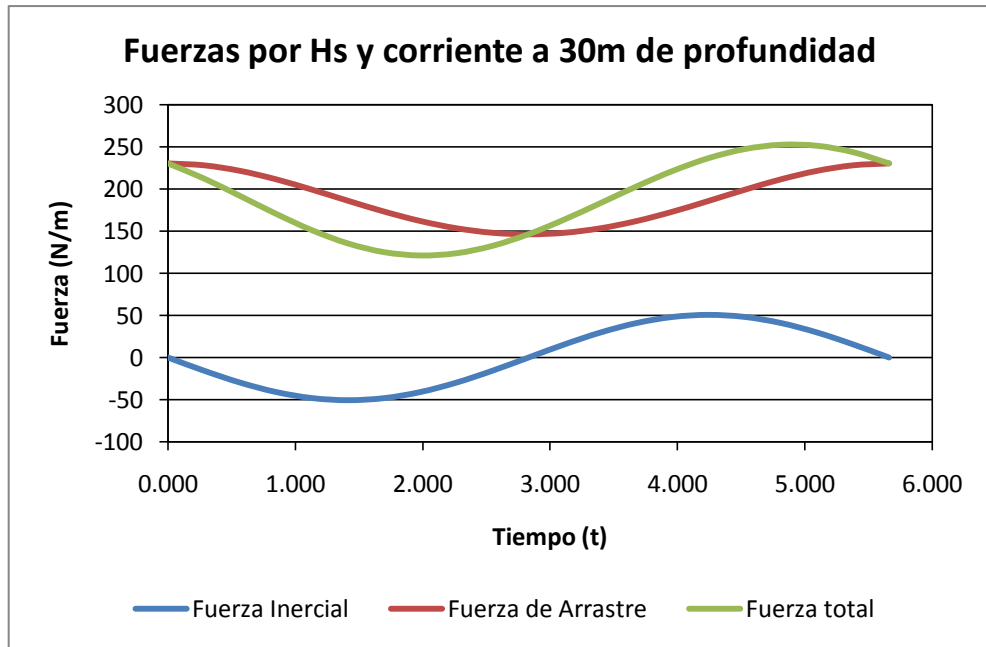


Figura 36 Fuerza Hidrodinámica para el caso 1

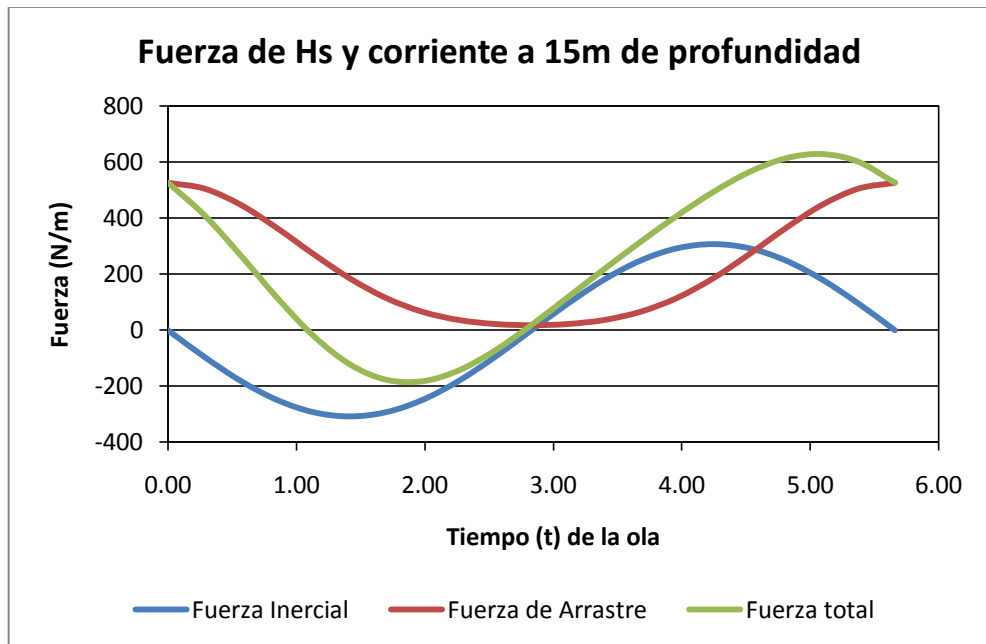


Figura 37 Fuerzas Hidrodinámicas para el caso 2

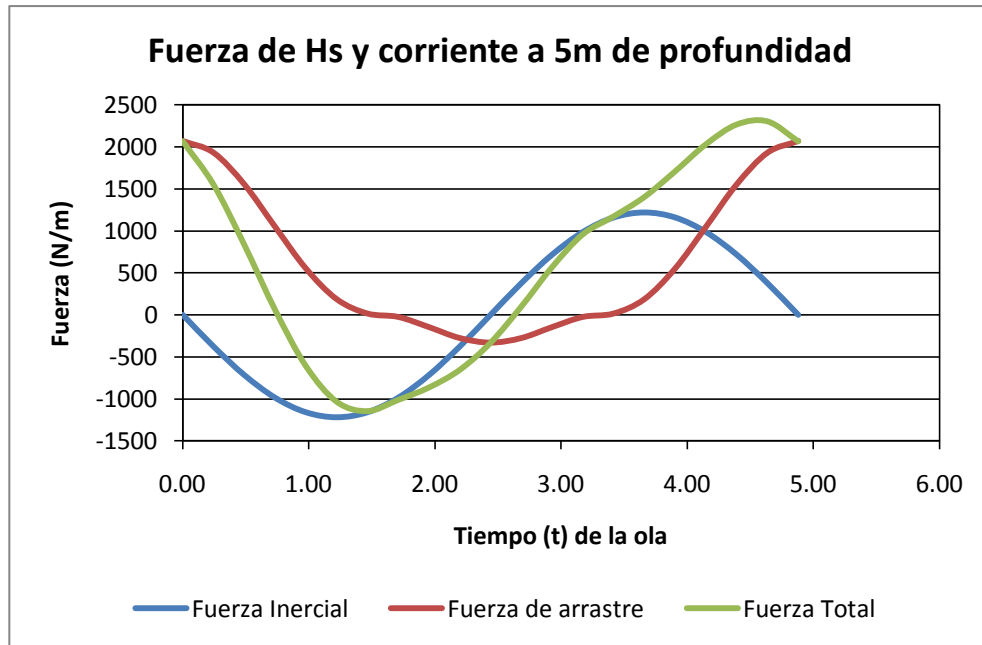


Figura 38 Fuerzas Hidrodinámicas para el caso 3

En esta etapa conviene verificar la ocurrencia de resonancia en la tubería con la formación de los vórtices. La frecuencia de desprendimiento de los vórtices fue hallada usando el número de Strouhal (St).

Tabla 22 Frecuencia de vórtices y verificación de resonancia

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Frecuencia de vórtices (f_v)	0.30	0.45	0.89
Resonancia, $f_v < f_n$?	Ok , $0.30 < 5.964$	Ok , $0.45 < 5.964$	Ok , $0.89 < 5.964$

La frecuencia de los vórtices fue hallada usando la hoja de cálculo para fuerzas de oleaje que se encuentra en el CD.

