

**PARAMETRIZACIÓN DE INSTALACIÓN DE TUBERÍAS  
SUBMARINAS DESDE UNA EMBARCACIÓN DE  
ENSAMBLAJE Y TENDIDO MEDIANTE LA CONFIGURACIÓN  
DE TENDIDO EN S**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

Presentado ante la

**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**

Como parte de los requisitos para optar al título de

**INGENIERO CIVIL**

**REALIZADO POR**

Alkhouri Issa, Danny I.

Da Costa Arnal, Pedro.

**TUTOR**

Ing. Levan Rotinov.

**FECHA**

Octubre, 2018.

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PARAMETRIZACIÓN DE INSTALACIÓN DE TUBERÍAS**  
**SUBMARINAS DESDE UNA EMBARCACIÓN DE**  
**ENSAMBLAJE Y TENDIDO MEDIANTE LA**  
**CONFIGURACIÓN DE TENDIDO EN S.**

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado:.....*DIECINUEVE (19)*.....

**JURADO EXAMINADOR**

Nombre: Levan Rotinov

Firma: *Levan Rotinov*

Nombre: Rafael Becemberg

Firma: *Rafael Becemberg*

Nombre: Angelo Marinilli

Firma: *Angelo Marinilli*

**REALIZADO POR:**

**PROFESOR GUÍA:**

**FECHA:**



DANNY I. ALKHOURI I.

PEDRO DA COSTA A.

ING. LEVAN ROTINOV

OCTUBRE 2018

## **DEDICATORIA**

*Le dedico este logro ante a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud y sabiduría para lograr mis objetivos. A mis padres porque gracias a sus sacrificios, educación, valores, y su presencia en todo momento, en los buenos, en los no tan buenos, incluso en los que no quería hablar con nadie; he podido llegar en donde estoy ahora. A mis hermanos, porque siempre están ahí cuando necesito su ayuda, así como yo estoy y estaré ahí cuando ellos necesiten cualquier cosa así ponga mala cara a veces, porque me ayudaban a distraer y reírme cuando ya no daba para más en mis actividades. A mis familiares y amigos, a los que siempre han estado ahí conmigo, a los que llegaron y se han vuelto parte importante de mi desarrollo como profesional y personal, y a aquellos que por cosas del destino ya no se encuentran aquí, pero que siempre tengo presente.*

**Danny I. Alkhouri I.**

*Este trabajo se lo dedico a mi abuelo Pedro Arnal, quien fue mi inspiración para estudiar ingeniería civil siempre dando mi mayor esfuerzo, a mi abuela Elba Sol de Arnal quien siempre me apoyó y me deseó lo mejor, así también a mi madre Julieta Arnal por su amor incondicional, su dedicación y paciencia, quien en conjunto con mi padre Néstor Da Costa me dieron la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa Universidad y por último a las futuras generaciones de tesisistas que deseen realizar sus Trabajos Especiales de Grados sobre Ingeniería de Costas.*

**Pedro Da Costa A.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por guiar mis pasos y darme la salud y sabiduría necesaria para llegar hasta este punto de mi carrera profesional.

A mis familiares y amigos, por apoyarme durante todos estos años de esfuerzo y sacrificios ante todas las dificultades.

A nuestro Tutor el Ingeniero Levan Rotinov por guiarnos y proporcionarnos las herramientas necesarias para la realización de este proyecto, por estar siempre atento a los avances o dudas que surgieron a medida que se iba desarrollando el trabajo, por sus consejos sobre el tema y el área profesional, y por su gran apoyo y paciencia cuando no obteníamos buenos resultados y luego las cosas se iban dando mucho mejor.

A nuestros jurados por acceder a ser parte de este proyecto, y aportar sus opiniones, ideas, críticas y correcciones al trabajo a partir de las cuales pudimos realizar un trabajo mejor.

A todas aquellas personas que han estado presentes todo este tiempo en la universidad, profesores, coordinadores, técnicos de laboratorio y personal de limpieza, que han permitido que estos años hayan sido de tanta satisfacción para mi desarrollo como ingeniero y como persona.

**Danny I. Alkhouri I.**

Al Ingeniero Levan Rotinov por darnos el auténtico privilegio de ser nuestro tutor y que gracias a su generoso e invaluable apoyo pudimos completar el presente trabajo.

A nuestros jurados el Ingeniero Rafael Becemberg y el Ingeniero Angelo Marinilli por su apoyo durante la elaboración del tomo.

A nuestros profesores por sus enseñanzas durante la carrera.

A Dios por darnos la fuerza para estudiar con nuestro mayor empeño durante la carrera y por la vida profesional que nos depara.

**Pedro Da Costa A.**

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	xv
SINOPSIS .....	xx
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
I.1 Planteamiento del problema.....	1
I.2 Antecedentes .....	2
I.3 Alcance y Limitaciones.....	3
I.4 Objetivos .....	4
I.4.1 Objetivo General .....	4
I.4.2 Objetivos Específicos .....	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	5
II.1 Ingeniería costa afuera.....	5
II.2 Tuberías submarinas .....	6
II.2.1 Instalación de tuberías submarinas .....	6
II.2.1.1 Tendido mediante carrete .....	8
II.2.1.2 Tendido por sistema de arrastre o remolque .....	9
II.2.1.3 Tendido mediante configuración en S.....	10
II.2.1.4 Tendido mediante configuración en J .....	12
II.2.2 Métodos de análisis de tendido en S .....	13
II.2.2.1 Método de la Viga (Pequeñas Deflexiones) .....	13
II.2.2.2 Método de la Catenaria Natural .....	15
II.2.2.3 Método de los Elementos Finitos .....	16
II.2.3 Acciones actuantes sobre la tubería .....	17
II.2.3.1 Peso Propio.....	17
II.2.3.2 Oleaje marino .....	18
II.2.3.2.1 Teoría de olas.....	19
II.2.3.2.1.1 Teoría de ola de poca amplitud (Airy).....	20

II.2.3.2.1.2 Teoría de olas de Stokes .....	23
II.2.3.2.1.3 Teoría Sinusoidal .....	26
II.2.3.2.1.4 Teoría de Ola Solitaria .....	26
II.2.3.2.1.5 Teoría de la Ola en función de la Corriente ( <i>Stream Function</i> ) .....	26
II.2.3.3 Corrientes marinas.....	27
II.2.3.3.1 Tipos de corrientes marinas .....	27
II.2.3.3.2 Velocidad de corrientes marinas.....	29
II.2.3.4 Viento .....	29
II.2.3.5 Fuerzas hidrodinámicas.....	30
II.3 Características de las tuberías submarinas.....	35
II.3.1 Material .....	35
II.3.2 Diámetro .....	38
II.3.3 Espesor.....	39
II.4 Análisis estructural de la tubería .....	40
II.4.1 Estados límite de Fatiga y Fractura.....	42
II.4.2 Pandeo local .....	43
II.4.2.1 Pandeo local – Colapso del sistema .....	43
II.4.2.2 Pandeo local – Propagación del pandeo.....	44
II.4.2.3 Pandeo local – Criterio de combinación de cargas .....	45
II.4.3 Ovalización .....	46
II.4.4 Desplazamiento.....	47
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....	48
III.1 Tipo de investigación .....	48
III.2 Niveles de exploración .....	48
III.2.1 Estudio del proceso de instalación de tuberías submarinas desde una embarcación de ensamblaje y tendido mediante la configuración de tendido en S.....	48
III.2.2 Desarrollo de guía y hojas de cálculo para el desarrollo del proceso de instalación de tuberías submarinas mediante la configuración de tendido en S.....	48
III.2.3 Modelado del proceso de instalación de la tubería.....	49
III.2.4 Interpretación, análisis de resultados y parametrización del proceso de instalación de la tubería .....	49
III.2.5 Conclusiones y recomendaciones.....	49

III.2.6 Elaboración de tomo .....	49
CAPÍTULO IV. DESARROLLO .....	50
IV.1 Descripción del proyecto .....	50
IV.2 Características y propiedades mecánicas de las tuberías .....	50
IV.2.1 Especificaciones de los materiales .....	50
IV.2.2 Propiedades geométricas .....	51
IV.2.3 Propiedades físicas .....	53
IV.3 Cálculos realizados .....	54
IV.4 Desarrollo de modelos de instalación de tuberías submarinas.....	57
IV.4.1 Diseño de la tubería.....	57
IV.4.1.1 Definición de los materiales y secciones de las tuberías .....	57
IV.4.1.2 Distribución de los ejes estructurales .....	58
IV.4.1.3 Asignación de restricciones y desplazamientos.....	59
IV.4.2 Definición de acciones sobre la tubería.....	61
IV.4.2.1 Acciones gravitacionales (Peso Propio) .....	61
IV.4.2.2 Tensión aplicada por la barcaza.....	63
IV.4.2.3 Acciones ambientales .....	65
IV.4.2.3.1 Oleaje .....	65
IV.4.2.3.1 Corrientes marinas y viento .....	68
IV.4.3 Definición de combinaciones de carga.....	73
CAPÍTULO V. ANÁLISIS, ADAPTACIÓN Y VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA TUBERÍA .....	75
V.1 Análisis de solicitaciones a las cuales está sometida la tubería .....	75
V.1.1 Momento flector o de flexión .....	75
V.1.2 Fuerza Axial .....	76
V.1.3 Presión Hidrodinámica .....	77
V.1.4 Esfuerzo longitudinal o axial.....	78
V.2 Resultados de los modelos .....	80
V.2.1 Resultado de los modelos para condición de instalación de tubería vacía .....	81
V.2.2 Resultado de los modelos para condición de instalación de tubería llena.....	82
V.3 Adaptación de los modelos a las condiciones reales de instalación.....	84