3.6.1 Aplicación de cargas al modelo

Las fuerzas halladas son fuerzas que varían en el tiempo, por lo tanto pueden ser cargadas en el SAP como una función tipo “Time History” y obtener los momentos máximo generados, para calcular los esfuerzos posteriormente.

Previo a la carga de las fuerzas de oleaje hay que definir en el caso de carga muerta (DEAD) cargas unitarias concentradas en los nodos del tramo libre en la dirección en que actuarán las fuerzas de oleaje

A continuación se presentan los pasos para cargar las fuerzas en el SAP y hallar los momentos:

1. Copiar de la hoja de cálculos (ver Apéndice 7 y Apéndice 11), los valores de fuerzas junto con los intervalos de tiempo correspondientes y pegarlos en un archivo Word como texto sin formato.
2. Guardar el archivo de Word como texto sin formato.
3. Ir a la pestaña del SAP “Define → Functions → Time History”. Se abrirá una nueva venta.
4. Desplegar la lista y elegir “From file → click en Add New Function”. Se abrirá una nueva venta.
5. Dar “click” en el botón “Browse” y carga el archivo de Word con las fuerzas de oleaje.
6. Del área de Valores seleccionar “Time and Function Values → click Display Graph”. Debe aparecer en pantalla la función.
7. Dar “click” en Ok hasta llegar a la pantalla donde se encuentra el modelo.
8. Ir a la pestaña del SAP “Define → Load Cases”. Se abrirá una nueva ventana.
9. Click en “Add New Load Case”. Se abrirá una nueva ventana
10. En el área “Load Case Type” desplegar la ventana y seleccionar “Time History”
11. En el área “Time History”, seleccionar “Periodic”.
12. En el área “Time Step Data” colocar 10000 en el “Number of Output Time steps” y 0.01 en “Output Time Step Size”
13. En el área “Others Parameters → click en Modify/Show”. Se Abrirá una nueva ventana.
14. En el área “Constant Modal Damping” colocar 0.005. Este valor es recomendado por los códigos noruegos (DNV-RP-F105, 2006).
15. Click en “Ok” hasta llegar a la pantalla del modelo.
16. Correr el programa.

Luego de haber cumplido todos los pasos el modelo estará listo para ser corrido y obtener los momentos máximos ejercidos por la fuerza hidrodinámica.

3.6.2 Esfuerzos generados por oleaje ($\alpha < 0.8$).

Los esfuerzos debido al oleaje serán calculados en base a los momentos máximos obtenidos en el modelo y usando la ecuación (EC – 75). Estos esfuerzos son mostrados en las tablas 21-22-23. El esfuerzo es multiplicado por dos para tomar en cuenta el vaivén de la tubería lo que ocasiona que el rango de esfuerzos sea el doble.

3.6.3 Daños por Fatiga

Para calcular los daños por fatiga es necesario definir una curva S-N. La tubería es soldada por ambos lados así que se puede elegir la curva “D” (ver Apéndice 3 y Apéndice 5) para tuberías submarinas con protección catódica. Curva recomendada por (DNV-RP-C203, 2010), ver Apéndice 3.

Las curvas S-N es dada por la ecuación (EC – 75) y los valores de la ecuación son los siguientes:

Primera rama $N \leq 10^6$ ciclos:

$$m_1 = 3$$

$$\log \bar{a}_1 = 11.764$$

Segunda rama $N \geq 10^6$ ciclos:

$$m_2 = 5$$

$$\log \bar{a}_2 = 15.606$$

Ya que la tubería transporta Gas-oil y la pérdida del material transportado puede causar muchos daños naturales, el factor de daño permisible será el menor de todos, por lo tanto:

$$\eta = 0.1$$

Entonces la regla PalmGren Miner debe ser menor que el valor arriba mencionado:

$$\sum_{n=1}^N \frac{n_i}{N_i} \leq 0.1$$

En donde:

n_i : Es el número de repeticiones del esfuerzo, en este caso es igual al número de olas.

N_i : El número de ciclos permitidos para que ocurra el esfuerzo.

En el CD anexo se encuentra una hoja de cálculo de daños por fatiga, haciendo uso de la misma se presentan los valores de daños de fatiga en las tablas 21-22-23.

Tabla 23 Daños por fatiga Caso 1

Altura media de olas	n_i	M (N-m)	σ (Mpa)	2σ (Mpa)	Ni	n_i/N_i
0.13	14651898	2369.25	0.66	1.32	1.02E+15	1.44E-08
0.38	32272550	2378.61	0.66	1.32	1.00E+15	3.23E-08
0.63	30937224	2497.92	0.69	1.39	7.83E+14	3.95E-08
0.88	20874322	2959.48	0.82	1.64	3.35E+14	6.23E-08
1.13	11414485	3922.43	1.09	2.18	8.20E+13	1.39E-07
1.38	5464867	4759.23	1.32	2.65	3.12E+13	1.75E-07
1.63	2415074	5295.22	1.47	2.94	1.83E+13	1.32E-07
1.88	1023253	5467.12	1.52	3.04	1.56E+13	6.57E-08
2.13	426840	5732.7	1.59	3.19	1.23E+13	3.47E-08
2.38	178503	6377.14	1.77	3.54	7.22E+12	2.47E-08
2.63	75816	7067.95	1.96	3.93	4.31E+12	1.76E-08
2.88	33044	7505.27	2.09	4.17	3.20E+12	1.03E-08
3.13	14900	8840.12	2.46	4.91	1.41E+12	1.06E-08
3.38	6983	10273.78	2.86	5.71	6.65E+11	1.05E-08
3.63	3402	12065.14	3.35	6.71	2.98E+11	1.14E-08
3.88	1715	13832.79	3.84	7.69	1.50E+11	1.14E-08
4.13	888	15682.26	4.36	8.72	8.02E+10	1.11E-08
4.38	468	17530.67	4.87	9.74	4.60E+10	1.02E-08
4.63	250	19614.64	5.45	10.90	2.62E+10	9.54E-09
4.88	135	21424.21	5.95	11.91	1.69E+10	8.01E-09
5.13	74	23459.92	6.52	13.04	1.07E+10	6.91E-09
5.38	41	25579.59	7.11	14.22	6.95E+09	5.90E-09
5.63	23	27637.72	7.68	15.36	4.72E+09	4.87E-09
5.88	14	29983.56	8.33	16.66	3.14E+09	4.46E-09
6.13	8	32348.96	8.99	17.98	2.15E+09	3.72E-09
6.38	5	34182.12	9.50	19.00	1.63E+09	3.07E-09
6.63	3	37726.54	10.48	20.97	9.96E+08	3.01E-09
6.88	2	40286.9	11.20	22.39	7.17E+08	2.79E-09
7.13	1	43400.21	12.06	24.12	4.94E+08	2.02E-09
7.38	1	46253.41	12.85	25.71	3.59E+08	2.78E-09
7.63	1	49324.9	13.71	27.41	2.61E+08	3.84E-09
7.88	0	52442.17	14.57	29.15	1.92E+08	0.00E+00
8.13	0	55745.39	15.49	30.98	1.41E+08	0.00E+00
					$\sum \frac{n_i}{N_i}$	8.74E-07

Tabla 24 Daños por fatiga Caso 2

Altura media de olas	n_i	M (N-m)	σ (Mpa)	2σ (Mpa)	Ni	n_i/N_i
0.13	14945866	1919.47	0.53	1.07	2.92E+15	5.12E-09
0.38	32733604	2099.73	0.58	1.17	1.86E+15	1.76E-08
0.63	31068531	2709.22	0.75	1.51	5.21E+14	5.96E-08
0.88	20723263	3463.86	0.96	1.93	1.53E+14	1.36E-07
1.13	11211811	4226.82	1.17	2.35	5.64E+13	1.99E-07
1.38	5324347	5039.76	1.40	2.80	2.34E+13	2.27E-07
1.63	2341643	5881.88	1.63	3.27	1.08E+13	2.17E-07
1.88	990610	6784.76	1.89	3.77	5.29E+12	1.87E-07
2.13	413732	7808.26	2.17	4.34	2.62E+12	1.58E-07
2.38	173603	8961.71	2.49	4.98	1.32E+12	1.32E-07
2.63	74094	10070.26	2.80	5.60	7.35E+11	1.01E-07
2.88	32479	11278.82	3.13	6.27	4.17E+11	7.79E-08
3.13	14732	12566.04	3.49	6.98	2.43E+11	6.07E-08
3.38	6944	13903.23	3.86	7.73	1.46E+11	4.74E-08
3.63	3402	15416.92	4.28	8.57	8.74E+10	3.89E-08
3.88	1725	16866.69	4.69	9.37	5.58E+10	3.09E-08
4.13	899	18497.41	5.14	10.28	3.51E+10	2.56E-08
4.38	479	20169.33	5.61	11.21	2.28E+10	2.10E-08
4.63	259	21756.68	6.05	12.09	1.56E+10	1.66E-08
4.88	142	23560.44	6.55	13.09	1.05E+10	1.35E-08
5.13	79	25519.63	7.09	14.18	7.03E+09	1.12E-08
5.38	45	27562.11	7.66	15.32	4.78E+09	9.41E-09
5.63	26	29601.7	8.23	16.45	3.35E+09	7.77E-09
5.88	15	32033.02	8.90	17.80	2.26E+09	6.65E-09
6.13	9	34145.17	9.49	18.98	1.64E+09	5.49E-09
6.38	6	36418.11	10.12	20.24	1.19E+09	5.05E-09
6.63	4	38977.8	10.83	21.66	8.46E+08	4.73E-09
6.88	3	41299.34	11.48	22.95	6.33E+08	4.74E-09
7.13	2	43794.83	12.17	24.34	4.72E+08	4.23E-09
7.38	1	46393.52	12.89	25.79	3.54E+08	2.82E-09
7.63	1	49022.5	13.62	27.25	2.69E+08	3.72E-09
7.88	1	51870.06	14.41	28.83	2.03E+08	4.93E-09
8.13	0	54746.66	15.21	30.43	1.55E+08	0.00E+00
					$\sum \frac{n_i}{N_i}$	1.84E-06

Tabla 25 Daños por fatiga Caso 3

Altura media de olas	n_i	M (N-m)	σ (Mpa)	2σ (Mpa)	Ni	n_i/N_i
0.13	13036170	1944.14	0.54	1.08	2.74E+15	4.76E-09
0.38	29200143	3758.79	1.04	2.09	1.01E+14	2.88E-07
0.63	29091573	5232.94	1.45	2.91	1.94E+13	1.50E-06
0.88	20895802	6681.05	1.86	3.71	5.72E+12	3.65E-06
1.13	12431365	8208.65	2.28	4.56	2.04E+12	6.09E-06
1.38	6586642	9805.8	2.73	5.45	8.39E+11	7.85E-06
1.63	3256072	11594.53	3.22	6.44	3.63E+11	8.96E-06
1.88	1550051	13662.47	3.80	7.59	1.60E+11	9.70E-06
2.13	725990	16068.34	4.47	8.93	7.10E+10	1.02E-05
2.38	339301	18680.23	5.19	10.38	3.35E+10	1.01E-05
2.63	159716	21253.79	5.91	11.81	1.75E+10	9.10E-06
2.88	76226	24109.54	6.70	13.40	9.34E+09	8.16E-06
3.13	37078	27146.64	7.54	15.09	5.16E+09	7.18E-06
3.38	18459	30440.48	8.46	16.92	2.91E+09	6.34E-06
3.63	9430	34137.87	9.49	18.97	1.64E+09	5.74E-06
3.88	4946	37503.02	10.42	20.84	1.03E+09	4.82E-06
4.13	5964	41601.73	11.56	23.12	6.11E+08	9.77E-06
					$\sum \frac{n_i}{N_i}$	1.10E-04

Tabla 26 Verificación de daños por fatiga para 30 años.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
$\sum \frac{n_i}{N_i}$	$8.74 \cdot 10^{-7}$	$1.84 \cdot 10^{-6}$	$1.10 \cdot 10^{-4}$
η	0.10	0.10	0.10
$i \sum \frac{n_i}{N_i} < \eta ?$	OK	OK	OK

Conociendo estos valores se puede concluir que no habrá daño por fatiga en las tuberías para las condiciones de olas dadas y para el tramo libre estudiado en 30 años.

3.6.4 Esfuerzos generados por vibraciones inducidas por vórtices ($\alpha > 0.8$).

Estos esfuerzos son calculados para condiciones de flujo permanente donde la corriente prevalece sobre la ola. Para el cálculo de los momentos se introdujo una fuerza de valor constante en dirección del flujo (Fuerza de arrastre) y perpendicular al flujo (Fuerza de sustentación).

Los coeficientes C_D y C_M fueron calculados tomando en cuenta solo la velocidad de la corriente. El coeficiente de sustentación es igual a $C_L = 0.9$. (ver, 2.8.1 Coeficientes de sustentación).

Tabla 27 Valores de coeficientes para análisis por vibraciones.

	C_D	C_M	C_L
Valor	1.28	2.10	0.9

Usando las ecuaciones (EC – 51) y (EC – 51) se tiene que:

$$F_D = 200.35 \text{ N/m}$$

$$F_L = 140.87 \text{ N/m}$$

Las fuerzas a introducir en el modelo serán entonces el doble ya que los nodos de nuestro modelo están espaciados cada dos metros, entonces queda:

$$F_D = 400.70 \text{ N}$$

$$F_L = 281.74 \text{ N}$$

Los momentos que arroja el programa son los siguientes:

$$M_Z = 4808.11 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_Y = -3142.10 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Usando la ecuación (EC – 76), el esfuerzo es:

$$\sigma = 473058.89 \text{ Pa}$$

Para tomar en cuenta el rango de esfuerzos, el esfuerzo con el que se debe ingresar a la curva S-N es doble del anterior, por lo tanto:

$$\sigma = 0.95 \text{ MPa}$$

Si el número de ciclo que corresponde al esfuerzo antes calculado es mayor a 10^8 la tubería será capaz de soportar los esfuerzos generados por vibración.

Entrando con la curva “D” de la gráfica de curvas S-N (ver Figura 27) se obtiene que:

$$N = 1.63 \cdot 10^{14} \text{ ciclos}$$

La tubería no fallará por vibración.