V.3.1 Resultado de modelos adaptados a contextos reales de instalación para la condición de tubería vacía.....	86
V.3.2 Resultado de modelos adaptados a contextos reales de instalación para la condición de tubería llena .....	89
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	92
VI.1 Evaluación de modelos no ajustados a las condiciones reales de instalación.....	92
VI.1.1 Diagramas de momento.....	92
VI.1.2 Esfuerzo longitudinal o axial actuante .....	95
VI.1.3 Factor de diseño.....	97
VI.2 Evaluación y parametrización del proceso de instalación de tuberías submarinas mediante la configuración en S.....	99
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES .....	109
CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES .....	111
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Campo Summerland en Santa Bárbara, California.....	5
Figura 2. Soldadura de tubería submarina. ....	7
Figura 3. Tendido de tubería submarina mediante carrete.....	8
Figura 4. Tendido de tubería submarina mediante sistemas de remolque. ....	10
Figura 5. Tendido de tubería submarina mediante configuración en S. ....	11
Figura 6. Tendido de tubería submarina mediante configuración en J. ....	13
Figura 7. Diagrama de fuerzas de tramo de tubería suspendido. ....	13
Figura 8. Principio de Arquímedes (Empuje del agua).....	17
Figura 9. Características de olas regulares.....	18
Figura 10. Rangos de validación de distintas teorías de olas.....	20
Figura 11. Relación entre período de la ola y longitud de la ola. Teoría Airy. ....	22
Figura 12. Relación entre período de la ola y la celeridad de la ola. Teoría Airy. ....	23
Figura 13. Esquema de los perfiles verticales de velocidad de las corrientes inducidas por la marea, el viento y el oleaje. ....	30
Figura 14. Descomposición de la fuerza hidrodinámica para elementos esbeltos.....	31
Figura 15. Relación entre el Factor de amplificación de estela, y el cociente del Número de Keulegan-Carpenter y el Coeficiente de Arrastre. ....	33
Figura 16. Relación entre el Coeficiente de masa añadida y el Número de Keulegan-Carpenter. ....	34
Figura 17. Tubería de acero recubierta con concreto.....	37
Figura 18. Revestimiento con colchones de concreto.....	38
Figura 19. Pandeo Local en tubería submarina.....	43
Figura 20. Determinación de ángulo de lanzamiento del stinger.....	56
Figura 21. Diseño de la tubería de 16” de diámetro. ....	58
Figura 22. Propiedades de la tubería de 16” de diámetro diseñada. (Unidades indicadas en la Figura 20). ....	58
Figura 23. Distribución de ejes estructurales de la tubería. ....	59
Figura 24. Tubería con restricciones asignadas. ....	59
Figura 25. Deformada de tubería de 16” de diámetro instalada a 100 m de profundidad. ....	61

Figura 26. Asignación de carga distribuida por peso de la tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía. ....	62
Figura 27. Carga distribuida por peso propio aplicada sobre un tramo de la tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía. ....	62
Figura 28. Asignación de tensión requerida sobre la tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 100 m de profundidad. ....	63
Figura 29. Tensión requerida sobre la tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 100 m de profundidad. ....	64
Figura 30. Caso de carga para cargas permanentes. ....	65
Figura 31. Asignación de carga de oleaje sobre la tubería. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad. ....	67
Figura 32. Distribución de velocidades del flujo por efecto del oleaje. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad. ....	68
Figura 33. Asignación de carga de corrientes marinas y viento sobre la tubería. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad. ....	70
Figura 34. Distribución de velocidades del flujo por efecto del oleaje, marea y viento. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad. ....	71
Figura 35. Definición de patrón de carga ambiental. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad. ....	72
Figura 36. Caso de carga para cargas ambientales. ....	73
Figura 37. Asignación de combinación de carga al modelo. ....	74
Figura 38. Diagrama de momento flector. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad. ....	75
Figura 39. Diagrama de momento detallado en segmento de tubería con momento máximo. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad. ....	76
Figura 40. Diagrama de fuerza axial. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad. ....	77
Figura 41. Diagrama de fuerza axial detallado en segmento de tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad. ....	77
Figura 42. Tabla de resultados de presión en función de la localización horizontal de la tubería para 20 m de profundidad. (Presión dada en kgf/m <sup>2</sup> ). ....	78

Figura 43. Diagrama de esfuerzo longitudinal o axial. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad. ....	79
Figura 44. Diagrama de esfuerzo longitudinal o axial detallado en segmento de tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad. ....	79
Figura 45. Diagrama de momento flector. Caso de tubería de 16” de diámetro adaptada a las condiciones reales de instalación en condición vacía, instalada a 100 m de profundidad.....	86
Figura 46. Diagrama de momento flector. Caso de tubería de 16” de diámetro adaptada a las condiciones reales de instalación en condición llena, instalada a 100 m de profundidad. ....	86
Figura 47. Deformada de tubería de 16” de diámetro instalada a 100 m de profundidad. Modelo sin adaptar a las condiciones reales de instalación. (La circunferencia denota el punto de inflexión de la tubería) .....	92
Figura 48. Momento flector en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.....	94
Figura 49. Momento flector en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.....	94
Figura 50. Momento flector en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.....	95
Figura 51. Esfuerzo longitudinal en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales. ....	96
Figura 52. Esfuerzo longitudinal en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales. ....	96
Figura 53. Esfuerzo longitudinal en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales. ....	97
Figura 54. Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.....	98
Figura 55. Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.....	98
Figura 56. Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.....	99
Figura 57. Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	101

Figura 58. Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	101
Figura 59. Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	102
Figura 60. Proyección horizontal del stinger en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	103
Figura 61. Proyección horizontal del stinger en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	103
Figura 62. Proyección horizontal del stinger en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	104
Figura 63. Proyección horizontal del sagbend en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	104
Figura 64. Proyección horizontal del sagbend en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	105
Figura 65. Proyección horizontal del sagbend en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	105
Figura 66. Tensión aplicada por la barcaza en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	106
Figura 67. Tensión aplicada por la barcaza en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	107
Figura 68. Tensión aplicada por la barcaza en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fórmulas aplicables a Teoría de olas Airy y Teoría de olas de Stokes. ....	25
Tabla 2. Valores empíricos de ajuste para determinación de coeficiente de arrastre tangencial..	35
Tabla 3. Propiedades de aceros empleados en tuberías submarinas. ....	36
Tabla 4. Relaciones típicas entre escenarios y estados límites. ....	41
Tabla 5. Factores de combinación de carga. ....	42
Tabla 6. Factor de efecto de condición de carga, $\gamma_c$ .....	42
Tabla 7. Factor de fabricación. ....	44
Tabla 8. Propiedades del acero grado X65 empleado en las tuberías. ....	51
Tabla 9. Propiedades del concreto de revestimiento empleado en las tuberías. ....	51
Tabla 10. Propiedades geométricas de la Tubería de 14” de diámetro. ....	52
Tabla 11. Propiedades geométricas de la Tubería de 16” de diámetro. ....	52
Tabla 12. Propiedades geométricas de la Tubería de 18” de diámetro. ....	53
Tabla 13. Propiedades del agua en función de la temperatura.....	53
Tabla 14. Peso propio Tubería de 14” de diámetro. ....	54
Tabla 15. Peso propio Tubería de 16” de diámetro. ....	54
Tabla 16. Peso propio Tubería de 18” de diámetro. ....	54
Tabla 17. Cálculos para Región Overbend. ....	55
Tabla 18. Cálculos para Región Sagbend. ....	55
Tabla 19. Datos de oleaje en el Mar Caribe.....	66
Tabla 20. Datos sobre corrientes marinas y viento en el Mar Caribe. ....	68
Tabla 21. Cálculo de distribución de velocidades por efecto de marea y viento.....	69
Tabla 22. Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 20 m. ....	81
Tabla 23. Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 40 m. ....	81
Tabla 24. Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 60 m. ....	81
Tabla 25. Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 80 m. ....	81
Tabla 26. Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 100 m. ....	82
Tabla 27. Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 120 m. ....	82
Tabla 28. Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 140 m. ....	82
Tabla 29. Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 160 m. ....	82

Tabla 30. Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 20 m.....	83
Tabla 31. Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 40 m.....	83
Tabla 32. Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 60 m.....	83
Tabla 33. Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 80 m.....	83
Tabla 34. Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 100 m.....	84
Tabla 35. Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 120 m.....	84
Tabla 36. Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 140 m.....	84
Tabla 37. Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 160 m.....	84
Tabla 38. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 20 m. ....	87
Tabla 39. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 40 m. ....	87
Tabla 40. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 60 m. ....	87
Tabla 41. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 80 m. ....	87
Tabla 42. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 100 m. ....	88
Tabla 43. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 120 m. ....	88
Tabla 44. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 140 m. ....	88
Tabla 45. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 160 m. ....	88
Tabla 46. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 20 m. ....	89
Tabla 47. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 40 m. ....	89
Tabla 48. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 60 m. ....	89