Capítulo 4 Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

Se desarrolló una metodología para el diseño o revisión de tuberías en tramos libres. Se analizó el tema adquiriendo un nivel de conocimiento necesario para su interpretación y aplicación.

En el país no se han desarrollado normas o metodologías para el análisis de tuberías en tramos libres.

En profundidades considerables las olas de poca amplitud no generan casi daños; pueden ser despreciables

Existen normas simples y complejas, consideramos que la aplicación de ellas depende de la importancia y costo de la tubería a instalar. La Norma DNV-RP-F105 es muy compleja y específica, pero es la que más investigación ha desarrollado en el tema.

El análisis de un tramo requiere de programas de computación para modelar las condiciones de flujo alrededor la tubería y estimar los esfuerzos a los que estará sometida. La tubería

Los análisis de tramo libre en tuberías submarinas son complejos por sus características hidrodinámicas y condiciones ambientales de gran variabilidad.

Para la evaluación y/o comprensión del tema es necesario entender físicamente lo que sucede.

La generación de tramos libres en una tubería submarina es impredecible ya que ellos pueden originarse por causas que el hombre no puede controlar, sin embargo el ingeniero debe manejar las incertidumbres de una manera racional para un diseño seguro y económico.

Para un buen diseño es necesario de tener información histórica de oleaje en la zona del proyecto, una mejor predicción de las condiciones por oleaje permite un diseño más racional.

El suelo juega un importante papel en los modos naturales de vibración de la tubería. En suelos más rígidos las frecuencias de vibraciones son mayores.

En condiciones donde el flujo es oscilatorio los efectos generados por los vórtices son mitigados debido al propio régimen de flujo.

En condiciones reales siempre ocurrirá desprendimiento de vórtices.

Para que una tubería falle por fatiga debido a fuerzas por oleaje debe encontrarse en mares muy agitados

La generación de Vórtices no causa daños significativos a la tubería a menos que la frecuencia de desprendimiento de ellos esté cercana a la frecuencia natural de la tubería. Se debe evitar que la tubería entre en resonancia con la frecuencia de los vórtices

4.2 Recomendaciones

Se recomienda utilizar programas más potentes que el SAP, como el ANSYS, capaces de generar y evaluar las condiciones de oleaje y corriente para un mejor diseño o verificación de tramos libres.

Se recomienda realizar estudios de elemento finitos y tomar en cuenta todas las solicitaciones a la que pueda estar sometida la tubería (fuerzas axiales, gradientes de temperatura, presiones, etc).

El tema es interesante e importante por lo que la investigación en modelos físicos en laboratorios debería implementarse.

Si se desea realizar un buen modelaje del suelo, se recomienda tener un estudio detallado del fondo marino a lo largo de la ruta de la tubería y suficiente información de las condiciones de oleaje y corriente.

Se recomienda profundizar el estudio de las vibraciones, concentrándose en aspectos específicos como el desarrollo de espectros de oleajes y su aplicación.

Capítulo 5 Referencias Bibliográficas

American Bureau of Shipping. (2006, Mayo). Subsea Pipelines Systems. New York.

Blevins, R. D. (2001). *Flow Induced Vibrations*. Florida: Krieger Publishing Company.

Dean, R. G. (1984). *Water wave Mechanich for Engineers and Scientist, Vol 2*. Singapour: World Scientific Publishing.

Dean, R. (1970). Relatives validities of water wave theories. *Journal of the Water ways and harbours Div., ASCE* .

Dean, R. (1965). Stream Functions Represetationsof nonlinear ocean waves. *Journal of Geophysical Research* , Vol 70, N° 8.

Det Norske Veritas. (2010, Octubre). DNV-OS-F101. *Submarine Pipeline Systems* .

Det Norske Veritas. (2010, Abril). DNV-RP-C203. *Fatigue Desing of Offshore Steel Structures* .

Det Norske Veritas. (2010, Octubre). DNV-RP-C205. *Enviromental Conditios and Enviromental Loads* .

Det Norske Veritas. (2006, Febrero). DNV-RP-F105. *Free Spanning Pipelines* .

Fenton, J. (1985). *A fifth order Stokes theory for steady waves*. Coast and Ocean Eng. ASCE 111.

Fredsoe, S. &. (1997). *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*.

Guo, B. (2005). *Offshore Pipelines*. Oxford: Elsevier Inc.

Hartvig, K. R. (2008, Junio 11). Free Span Analysis of an Offshore Pipeline. Aalborg, Dinamarca.

Hurtado, J. B. (2010, Octubre). Análisis Estructural de Tuberías Submarinas. Caracas, Dtto. Capital, Venezuela.

Levy, P. N. (2010, Octubre). Análisis de Estabilidad en Tuberías Submarinas para Cargas Hidrodinámicas. Caracas, Dtto. Capital, Venezuela.

Longuet-Higgins, M. (1975). On the joint distribution of the periods and amplitudes of the sea waves. *Journal of the geophysical research*, 80 , 2688-2694.

Massie, J. M. (2001). *Offshore Hydromechanics*. Delft: Delft University of Technology.

Mousselli, A. H. (1981). *Offshore Pipelines Design, Analysis and Methods*. Oklahoma: PennWell Publishing Company.

Pickard, G. a. (1990). *Descriptive Physical Oceanography*. Oxford OX2 8DP: Butter-Worth-Heinemann.

Research Center, U.S. Army Coastal Engineering . (1984). *Coastal Engineering, Shore Protection*. Washington D.C.: Vicksburg, Miss. : Dept. of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.

Schwartz. (1974). Computer extension and analytical of Stokes' expansion for gravity waves. *J. Fluid Mech* , 553-578.

Sorensen, R. M. (2006). *Basic Coastal Engineering*. New York: Springer Science+Business Media,.

White, F. (1999). *Mecánica de Fluidos*. McGraw Hill.

Wiegles, R. (1960). A presentation of cnoidal wave theory. *Journal of Fluids Mechanics* , Vol. 7, N° 8.