Tabla 49. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 80 m. ....	90
Tabla 50. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 100 m. ....	90
Tabla 51. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 120 m. ....	90
Tabla 52. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 140 m. ....	90
Tabla 53. Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 160 m. ....	91

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

#### Normas

- API American Petroleum Institute
- COVENIN Comisión Venezolana de Normas Industriales
- DNV Det Norske Veritas

#### Términos Abreviados

- ALS Estado Límite Accidental
- CSF Factor de mejora de rigidez de concreto
- DC Desplazamientos controlados
- DF Factor de diseño para radio del *Stinger*
- FLS Estado Límite de Fatiga
- LC Cargas Controladas
- SLS Estado Límite de Servicio
- SMTS Esfuerzo de tensión último mínimo especificado
- SMYS Esfuerzo de cedencia mínimo especificado
- ULS Estado Límite de Agotamiento

### SÍMBOLOS

#### Caracteres Latinos

- $A_t$  Profundidad de la ola
- $c$  Celeridad de la ola
- $C_A$  Coeficiente de masa añadida
- $C_D$  Coeficiente de arrastre
- $C_d$  Coeficiente de amortiguación hidráulico
- $C_{DS}$  Coeficiente de arrastre modificado
- $C_{DT}$  Coeficiente de arrastre tangencial
- $d$  Profundidad de Agua

- $d_o$  Profundidad en que se pierde la influencia del viento en la corriente (50m)
- $D_i$  Diámetro interno de la tubería
- $D_{max}$  Mayor medida del diámetro
- $D_{min}$  Menor medida del diámetro
- $D_o$  Diámetro externo de la tubería
- $E$  Módulo de Young de acero
- $E_c$  Módulo de Young de concreto
- $E_{eq}$  Módulo de Young equivalente para sección mixta
- $f$  Factor de fricción de Darcy
- $f'_c$  Resistencia a compresión del concreto
- $f_N$  Fuerza hidrodinámica perpendicular a la tubería
- $f_T$  Fuerza hidrodinámica tangencial a la tubería
- $f_u$  Resistencia a la tracción del acero
- $f_y$  Tensión de cedencia del acero
- $g$  Aceleración de la gravedad
- $H_{st}$  Profundidad requerida del lanzamiento del agujón
- $I$  Primer Momento de Inercia de la sección de acero
- $I_c$  Primer Momento de Inercia de la sección de concreto
- $k_c$  Constante empírica de rigidez del concreto
- $K_c$  Número de Keulegan-Carpenter
- $L_a$  Carga accidental
- $L_{BA}$  Longitud del rigidizador de pandeo
- $L_e$  Carga ambiental
- $L_f$  Carga funcional
- $L_i$  Carga de interferencia
- $L_{sd}$  Carga de diseño
- $m_a$  Masa añadida por unidad de longitud
- $M_p$  Momento plástico resistente

- $M_{sd}$  Momento de diseño
- $O_0$  Ovalización
- $p_c$  Presión característica de colapso
- $p_e$  Presión externa
- $p_{el}$  Presión elástica de colapso
- $p_i$  Presión interna
- $p_p$  Presión plástica de colapso
- $q$  Carga distribuida tramo de tubería suspendido
- $Q$  Caudal de flujo dentro de la tubería
- $\dot{r}$  Velocidad de la estructura perpendicular a su eje
- $\ddot{r}$  Aceleración de la estructura perpendicular a su eje
- $R$  Radio mínimo del *Stinger* para el S-Lay
- $Re$  Número de Reynolds
- $S_p$  Fuerza Axial resistente
- $S_{sd}$  Fuerza axial de diseño
- $t$  Espesor nominal de la tubería
- $t_1, t_2$  Espesor de la tubería
- $t_c$  Espesor del revestimiento de concreto
- $T$  Tensión requerida en el punto de despegue de la tubería
- $T_o$  Componente horizontal de la tensión aplicada
- $Ur$  Número Ursell
- $v$  Velocidad del flujo
- $v_r$  Velocidad relativa de la estructura respecto al flujo
- $\dot{v}$  Aceleración del flujo
- $V_c$  Velocidad de la corriente
- $V_m$  Máxima velocidad orbital de la partícula
- $W_d$  Peso seco de la tubería
- $W_{dc}$  Peso seco del revestimiento de concreto

- $W_{disp}$       Peso del volumen de agua desplazado
- $W_{pc}$       Peso del contenido de la tubería
- $W_s$       Peso sumergido de la tubería
- $x$       Valor de la abscisa en la ecuación de la catenaria
- $X$       Ubicación horizontal del rodillo
- $y$       Valor de la ordenada en la ecuación de la catenaria
- $Y$       Ubicación Vertical del rodillo
- $z$       Profundidad del punto evaluado

### Caracteres Griegos

- $\alpha$       Ángulo de inclinación del miembro respecto a la velocidad de la corriente
- $\alpha c$       Relación de flujo de esfuerzo característico
- $\alpha_{fab}$       Factor de fabricación
- $\gamma_a$       Factor de carga accidental
- $\gamma_e$       Factor de carga ambiental
- $\gamma_f$       Factor de carga funcional
- $\gamma_i$       Factor de carga de interferencia
- $\gamma_m$       Factor de resistencia del material
- $\gamma_p$       Peso específico del material de la tubería
- $\gamma_{pc}$       Peso específico del contenido de la tubería durante el tendido
- $\gamma_{SC, LB}$       Factor de resistencia de clase de seguridad para estado límite
- $\gamma_w$       Peso específico del Agua
- $\Delta$       Rugosidad relativa
- $\Delta x$       Desplazamiento horizontal de los rodillos del *Stinger*
- $\Delta y$       Desplazamiento vertical de los rodillos del *Stinger*
- $\varepsilon$       Máxima deformación al doblarse la tubería
- $\eta$       Elevación de superficie
- $\lambda$       Longitud de la ola
- $\nu$       Viscosidad cinemática del fluido

- $\rho$  Densidad del fluido
- $\sigma$  Máxima tensión al doblarse la tubería
- $\sigma_l$  Esfuerzo axial actuante en la tubería.
- $\sigma_t$  Esfuerzo de trabajo del acero
- $T$  Período de la ola
- $\omega$  Frecuencia angular de la ola

## SINOPSIS

La instalación de tuberías submarinas desde una embarcación de ensamblaje y tendido mediante la configuración de tendido en S es un proceso empleado comúnmente para aguas someras, aunque también es utilizado en aguas profundas, y debe su nombre a la forma en S que adquiere la tubería durante su instalación. Este método de instalación de tuberías submarinas ha sido empleado en Venezuela en distintos proyectos, bien sea para la conducción de agua, gas o petróleo; pero a pesar de ello no existe normativa específica para el diseño de tuberías submarinas, por lo que usualmente se desconoce su metodología de cálculo y las consideraciones a ser tomadas en cuenta durante el proceso de instalación de estas.

En el desarrollo de esta investigación se realiza un exhaustivo estudio de las normas internacionales enfocadas en el proceso de instalación de tuberías submarinas, así como de bibliografía especializada en dicho proceso, para de esta forma tener sustento teórico a partir de los conceptos allí expresados. Este aprendizaje teórico es aplicado al diseño y simulación del proceso de instalación de tuberías submarinas de diámetros entre 14" y 18" para un rango entre 20 m y 160 m de profundidad, bajo dos escenarios, la instalación con la tubería vacía y la instalación con la tubería llena de agua. Este diseño y simulación se lleva a cabo con la ayuda del programa SAP2000 V.20 y hojas de cálculo desarrolladas por los autores, de tal forma que se pueda comprobar la resistencia de las tuberías ante las solicitaciones presentes durante el proceso de instalación.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se presenta la parametrización de este proceso de instalación, bajo las condiciones establecidas en el desarrollo de esta investigación, a partir de la cual se pueden identificar las características de la instalación y la viabilidad de emplear los distintos diámetros de tubería a partir de la relación entre la capacidad de las tuberías y las solicitaciones presentes durante la instalación. Además, se dan conclusiones y recomendaciones acerca de este proceso de instalación, a partir de las cuales futuras investigaciones puedan basarse.

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## I.1 Planteamiento del problema

Actualmente en Venezuela y en el mundo, la creciente demanda de energía, basada principalmente en los hidrocarburos, ha generado que estos se hayan ido agotando y por ende sea más complicada su explotación, motivo por el cual se ha dirigido su exploración y consiguiente explotación a sitios tales como mares y océanos, es decir costa afuera. Estas actividades costa afuera incluyen la exploración, desarrollo, explotación y conducción de los hidrocarburos, realizando este último proceso de conducción mediante el empleo de barcasas o de tuberías submarinas (gasoductos u oleoductos).