Capítulo 6 Apéndice

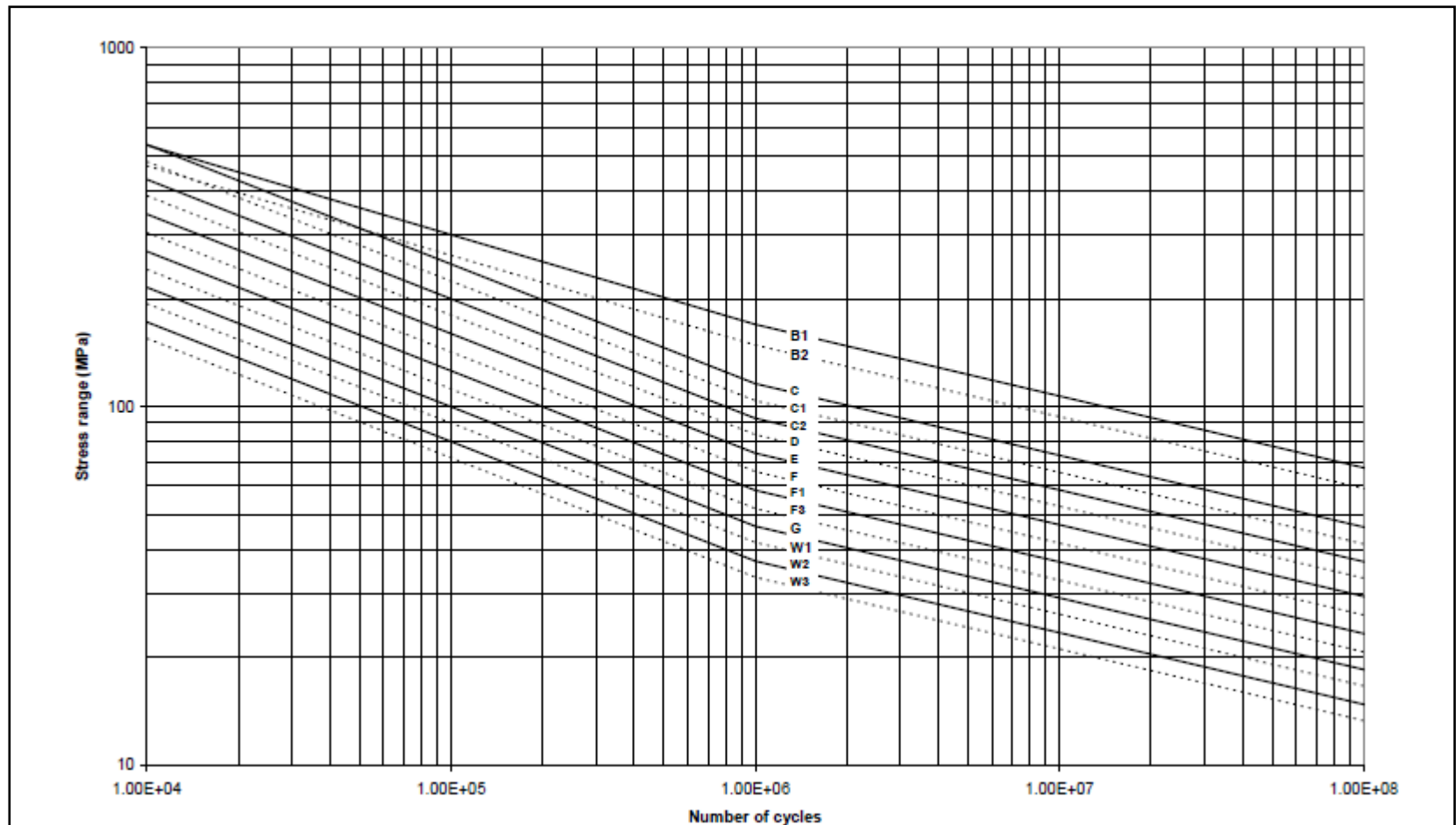
Altura (m)		Altura media	Período	Oleaje 1	Oleaje 2	Oleaje 3
Desde	hasta					
0.00	0.25	0.13	2.40	14651898	14945866	13036170
0.25	0.50	0.38	4.10	32272550	32733604	29200143
0.50	0.75	0.63	5.30	30937224	31068531	29091573
0.75	1.00	0.88	6.30	20874322	20723263	20895802
1.00	1.25	1.13	7.10	11414485	11211811	12431365
1.25	1.50	1.38	7.90	5464867	5324347	6586642
1.50	1.75	1.63	8.60	2415074	2341643	3256072
1.75	2.00	1.88	9.20	1023253	990610	1550051
2.00	2.25	2.13	9.80	426840	413732	725990
2.25	2.50	2.38	10.30	178503	173603	339301
2.50	2.75	2.63	10.90	75816	74094	159716
2.75	3.00	2.88	11.40	33044	32479	76226
3.00	3.25	3.13	11.90	14900	14732	37078
3.25	3.50	3.38	12.30	6983	6944	18459
3.50	3.75	3.63	12.80	3402	3402	9430
3.75	4.00	3.88	13.20	1715	1725	4946
4.00	4.25	4.13	13.60	888	899	5964
4.25	4.50	4.38	14.00	468	479	0
4.50	4.75	4.63	14.40	250	259	0
4.75	5.00	4.88	14.80	135	142	0
5.00	5.25	5.13	15.20	74	79	0
5.25	5.50	5.38	15.60	41	45	0
5.50	5.75	5.63	15.90	23	26	0
5.75	6.00	5.88	16.30	14	15	0
6.00	6.25	6.13	16.60	8	9	0
6.25	6.50	6.38	16.90	5	6	0
6.50	6.75	6.63	17.30	3	4	0
6.75	7.00	6.88	17.60	2	3	0
7.00	7.25	7.13	17.90	1	2	0
7.25	7.50	7.38	18.20	1	1	0
7.50	7.75	7.63	18.50	1	1	0
7.75	8.00	7.88	18.80	0	1	0
8.00	8.25	8.13	19.10	0	0	0
H_S				3.09	3.07	3.34

Apéndice 1 Registro de Oleajes

Parameter	Airy wave theory		Stokes second-order wave theory
	General water depth	Deep water	
Velocity potential, ϕ	$\frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$ = $\frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin \theta$	$\frac{\pi H}{kT} e^{kz} \sin \theta$ = $\frac{gH}{2\omega} e^{kz} \sin \theta$	$\phi_t + \frac{3}{8} \frac{\pi H}{kT} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)] \sin 2\theta}{\sinh^4(kd)}$ Note that in deep water the Stokes second-order wave potential is equal to the first order Airy wave potential.
Phase velocity, celerity, c	$\sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$	$gT/(2\pi)$	$\sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$
Wavelength, λ	cT	$gT^2/(2\pi)$	cT
Surface elevation, η	$\frac{H}{2} \cos \theta$	$\frac{H}{2} \cos \theta$	$\eta_t + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} [2 + \cosh 2kd] \cos 2\theta$
Horizontal particle displacement, ξ	$-\frac{H}{2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$-\frac{H}{2} e^{kz} \sin \theta$	$\xi_t + \frac{H}{8} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{1}{\sinh^2(kd)} \left\{ 1 - \frac{3 \cosh[2k(z+d)]}{2 \sinh^2(kd)} \right\} \sin 2\theta$ + $\frac{H}{4} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^3(kd)} (\omega t)$
Vertical particle displacement, ζ	$-\frac{H}{2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$\frac{H}{2} e^{kz} \cos \theta$	$\zeta_t + \frac{3H}{16} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Horizontal particle velocity, u	$\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos \theta$	$u_t + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Vertical particle velocity, w	$\frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin \theta$	$w_t + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$
Horizontal particle acceleration, $\dot{u}$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \sin \theta$	$\dot{u}_t + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$
Vertical particle acceleration, $\dot{w}$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \cos \theta$	$\dot{w}_t - \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Subsurface pressure, p	$-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \cos \theta$	$-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H e^{kz} \cos \theta$	$p_t + \frac{3}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \left\{ \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} - \frac{1}{3} \right\} \cos 2\theta$ - $\frac{1}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \{ \cosh[2k(z+d)] - 1 \}$
Group velocity, c_g	$\frac{c}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]$	$\frac{c}{2}$	$(c_g)_t$
Average energy density, E	$\frac{1}{8} \rho g H^2$	$\frac{1}{8} \rho g H^2$	$\frac{1}{8} \rho g H^2$
Energy flux, F	Ec_g	$\frac{1}{2} Ec$	Ec_g

Notation: d = mean water depth, g = acceleration of gravity, H = trough-to-crest wave height, $k = 2\pi/\lambda$ = wave number, λ = wave length, T = wave period, t = time; x = distance of propagation; z = distance from mean free surface positive upward; $\theta = kx - \omega t = k(x-ct)$; $\omega = 2\pi/T$ = angular wave frequency. Subscript t denotes linear small-amplitude theory.