La conducción de los hidrocarburos en la actualidad se realiza en gran parte por medio de tuberías submarinas, dadas las ventajas económicas y la facilidad de ejecución en comparación al transporte de los hidrocarburos por medio de embarcaciones. Para poder realizar la conducción es requerida la instalación de las tuberías submarinas, proceso que se puede realizar por distintos métodos dependiendo de las condiciones de instalación, en el cual se somete a la tubería a gran cantidad de solicitaciones que deben ser analizadas para garantizar el correcto funcionamiento de esta durante dicho proceso.

En el desarrollo de esta investigación se realiza un estudio de las condiciones de instalación de tuberías submarinas mediante la configuración de tendido en S, siendo este uno de los métodos más viables a emplear en el país dadas las profundidades de áreas de exploración de hidrocarburos costa afuera, de tal forma que se puedan parametrizar las condiciones de instalación de estas tuberías submarinas, en vista de que aunque en Venezuela se realizan proyectos costa afuera desde la década de 1920, no se posee una normativa especificada para la instalación de tuberías submarinas y todos los procesos, cálculos y análisis que deben realizarse.

Ante la necesidad de conocer la metodología de cálculo de este proceso de instalación y los análisis pertinentes de las solicitaciones a las cuales se estará sometiendo la tubería durante dicho proceso, se plantea el presente estudio, el cual se realiza de tal forma que se permita a los ingenieros estructurales enfocados en la instalación de tuberías submarinas tener parámetros de diseño adecuados que sirvan para la simulación y análisis de las condiciones de instalación de estas.

## I.2 Antecedentes

Como antecedentes a este trabajo especial de grado, se pueden mencionar los siguientes trabajos:

Van Dillewijn J, Velásquez R. (2011) “*Diseño de Tramos Libres de Tuberías Submarinas Sometidas a Fuerzas Hidrodinámicas*”. Trabajo especial de grado. Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela. Tutor: José A. Noriega. El objetivo principal de este trabajo fue interpretar y desarrollar la metodología, el diseño y verificación, con el uso de programas estructurales, de tuberías en tramos libres capaces de resistir las fuerzas hidrodinámicas, siendo de utilidad para el desarrollo del presente trabajo ya que las teorías de olas consideradas para la determinación de la influencia de las cargas por oleaje, y las condiciones de corriente tomadas en cuenta, son aplicadas sobre la tubería de igual forma durante el proceso de instalación de la misma.

Berra F, Sánchez V. (2014) “*Análisis de Fatiga en Estructuras Fijas Costa Afuera Tipo Jacket Causada por Oleaje Marino Mediante el Programa SACS Versión 5.3*”. Trabajo especial de grado. Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela. Tutor: Manuel J. Ramírez. El objetivo principal de este trabajo fue analizar el fenómeno de fatiga causado por el oleaje marino sobre los miembros de estructuras fijas costa afuera tipo jacket, siendo de utilidad para el desarrollo del presente trabajo ya que por tratarse de estructuras costa afuera las solicitaciones a las cuales se están sometiendo estas estructuras, como las cargas ambientales y las accidentales, deben ser consideradas en el proceso de instalación de tuberías submarinas desde una embarcación de ensamblaje y tendido.

Jensen G. (2010) “*Offshore Pipelaying Dynamics*”. Trabajo especial de doctorado. Norwegian University of Science and Technology. Noruega. El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar los modelos matemáticos de la instalación de tuberías submarinas para el control de la dinámica de tuberías elásticas haciendo uso de elementos finitos no lineales, motivo por el cual es de gran utilidad para el desarrollo del presente trabajo, ya que posee los fundamentos teóricos para realizar los modelos matemáticos de la instalación de tuberías submarinas para los distintos métodos o configuraciones de instalación, como lo son remolque, carrete, configuración en J y configuración en S, siendo este último de especial interés para el desarrollo del trabajo.

### **I.3 Alcance y Limitaciones**

El presente trabajo especial de grado está dirigido a parametrizar la instalación de una tubería submarina desde una embarcación de ensamblaje y tendido mediante la configuración de tendido en S, mediante la utilización de modelos matemáticos en los cuales se puedan simular las condiciones en las cuales se encuentra la tubería al momento de ser instalada. Para esta parametrización se realiza la comparación de solicitaciones entre el proceso de instalación con la tubería vacía y el proceso con la tubería llena, de tal forma que, al evaluar distintos diámetros de tuberías, en un rango de profundidades entre 20 m y 160 m, se pueda establecer la condición más desfavorable para la tubería desde el punto de vista de los efectos que actúan sobre ella, en comparación con la resistencia de la misma.

Este trabajo especial de grado se ve limitado por la falta de una normativa nacional que contemple la instalación de tuberías submarinas y los efectos actuantes sobre las mismas considerando las condiciones de instalación en territorio nacional. Sin embargo, sí existen normas internacionales, como la Det Norske Veritas. (2017). DNVGL-ST-F101 y la Det Norske Veritas. (2010). DNV-RP-C205, en las cuales se pueden visualizar normativas para instalación de tuberías submarinas, condiciones y cargas ambientales, además de las solicitaciones a evaluar sobre la tubería de tal modo que se pueda determinar si esta es capaz de resistirlas o no.

Para el análisis de la instalación de la tubería, se realizan modelos idealizados de dicho proceso haciendo uso del programa SAP2000 V.20, el cual no está diseñado específicamente para la simulación de condiciones costa afuera, como sí lo están programas como OFFPIPE, Orcaflex o Flexcom, por lo que los resultados obtenidos están limitados a la capacidad del programa SAP2000 V.20.

## **I.4 Objetivos**

### **I.4.1 Objetivo General**

Parametrizar el proceso de instalación de tuberías submarinas desde una embarcación de ensamblaje y tendido mediante la configuración en S.

### **I.4.2 Objetivos Específicos**

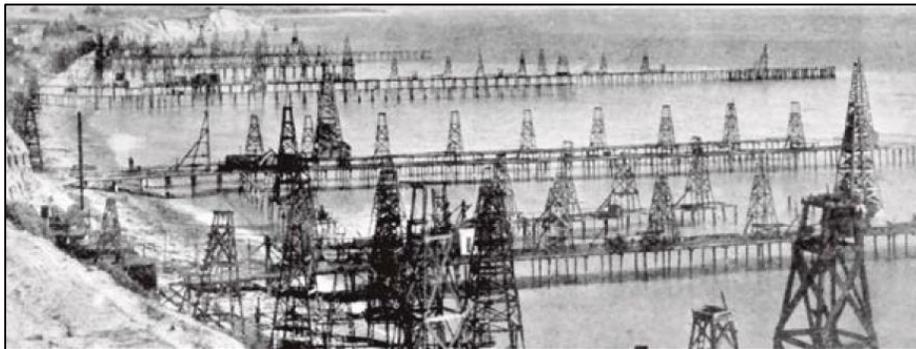
- Modelar la instalación de tuberías submarinas con diámetros entre 14” y 18” mediante la configuración de tendido en S para el rango de profundidades de 20 a 160 m.
- Determinar las solicitaciones a las cuales se encuentra sometida la tubería durante el proceso de instalación mediante la configuración de tendido en S, para los escenarios en que esta se encuentre vacía o llena.
- Analizar las solicitaciones a las cuales se encuentra sometida la tubería para las condiciones de instalación definidas.
- Establecer los criterios de parametrización para la instalación de tuberías submarinas mediante la configuración de tendido en S a partir de los resultados obtenidos.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### II.1 Ingeniería costa afuera

Según Chakrabarti (2005), la ingeniería costa afuera se dedica al análisis, diseño, construcción, instalación, operación y mantenimiento de estructuras marinas e instalaciones fuera de las costas, es decir en el mar, generalmente para la producción y transferencia de electricidad, petróleo, gas y otros recursos. Esta estudia diversos factores que dependen del ambiente, cargas accidentales, condiciones tectónicas, entre otros, a los cuales las estructuras estarán sometidas durante su instalación y a lo largo de su vida útil.

Este concepto de ingeniería costa afuera remonta su origen a 1891, cuando fue perforado el primer pozo desde una plataforma construida sobre pilotes en las aguas del Gran Lago St. Marys en Ohio (EE.UU.). Posteriormente, en 1896, se perforó el primer pozo de petróleo en agua salada en el campo Summerland en Santa Bárbara, California, trabajo que se llevó a cabo a través de un muelle conectado desde tierra hacia el canal, como se puede apreciar en la Figura 1.



**Figura 1.** Campo Summerland en Santa Bárbara, California.

**Fuente:** Costa Afuera, PDVSA.

En Venezuela, en la década de 1920 se iniciaron las actividades de perforación en el lago de Maracaibo, las cuales fueron realizadas desde plataformas de cemento, dando paso al desarrollo de la ingeniería costa afuera en el país. Mientras, en otras partes del mundo se desarrollaron tecnologías para perforar, utilizando islas artificiales, barcasas de acero y barcos perforadores. Para el año 1946, Magnolia Petroleum (hoy en día ExxonMobil) perforó a 18 millas de la costa, construyendo una de las primeras plataformas en Louisiana (Golfo de México), lo que dio pie al avance de este campo de la ingeniería costa afuera a como se conoce hoy en día.

## **II.2 Tuberías submarinas**

Las tuberías submarinas, también conocidas como tuberías marinas o costa afuera, son tuberías que se colocan en el fondo del mar o debajo de este dentro de una zanja. En algunos casos las tuberías se encuentran principalmente en tierra, pero en algunos lugares es necesario cruzar extensiones de agua, como mares pequeños, estrechos o ríos, lo que conlleva a realizar la instalación de este tramo de tubería submarina.

Las tuberías submarinas se utilizan principalmente para transportar petróleo (denominando a la tubería que se encarga de su transporte como oleoducto) o gas (denominando a la tubería que se encarga de su transporte como gasoducto), pero en la actualidad el transporte de agua a través de acueductos y de cableado eléctrico por medio de poliductos, están siendo ampliamente empleados. Dada la importancia de estas, por el contenido que transportan, los proyectos de construcción de ductos de gran tamaño deben tener en cuenta gran cantidad de factores, como:

- Selección de la ruta: aspecto fundamental para los proyectos de tuberías submarinas, ya que a partir de esta ruta se definirán las condiciones en las cuales se instalará y permanecerá en funcionamiento la tubería. Para la selección de la ruta se deben tener en consideración aspectos políticos, de profundidad del fondo marino, condiciones ambientales, presencia de plataformas existentes, presencia de tubería o cables instalados, condiciones del fondo marino y actividades que se realizan en la zona de instalación de la tubería (a fin de evitar daños en la tubería por anclas, objetos caídos, pesca de arrastre, campos de minas, etc).
- Factores físicos: son aquellas condiciones del entorno en el cual se realiza la construcción de la tubería submarina que la afectan directamente desde su proceso de instalación hasta su funcionamiento, entre los cuales se pueden destacar el estado del lecho marino (liso o irregular), movilidad del fondo marino, deslizamientos de tierra submarinos, corrientes marinas, oleaje, problemas relacionados con presencia de hielo y congelamiento.

### **II.2.1 Instalación de tuberías submarinas**

La instalación de tuberías submarinas se puede llevar a cabo por medio de distintas técnicas, la cual es seleccionada a partir de las condiciones en las cuales este proceso vaya a ser llevado a cabo. Este proceso de instalación se lleva a cabo en dos fases, la primera de estas consiste

en el ensamblaje de la tubería a partir de la soldadura de segmentos de tubería de tal forma que se obtenga la longitud de tubería requerida o se haya alcanzado la máxima extensión de la gabarra de instalación, ya que este proceso puede ser realizado en la propia gabarra, lo que torna la construcción más versátil, flexible y autónoma puesto que ya se encuentra en el lugar correspondiente para la instalación. La segunda fase se lleva a cabo una vez se ha ensamblado la tubería, consistiendo esta en la instalación de la tubería en la ruta definida, proceso que puede realizarse por medio de distintos métodos, como lo son el tendido mediante carrete, el sistema de arrastre o remolque, tendido mediante configuración en J, y mediante la configuración en S.

Los tramos individuales de tubería son ensamblados mediante soldaduras a tope perimetrales bajo estrictos requerimientos especificados en cuanto a consumibles durante la soldadura, el proceso en sí, la habilidad del soldador y, por último, la inspección y pruebas con la finalidad de asegurar la óptima calidad de la tubería, como se puede apreciar en la Figura 2. La soldadura puede realizarse tanto en la gabarra, referida como soldadura marina, o realizada en tierra, siendo necesaria en ciertos métodos de instalación, donde la fabricación en tierra conlleva la protección de las juntas y la inclusión de ánodos de sacrificio para la protección de la tubería.

Luego de unir las juntas, el área soldada y el área del tubo sin recubrimiento adyacente deben ser protegidas, usualmente se utiliza envolturas de cintas especiales o mangas termo-retráctiles; en caso de que las áreas adyacentes a la junta posean protección de concreto o algún tipo de protección aislante se deberá aplicar un material que garantice la continuidad de la tubería en cuanto a sus características mecánicas.

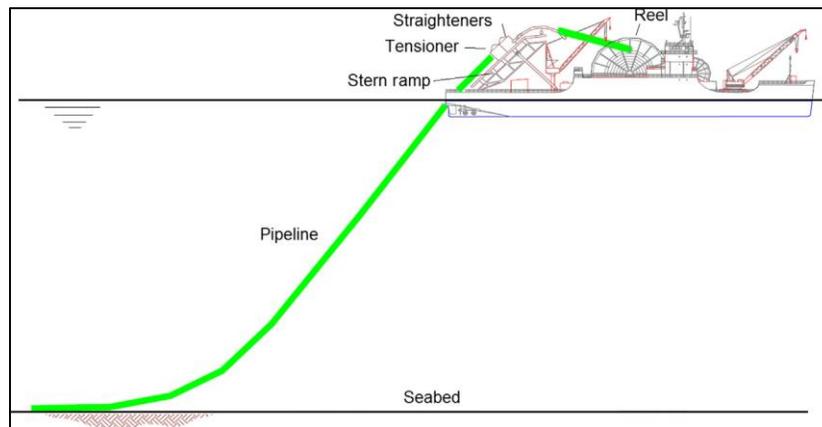


**Figura 2.** Soldadura de tubería submarina.

**Fuente:** Design and Installation of Marine Pipelines, Braestrup, M.

### II.2.1.1 Tendido mediante carrete

El método de instalación de tuberías submarinas mediante el sistema de enderezamiento de carrete es el más reciente, surgiendo a finales del siglo XX, en el cual la tubería se ensambla en tierra y se coloca en la bobina en un tambor grande, típicamente de unos 20 metros (66 pies) de diámetro x 6 metros (20 pies) de espesor, montado a bordo de una embarcación especialmente diseñada, en la cual se dispone del tambor enrollado, el enderezador de tuberías y un buque de colocación; y una vez cargada esta se dirige a la ubicación definida para realizar el tendido de la tubería, como se ilustra en la Figura 3.



**Figura 3.** Tendido de tubería submarina mediante carrete.

**Fuente:** Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation. Bay, Q.

Este método presenta grandes ventajas, puesto que al realizar el ensamblaje de la tubería en tierra se independiza del clima o el estado del mar, además de que los costos son inferiores con respecto a aquellos métodos en los cuales se deben realizar estas operaciones en una embarcación. Otra ventaja que presenta este proceso para instalar tuberías submarinas es que mientras una línea de tubería se está colocando en el mar, otra línea de tubería se puede enviar desde la costa, acortando de esta manera el tiempo del proceso de instalación de la misma.

Sin embargo, el sistema de tendido de carrete solo puede manejar tuberías de diámetros relativamente pequeños, hasta aproximadamente 400 mm (16”), además de tener que tomar en consideración que el tipo de acero que forma las tuberías debe ser capaz de absorber la cantidad necesaria de deformación plástica, ya que se dobla a la curvatura adecuada (mediante un tubo en J espiral) cuando se enrolla alrededor del tambor y se endereza (con una plancha) durante las operaciones de disposición en el sitio de instalación.

### **II.2.1.2 Tendido por sistema de arrastre o remolque**

En el método de instalación de tuberías submarinas mediante el sistema arrastre o remolque la tubería se ensambla en tierra y luego, como su nombre lo indica, se remolca a la ubicación definida para la tubería. El ensamblaje de la tubería se realiza de forma paralela o perpendicular a la costa; en el primer caso la línea completa de la tubería se puede construir antes de remolcar e instalar, puesto que se dispondría de suficiente espacio como para disponer la tubería; en el segundo caso se tendría que realizar el ensamblaje de la tubería a medida que esta se remolca, puesto que no se dispondría de suficiente espacio para ensamblar tales longitudes de tubería como las que se manejan en el caso de disposición paralela a la costa.

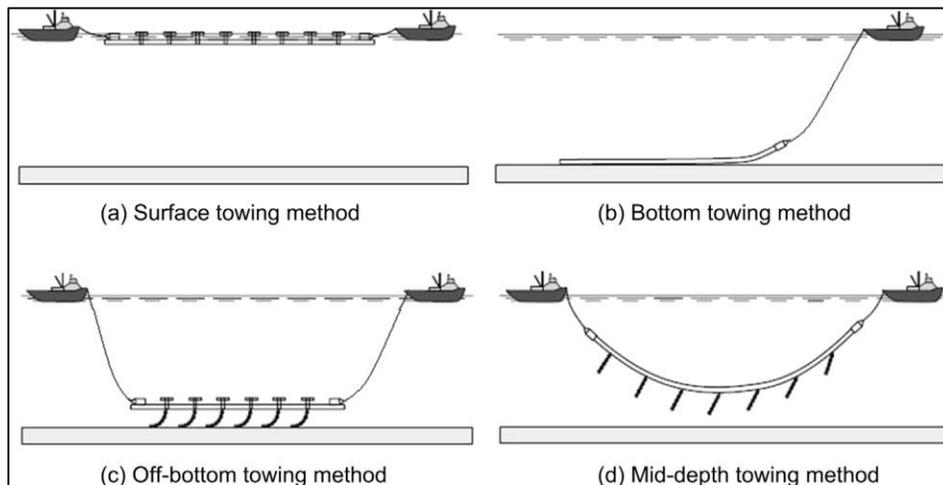
Una ventaja significativa de este método de instalación es que las pruebas previas y la inspección de la tubería se realizan en tierra, y no en el mar, además de que permite manejar cualquier tamaño y tipo de material de tubería que se desee instalar.