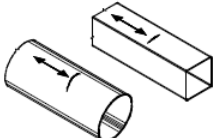
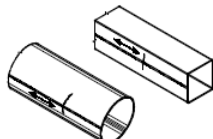
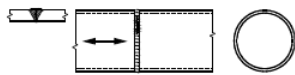
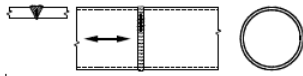
Apéndice 2 Resumen de fórmulas. (DNV-RP-F105, 2006)



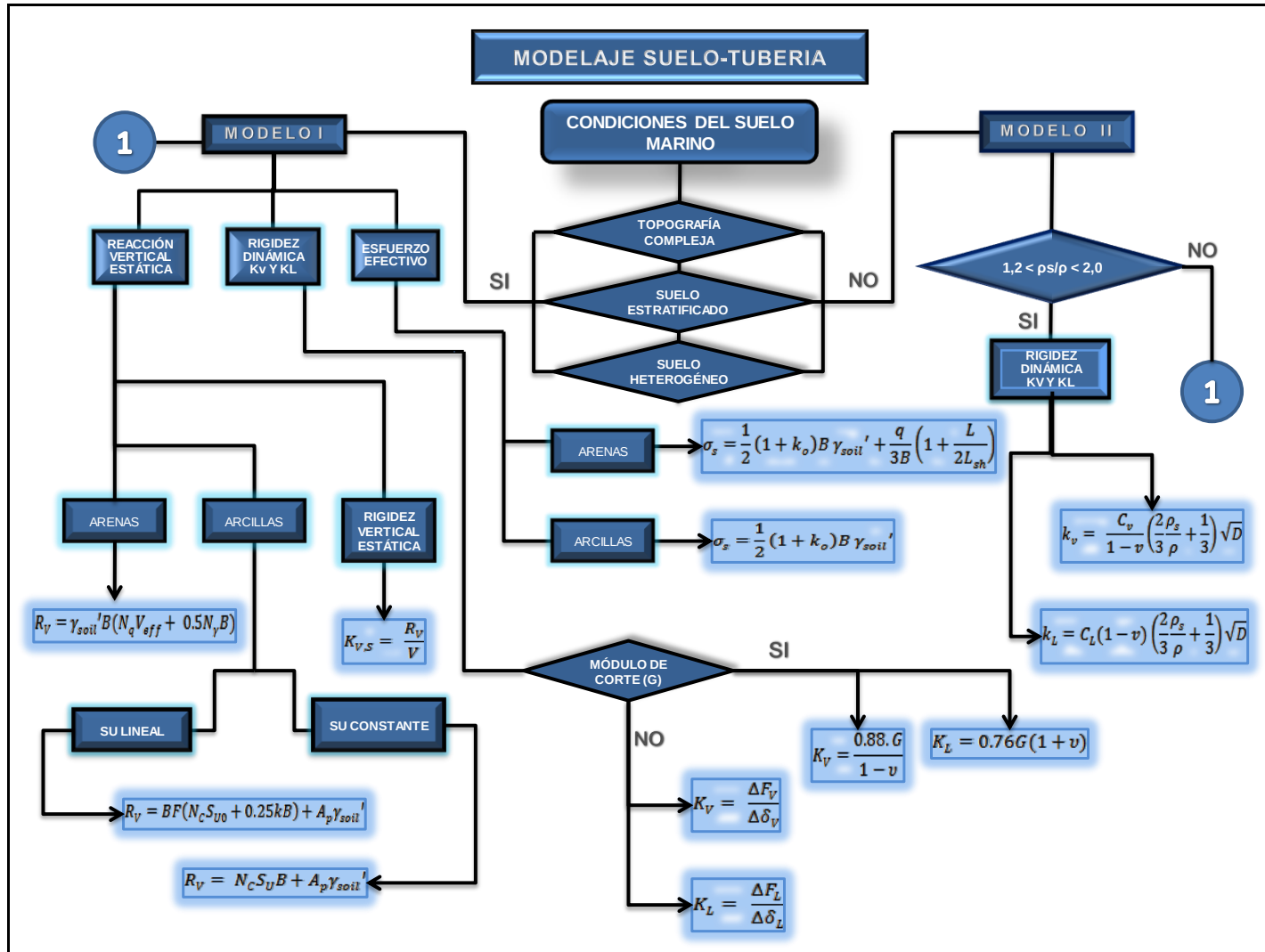
Apéndice 3 Curvas S-N para tuberías submarinas con protección catódica. (DNV-RP-C203, 2010)

<i>S-N curve</i>	<i>N ≤ 10⁶ cycles</i>		<i>N > 10⁶ cycles</i> $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$	<i>Fatigue limit at 10⁷ cycles*)</i>	<i>Thickness exponent k</i>	<i>Stress concentration in the S-N detail as derived by the hot spot method</i>
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	14.917	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.685	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.192	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.049	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	11.901	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	11.764	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	11.610	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.455	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.299	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.146	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	10.998	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	10.861	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	10.707	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.570	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	11.764	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

Apéndice 4 Valores para la construcción de las curvas S-N. (DNV-RP-C203, 2010)

<i>Detail category</i>	<i>Constructional details</i>	<i>Description</i>	<i>Requirement</i>
B1	1. 	1. Non-welded sections	1. — Sharp edges and surface flaws to be improved by grinding
B2	2. 	2. Automatic longitudinal seam welds (for all other cases, see Table A-3)	2. — No stop /start positions, and free from defects outside the tolerances of OS-C401 Fabrication and Testing of Offshore Structures.
C1		3. Circumferential butt weld made from both sides dressed flush.	3., 4., 5. and 6. — The applied stress must include the stress concentration factor to allow for any thickness change and for fabrication tolerances, ref. section 3.3.7. — The requirements to the corresponding detail category in Table A-5 apply.
D		4. Circumferential butt weld made from both sides.	
E		5. Circumferential butt weld made from both sides made at site.	
F		6. Circumferential butt weld made from one side on a backing bar.	
F3		7. Circumferential butt weld made from one side without a backing bar.	7. — The applied stress should include the stress concentration factor to allow for any thickness change and for fabrication tolerances, ref. section 3.3.7. — The weld root proved free from defects larger than 1-2 mm.
C1		8. Circumferential butt welds made from one side that are machined flush to remove defects and weld overfill.	8. A machining of the surfaces will reduce the thickness. Specially on the root side material will have to be removed. A reduced thickness should be used for calculation of stress. The weld should be proved free from defects by non-destructive examination (It is assumed that this is fulfilled by Inspection category I). Category C may be achieved; ref. Table A-5.

Apéndice 5 Tabla de referencia para la selección de curva S-N para tuberías submarinas con protección catódica. (DNV-RP-C203, 2010)



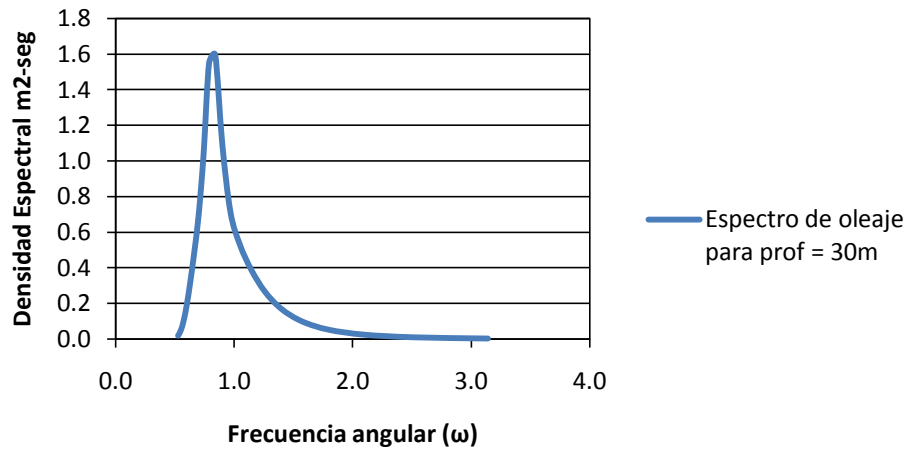
Apéndice 6 Flujoograma para el cálculo de rigideces de resortes de suelo

Datos de ola significativa				Datos de la tubería y mar				Parámetros de ola, corriente y flujo			
Prof Media (m)	5			Diametro D (m)	0.588			Longitud de ola (λ)	29.36		
Período (T) (seg)	4.88			Profundidad (Z) + $\uparrow$	-4.8			u (máx) de ola (m/s)	1.67		
Altura de ola (H)	3.34			$Z^* = e + \uparrow$	0.2			Celeriad (m/s)	6.02		
Velocidad significativa (m/s)	1.67			Densidad ρ (kg/m3)	1027			Número de ola (K)	0.21		
Datos de corriente y coeficientes				Viscosidad cinemática (v)				Velocidad de corriente (m/s)			
Velocidad corriente (nudos)	1.5			Ángulo de ataque (θ)				Frec. de desprendimiento vórtices			
Velocidad corriente (m/s)	0.77			Frecuencia de la Tubería				Factor de reduccion (Rc)			
Número de Strouhal	0.22			Datos del fondo marino				Keulegau Carpenter (Kc)			
Coefficiente de masa (Cm)	2.12			Rugosidad de fondo (Zo)				Reynolds (Re)			
Coefficiente de arrastre (Cd)	0.87			Punto de zona interna (Zr)				Velocidad Reducida			
								Relación de flujo de corriente (α)			
Datos para cálculos de coeficientes de arrastre y de masa				Valores multiplicadores de coeficientes							
d	0.30	e/D	0.340	CM,0	1.20	CD(k/D)	1.00				
Az/D	0.00	Δ/D	0.298	Ψ_k	1.73	$\Psi_{KC,\alpha}$	1.00				
k	0.003	k/D	0.006	Ψ_{proxi}	1.14	Ψ_{proxi}	1.09				
D	0.59	f(α)	1.000	Ψ_{trench}	0.90	Ψ_{trench}	0.80				
		α	0.30			Ψ_{VIV}	1.00				
		KC	19.83								
		e	0.20								
				Resonancia debido V.I.V.?							
				No							

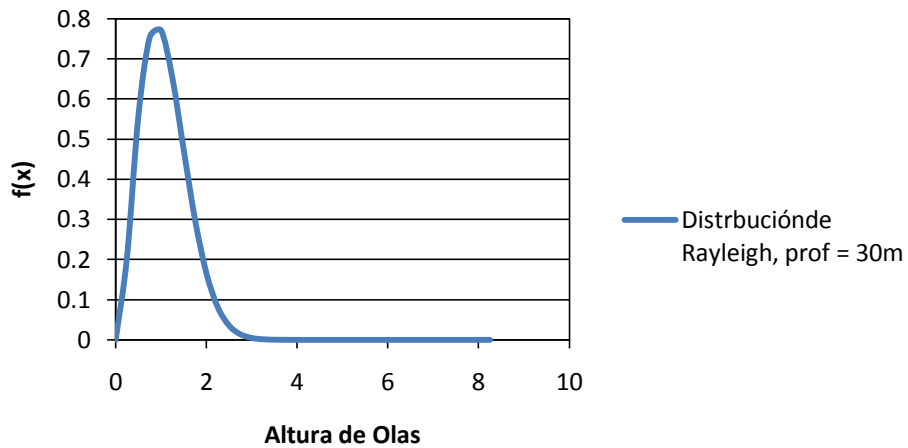
Cálculos de velocidades por Teoría de Airy										
Vel. Vertical (m/s)	Vel. Hozntal (m/s)	Ace. vert (m/s ²)	Ace. horizontal (m/s ²)	Profundida d (Z) (m)	Dis. Lateral (X) (m)	Tiempo (t) (seg)	Perfil de la ola (η)	F. Inercial (N/m)	F. Drag (N/m)	F. Total (N/m)
0.000	1.673	0.092	0.000	-4.80	0.00	0.000	1.67	0.00	1504.23	1504.23
-0.022	1.591	0.088	-0.666	-4.80	0.00	0.244	1.59	-393.89	1402.89	1009.01
-0.042	1.353	0.075	-1.266	-4.80	0.00	0.488	1.35	-749.22	1128.81	379.59
-0.058	0.983	0.054	-1.743	-4.80	0.00	0.732	0.98	-1031.21	761.19	-270.02
-0.068	0.517	0.028	-2.049	-4.80	0.00	0.976	0.52	-1212.26	400.76	-811.50
-0.072	0.000	0.000	-2.154	-4.80	0.00	1.220	0.00	-1274.64	135.18	-1139.46
-0.068	-0.517	-0.028	-2.049	-4.80	0.00	1.464	-0.52	-1212.26	10.46	-1201.79
-0.058	-0.983	-0.054	-1.743	-4.80	0.00	1.708	-0.98	-1031.21	-18.80	-1050.01
-0.042	-1.353	-0.075	-1.266	-4.80	0.00	1.952	-1.35	-749.22	-107.00	-856.22
-0.022	-1.591	-0.088	-0.666	-4.80	0.00	2.196	-1.59	-393.89	-201.69	-595.57
0.000	-1.673	-0.092	0.000	-4.80	0.00	2.440	-1.67	0.00	-241.21	-241.21
0.022	-1.591	-0.088	0.666	-4.80	0.00	2.684	-1.59	393.89	-201.69	192.20
0.042	-1.353	-0.075	1.266	-4.80	0.00	2.928	-1.35	749.22	-107.00	642.21
0.058	-0.983	-0.054	1.743	-4.80	0.00	3.172	-0.98	1031.21	-18.80	1012.41
0.068	-0.517	-0.028	2.049	-4.80	0.00	3.416	-0.52	1212.26	10.46	1222.72
0.072	0.000	0.000	2.154	-4.80	0.00	3.660	0.00	1274.64	135.18	1409.82
0.068	0.517	0.028	2.049	-4.80	0.00	3.904	0.52	1212.26	400.76	1613.01
0.058	0.983	0.054	1.743	-4.80	0.00	4.148	0.98	1031.21	761.19	1792.39
0.042	1.353	0.075	1.266	-4.80	0.00	4.392	1.35	749.22	1128.81	1878.02
0.022	1.591	0.088	0.666	-4.80	0.00	4.636	1.59	393.89	1402.89	1796.78
0.000	1.673	0.092	0.000	-4.80	0.00	4.880	1.67	0.00	1504.23	1504.23