En cuanto a los procedimientos de remolque, se pueden emplear varias configuraciones, las cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a. Remolque superficial: en esta configuración, se utilizan boyas para ajustar la flotabilidad de la tubería haciéndola flotar en la superficie del agua durante el arrastre, luego mediante el empleo de remolques se mueve hasta el sitio de colocación, para posteriormente hundirla, como se puede apreciar en la primera imagen de la Figura 4. Esta configuración se encuentra limitada a regiones de aguas calmas, la restringe el tamaño y peso de la tubería, y es vulnerable a las corrientes marinas laterales.
- b. Remolque de profundidad media o controlada: en esta configuración, como se representa en la cuarta imagen de la Figura 4, la tubería no es flotante, ya sea porque es pesada o debido a que esta se encuentra cargada, y se suspende en una catenaria entre dos buques de remolque. La forma de dicha catenaria es un equilibrio entre el peso de la tubería, la tensión aplicada por los buques, la elevación hidrodinámica de la tubería y la carga aplicada sobre esta.
- c. Remolque a poca altura sobre el fondo: esta configuración es similar al remolque de profundidad media, pero en este caso se emplean cadenas y boyas para mantener la tubería

a cierta altura del lecho marino (una distancia entre 1 y 2 m), tal como se ilustra en la tercera imagen de la Figura 4, para posteriormente transportarla mediante remolques; de tal forma que los efectos del ambiente se ven minimizados.

- d. Remolque inferior o de fondo: en este caso, como se puede ver en la segunda imagen de la Figura 4, la tubería es arrastrada por el lecho marino, por lo cual no se ve afectada por las olas y las corrientes marinas, aunque en caso de que las condiciones ambientales se vuelvan adversas para el buque remolcador, la tubería puede simplemente abandonarse y recuperarse posteriormente. Los inconvenientes presentados con este tipo de sistema son la necesidad de proveer a la tubería con un revestimiento resistente a la abrasión, interacción con otras tuberías submarinas y posibles obstrucciones (arrecifes, cantos rodados, irregularidades en el fondo marino, etc).



**Figura 4.** Tendido de tubería submarina mediante sistemas de remolque.

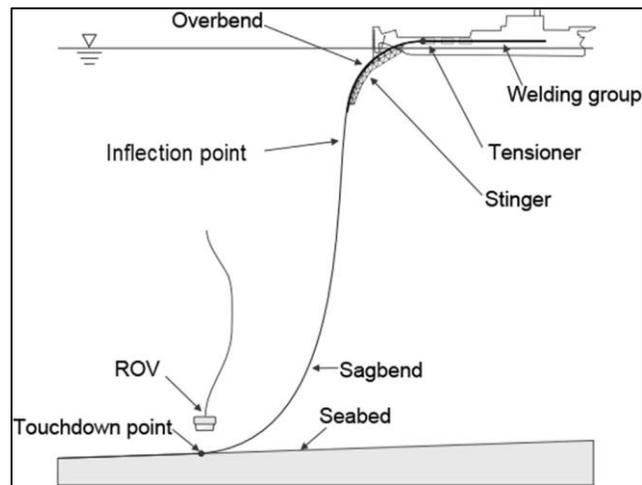
**Fuente:** Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation. Bay, Q.

### II.2.1.3 Tendido mediante configuración en S

El método de tendido de tuberías empleando la configuración de tendido en S es comúnmente empleado para aguas someras, aunque también es utilizado en aguas profundas, y debe su nombre a la forma en S que toma la tubería durante su instalación, realizando el ensamblaje de la tubería en el sitio donde se desea disponer a bordo de un buque que cuenta con todo el equipo necesario, como lo son los transportadores de manipulación de tuberías, estaciones de soldadura,

equipos de rayos X, módulos de revestimientos de juntas, entre otros elementos, para realizar este ensamblaje de los segmentos de tuberías.

Durante este proceso la tubería abandona el buque en popa o proa desde una estructura de soporte llamada aguijón o *stinger*, que conforma una estructura circular tipo armadura equipada con una serie de rodillos que funcionan como apoyos que guían el movimiento hacia abajo de la tubería además de controlar la deflexión de esta en la región conocida como *overbend*, es decir, la zona donde la tubería posee una curvatura convexa, entre el final de la estructura de soporte y el punto de inflexión. Posterior a este punto se habla de la región *sagbend*, la cual va desde punto de inflexión hasta el punto de contacto con el lecho marino, como se puede ver descrito en la Figura 5.



**Figura 5.** Tendido de tubería submarina mediante configuración en S.

**Fuente:** Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation. Bay, Q.

La curvatura de la tubería es controlada principalmente por la interacción entre la tensión aplicada desde la embarcación (a través de tensionadores) y el peso sumergido de la tubería, y en segunda instancia por la rigidez flexional de esta, propiedad que dependerá de las características propias de la tubería (material, diámetro, espesor, revestimiento, entre otros). A medida que la tensión aplicada aumenta, la curvatura en la región *sagbend* disminuye, generando de esta forma que este sector se alargue y se redondee, además que el punto de contacto con el fondo marino se aleje de la embarcación.

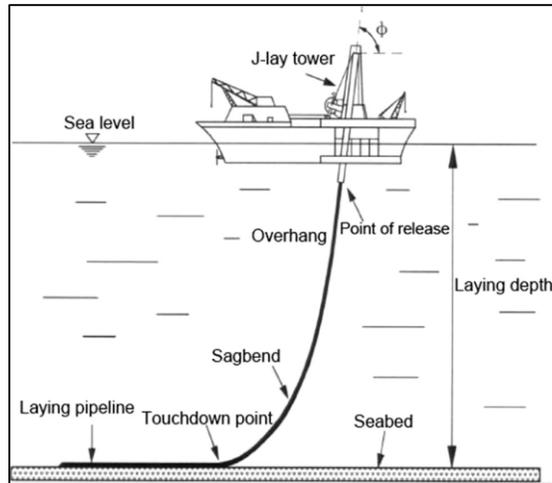
El diseño del procedimiento de tendido con configuración en S tiene como objetivo evitar el pandeo en el tramo libre de la tubería, mantener a la tubería en el rango elástico, controlar los esfuerzos y momentos generados por las acciones que inciden en la tubería. Este enfoque de ensamblaje de tuberías en el sitio es conocido por su versatilidad y naturaleza autónoma (a pesar de los altos costos asociados con el despliegue del buque), además de ser eficiente y de que se requiera relativamente poco soporte externo, pero puede tener que lidiar con estados marítimos severos, que afectan negativamente las operaciones.

#### **II.2.1.4 Tendido mediante configuración en J**

En condiciones de aguas profundas, el sistema de tendido de tuberías por medio de la configuración en S puede no ser apropiado, debido a que dada la configuración de la catenaria de la tubería desde el lecho marino el agujijón o *stinger* es casi vertical. Para evitar una flexión brusca al final de la tubería y de esta forma mitigar una flexión excesiva, la tensión aplicada sobre la tubería debería ser alta, lo que traería como consecuencia que se interfiriera con el posicionamiento de la embarcación, además de existir la posibilidad de que los tensionadores dañen la tubería.

Ante estas circunstancias se podría utilizar un agujijón particularmente largo, pero esto generaría otros problemas ya que esta estructura se vería negativamente afectada por los vientos y las corrientes marinas, por lo que la opción más viable es emplear la metodología de tendido mediante configuración en J, siendo este el más adecuado para entornos de aguas profundas (aguas mayores a 40 m, ya que a menor profundidad este método no es viable) debido a que la tubería deja el buque a través de una rampa o torre casi vertical (inclinada entre  $75^\circ$  y  $90^\circ$  con respecto a la horizontal), tal y como se presenta en la Figura 6, equipada con tensionadores y estaciones de trabajo, con la torre se elimina la región del *overbend* que se posee con la configuración en S, de modo que la tensión aplicada puede reducirse para controlar la curvatura y la tubería se encontraría menos expuesta a la acción de olas cuando ingrese al agua.

El nombre de este método se debe a la forma que adopta la tubería durante su instalación, proceso en el cual los tramos de tubería son unidos mediante soldadura en estaciones verticales o casi verticales de soldado, en las cuales a medida que se va realizando el ensamblaje la tubería es liberada hacia el lecho marino; motivo por el cual este proceso de instalación es inherentemente más lento que el proceso de tendido empleando la configuración en S, y, por lo tanto, más costoso.



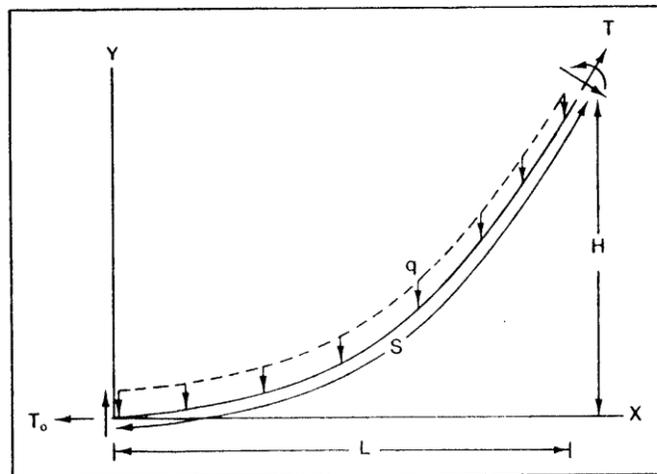
**Figura 6.** Tendido de tubería submarina mediante configuración en J.

**Fuente:** Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation. Bay, Q.

## II.2.2 Métodos de análisis de tendido en S

### II.2.2.1 Método de la Viga (Pequeñas Deflexiones)

Según este método, el tramo suspendido de la tubería en la curvatura se modela como un segmento de viga como se muestra en la Figura 7, asumiendo que las deflexiones son pequeñas:



**Figura 7.** Diagrama de fuerzas de tramo de tubería suspendido.

**Fuente:** Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods. Mousselli, A.

$$\frac{dy}{dx} \ll 1$$

La ecuación de flexión gobernante es:

$$-q = EI \frac{d^4 y}{dx^4} - T_0 \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (\text{Ec - 1})$$

Considerando las siguientes condiciones de borde:

$$y(0) = 0 \quad (\text{Ec - 2})$$

$$\frac{dy}{dx}(0) = \theta \text{ (Pendiente del lecho marino)} \quad (\text{Ec - 3})$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2}(0) = 0 \quad (\text{Ec - 4})$$

$$y(L) = H \quad (\text{Ec - 5})$$

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4}(L) = M \text{ (M = 0 en el punto de inflexión)} \quad (\text{Ec - 6})$$

Teniendo entonces que:

$$T = T_0 + q H \quad (\text{Ec - 7})$$

Donde:

$$H = d - H_{st} \quad (\text{Ec - 8})$$

Esta teoría es aplicable únicamente para deformaciones pequeñas y en aguas de poca profundidad, permitiendo así que la curvatura generada en la región *sagbend* sea controlada por la tensión aplicada, con la finalidad de evitar excesiva flexión, pandeo local y posible colapso de la tubería. Esta tensión requerida posee dos componentes, uno vertical, constituido por la carga vertical que esté actuando sobre la tubería, es decir, su peso sumergido, y uno horizontal que se determina en función del radio de curvatura en la región *overbend*, determinado a partir del máximo esfuerzo de flexión longitudinal aplicable sobre la tubería:

$$\sigma = \frac{E D_o}{2R} \quad (\text{Ec - 9})$$

Donde R se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$R = \frac{E D_o}{2 SMYS DF} \quad (\text{Ec - 10})$$

Se realiza esto asumiendo que la tubería tendrá un radio de flexión uniforme a lo largo de los apoyos del *stinger*, lo que realmente no sucede, dado que en realidad el esfuerzo crece en los apoyos y decrece entre los apoyos.

Teniendo entonces que a partir del radio del agujón o *stinger*, el componente horizontal de la tensión requerida se determina a partir de:

$$T_o = \frac{D_o q}{2 DF \frac{SMYS}{E}} \quad (\text{Ec - 11})$$

### II.2.2.2 Método de la Catenaria Natural

La teoría de la catenaria natural se puede utilizar para describir la configuración del tramo de tubería lejos de los dos extremos de la tubería, es decir, lejos del punto de despegue en el lecho marino y el punto superior de la tubería cerca del *stinger* de la barcaza. Este método es aplicable cuando la rigidez de la tubería es muy pequeña, y las condiciones de contorno en el tramo de la tubería no están satisfechas, puesto que la ecuación de la catenaria natural es la solución no lineal clásica de la curva de deflexión estática para una cuerda cargada por su propio peso. Una cuerda, por definición, no tiene rigidez a la flexión, solo rigidez geométrica; sin embargo, este método es una buena aproximación de la curvatura que posee una tubería con rigidez, cuando la tensión axial domina la rigidez a la flexión.

Para ilustrar el método, en la Ecuación Ec-1 se considera la rigidez de la tubería como cero, es decir,  $EI = 0$ , y mediante una solución no lineal (las ecuaciones empleadas no son de primer grado), se obtiene la siguiente ecuación:

$$q = T_o \sec^2(\theta) \frac{d\theta}{dS} \quad (\text{Ec - 12})$$

Teniendo esto como solución:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{q S}{T_o}\right) + C \quad (\text{Ec - 13})$$

Donde C es una constante cuyo valor es igual a cero en el caso en que la pendiente de la tubería en el fondo marino se considere nula, lo cual se asume de esta manera en la familia de ecuaciones de la catenaria natural y  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la fuerza aplicada respecto a la horizontal.

La longitud del tramo de tubería (s) viene dada por la siguiente relación:

$$s = \sqrt{H^2 + \frac{2H T_0}{q}} = \frac{T_0}{q} \sinh\left(\frac{q L}{T_0}\right) \quad (\text{Ec - 14})$$

Donde L, la proyección horizontal del tramo libre de la región *sagbend* se determina a partir de:

$$L = \frac{T_0}{q} \cosh^{-1}\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (\text{Ec - 15})$$

Además, según esta teoría, la deformación de flexión máxima en la región *sagbend* puede ser aproximado desde la mínima curvatura que se posea en la tubería, es decir:

$$\varepsilon = \frac{D_o q}{2T_0} \quad (\text{Ec - 16})$$

Las ecuaciones de la catenaria natural pueden emplearse para estimar la configuración de la tubería lejos de extremos donde la rigidez de la tubería es pequeña, en aguas profundas, o donde la tensión es muy grande, de modo que el término de tensión en las ecuaciones presentadas previamente predomine sobre el término de rigidez.

### II.2.2.1 Método de los Elementos Finitos

A diferencia del caso del método de análisis de Pequeñas Deflexiones, el Método de los Elementos Finitos permite el análisis de un tramo de tubo de elementos finitos para todas las profundidades de agua, y para deflexiones pequeñas o grandes, esto debido a que el tramo de tubería se modela como un sistema de elementos finitos conectados de una viga.

En este caso, las ecuaciones de flexión se desarrollan para cada elemento de tubería y las condiciones de contorno coinciden entre estos elementos. Estas ecuaciones de flexión del sistema se desarrollan en forma de matriz y se resuelven mediante el uso de técnicas de matriz.

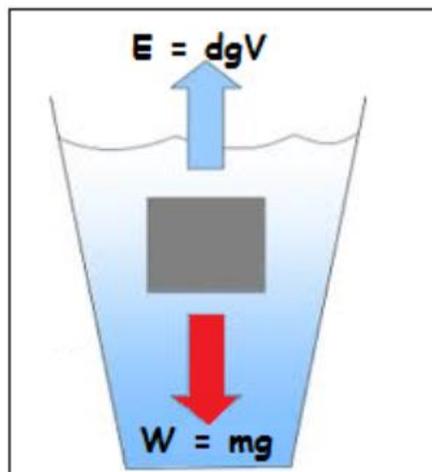
Mediante la selección adecuada de la longitud del elemento finito de tubo, las deflexiones de cada elemento pueden mantenerse pequeñas, generalmente con respecto a un sistema de coordenadas local, lo que permite utilizar la forma lineal de la ecuación diferencial de flexión para cada elemento de tubería como se describió anteriormente en el Método de la Viga.

## II.2.3 Acciones actuantes sobre la tubería

### II.2.3.1 Peso Propio

El peso de la tubería es un factor fundamental para la instalación costa afuera de la misma, puesto que este representa la mayor carga actuante en dicho proceso, y claramente se presenta a todo lo largo de la tubería. Esta carga presente en toda la tubería depende de las características geométricas de la misma, y del material que la componga, es de suma importancia para el proceso de instalación puesto que la tensión requerida a ser aplicada sobre la tubería (para que se puedan obtener las condiciones de instalación deseadas) depende principalmente de la profundidad de instalación y del peso de la tubería.

En vista de que la tubería se encontrará sumergida durante el proceso de instalación, el peso que debe emplearse para todas las consideraciones es el peso sumergido de la tubería, es decir, el peso propio de esta menos el empuje vertical hacia arriba que esta experimenta, el cual es igual al peso del volumen del fluido que desaloja, en este caso agua de mar, como se presenta en el diagrama de cuerpo libre de la Figura 8, según el Principio de Arquímedes.



**Figura 8.** Principio de Arquímedes (Empuje del agua).

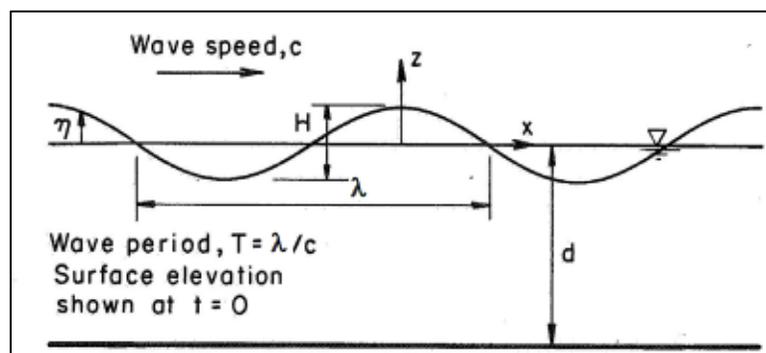
**Fuente:** Mecánica Elemental de los Fluidos. Bolinaga, J.