Apéndice 7 Hoja de cálculos para fuerzas usando la teoría de Airy

Espectro de oleaje para Caso 1

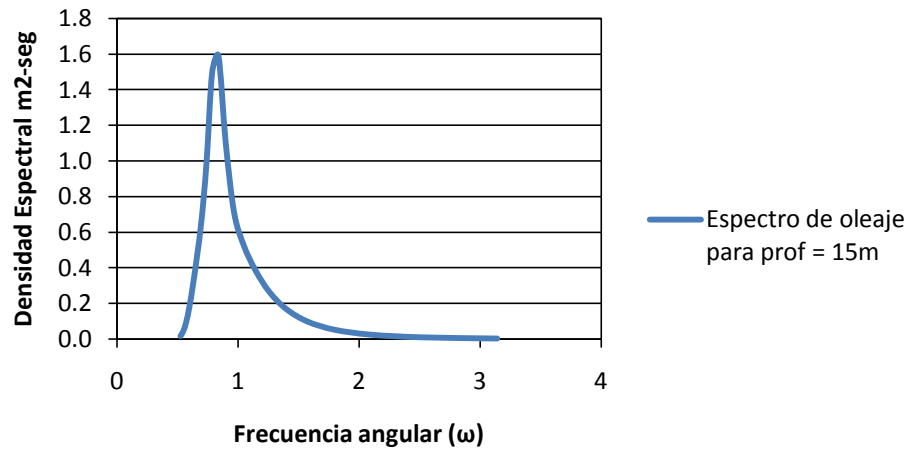


Distribución de Rayleigh para Caso 1

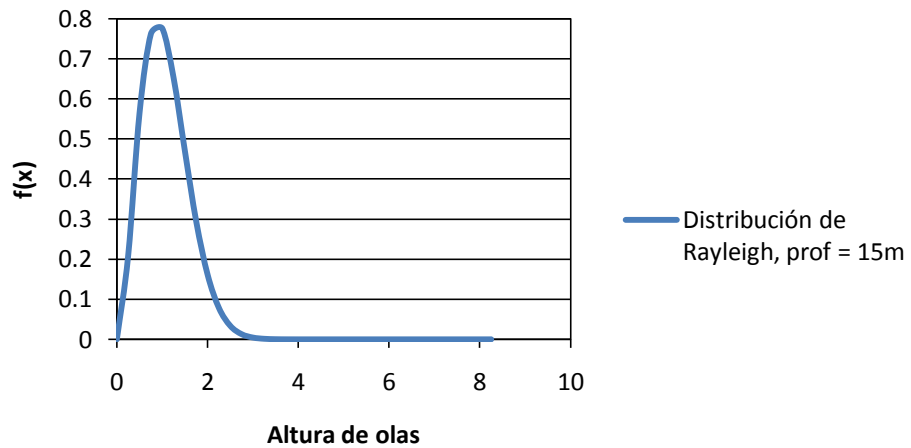


Apéndice 8 Espectro de ola y distribución de Rayleigh para el Caso 1

Espectro de oleaje para Caso 2

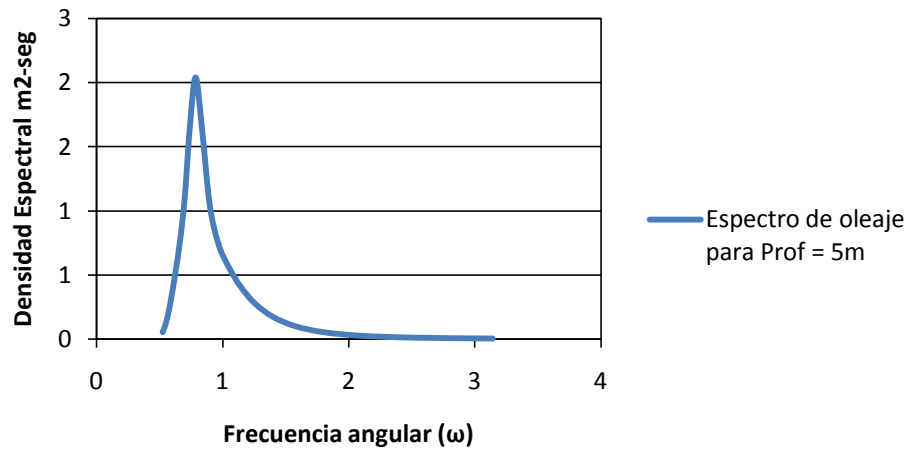


Distribución de Rayleigh Caso 2

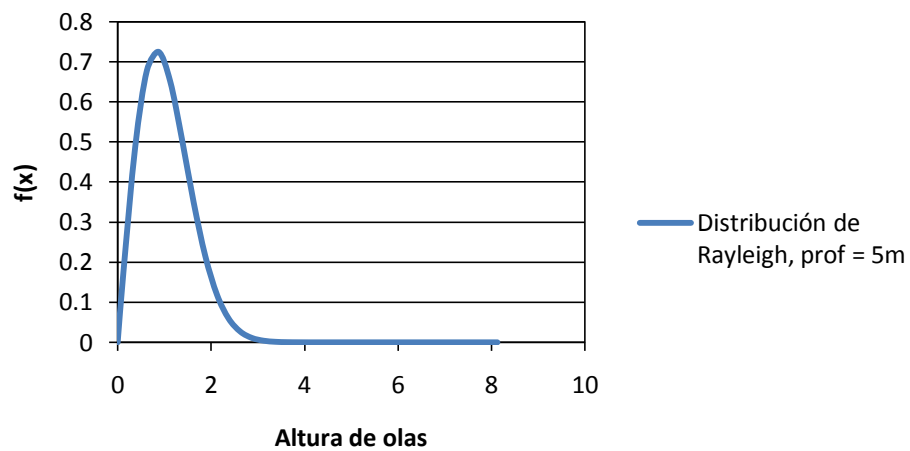


Apéndice 9 Espectro de ola y distribución de Rayleigh para el Caso 2

Espectro de oleaje para Caso 3



Distribución de Rayleigh para Caso 3



Apéndice 10 Espectro de ola y distribución de Rayleigh para el Caso 3

Documentos dentro del CD anexo	Hoja de cálculo
Anexo 1	Hoja de cálculo de masa de la tubería.
Anexo 2	Hoja de cálculo para el espectro de oleaje.
Anexo 3	Hoja de cálculo para coeficientes de arrastre y masa.
Anexo 4	Hoja de cálculo de fuerza por oleajes, usando la ecuación de Airy.
Anexo 5	Hoja de cálculo de daños por fatiga.

Apéndice 11 Tabla de contenido de CD anexo.