### II.2.3.2 Oleaje marino

El oleaje marino consiste en perturbaciones superficiales de un medio material, que se propagan por la frontera de dos medios materiales, en este caso se trata del límite entre la atmósfera y el océano. En las olas se distinguen dos movimientos, el primero es la oscilación del medio movido por la onda, pudiendo ser este un movimiento circular o un movimiento elíptico, y el segundo es la propagación de la onda que se produce porque la energía se transmite a través de ella, trasladando de esta forma el fenómeno con una dirección y velocidad.

Las fuerzas que pueden generar estas perturbaciones son el viento, barcos o una fuerza sísmica, motivo por el que estas ondas son irregulares en forma, varían en altura y longitud, y pueden acercarse a las estructuras o embarcaciones en una o varias direcciones simultáneamente. Es por ello, que la intensidad y la distribución de las fuerzas aplicadas por las olas son factores que se deben determinar, debido a que estas afectarán cualquier estructura desde su proceso de instalación hasta su operación durante toda su vida útil.

Las olas en el océano son generadas al azar en la naturaleza, sin embargo, las olas más grandes en una serie de ondas aleatorias pueden tener la forma de ondas regulares y pueden ser descritas por una teoría de ondas determinada. El uso de estas teorías es muy útil para el diseño de estructuras marinas, determinando las acciones que las olas generarán sobre estas, por lo que existen parámetros necesarios para describir cualquier teoría de ondas, los cuales se describen en la Figura 9.



**Figura 9.** Características de olas regulares.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

- Longitud de la ola ( $\lambda$  o  $L$ ): es la distancia entre crestas sucesivas.

- Período de la ola (T): es el intervalo de tiempo entre crestas sucesivas pasando por un punto.
- Celeridad de la ola (c): es la velocidad de propagación de la ola.
- Frecuencia de la ola (f): es el inverso del período de la ola.
- Frecuencia angular de la ola ( $\omega$ ): se denota como  $\omega = \frac{2\pi}{T}$
- Número de la ola (k):  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
- Elevación de superficie ( $\eta$ ): es la distancia entre el nivel medio y la superficie del agua.
- Altura de la cresta de la ola ( $A_c$ ): es la distancia entre el nivel medio y la superficie del agua en 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.
- Profundidad del agua (d): es la distancia desde el lecho marino hasta el nivel medio del agua.
- Altura de la ola (H): es la distancia vertical desde el punto más bajo de la ola hasta la cresta, se denota  $H = A_c + A_t$

### II.2.3.2.1 Teoría de olas

La teoría de las ondas representa una rama particular de la Hidráulica Marítima y de Costas que se ocupa de las propiedades de los procesos de las ondas independientemente de su origen físico, el cual puede ser variado, ya que este puede ser el viento, las mareas, tormentas, oscilaciones o terremotos; por lo que esta teoría es fundamental para determinar las propiedades de las olas y por ende sus efectos sobre las estructuras.

Tres características de la ola determinan qué teoría de olas debe ser empleada en un problema o condición en específico. Estos son la altura de la ola (H), el período de la ola (T) y la profundidad del agua (d). Estas características son usadas para determinar tres parámetros adimensionales que determinan los rangos de validación de las teorías de olas:

- Pendiente de la ola (S):

$$S = \frac{2\pi H}{g T^2} = \frac{H}{\lambda_o} \quad (\text{Ec - 17})$$

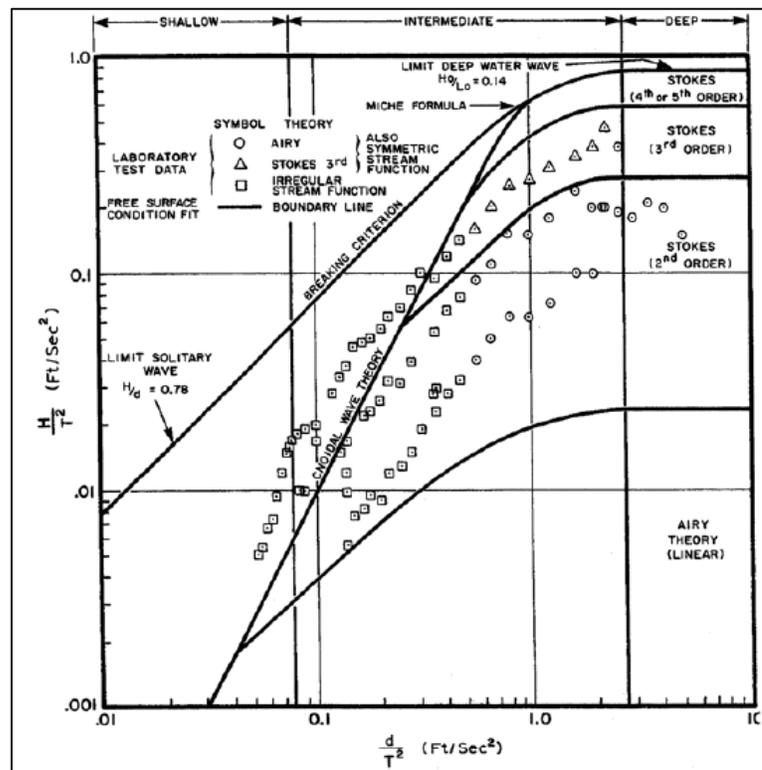
- Superficie de la ola ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{2\pi d}{g T^2} = \frac{d}{\lambda_o} \quad (\text{Ec - 18})$$

- Número Ursell ( $Ur$ ):

$$Ur = \frac{H \lambda^2}{d^3} = \frac{S}{\mu^3} \quad (\text{Ec - 19})$$

A partir de estos parámetros se puede emplear la gráfica incluida en la Figura 10 para establecer que teoría de olas es la más adecuada según las características de las olas.



**Figura 10.** Rangos de validación de distintas teorías de olas.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

### II.2.3.2.1.1 Teoría de ola de poca amplitud (Airy)

La validez de esta teoría está restringida a 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,  $A_c = A_t$ .

Según esta teoría el perfil de la ola viene dado por la siguiente ecuación:

$$\eta(X, Y, t) = \frac{H}{2} \cos(\theta) \quad (\text{Ec - 20})$$

Donde:

$\theta = k (X \cos(\beta) + Y \text{sen}(\beta)) - \omega t$  es la fase,  $\beta$  es la dirección de propagación medida desde el eje “x” positivo.

El período de la ola se determina a partir de la siguiente expresión:

$$T = \left[ \frac{g}{2\pi\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^{-1/2} \quad (\text{Ec - 21})$$

Y la frecuencia angular en función del número de ola:

$$\omega = [g k \tanh(k d)]^{1/2} \quad (\text{Ec - 22})$$

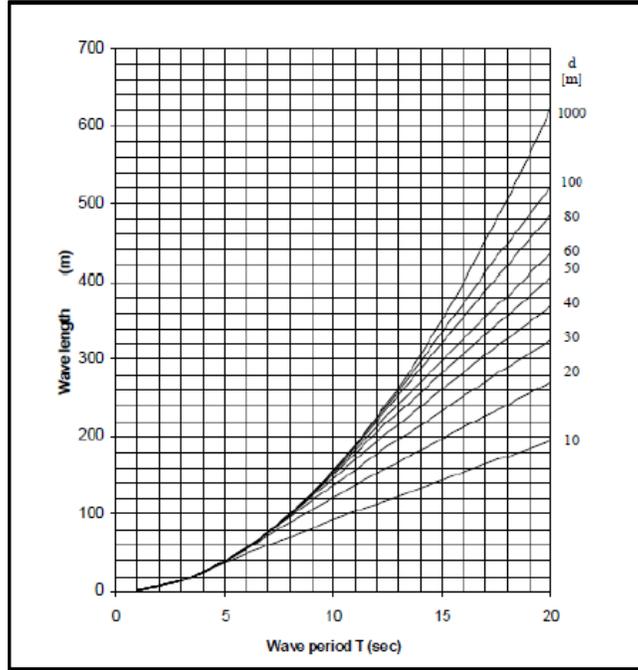
Para calcular la longitud de onda en función del período, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\lambda = T(g d)^{1/2} \left( \frac{f(\omega)}{1 + \omega f(\omega)} \right)^{1/2} \quad (\text{Ec - 23})$$

Donde:

$f(\omega) = 1 + \sum_{n=1}^4 \alpha_n \omega^n \wedge \omega = (4\pi^2 d)/(g T^2)$ , teniendo que:  $\alpha_1 = 0.666$  ;  $\alpha_2 = 0.445$  ;  $\alpha_3 = -0.105$  ;  $\alpha_4 = 0.272$ .

La solución gráfica de esta ecuación se puede apreciar en la Figura 11.



**Figura 11.** Relación entre período de la ola y longitud de la ola. Teoría Airy.

**Fuente:** Environmental Conditions and Everonmental Loads, DNV-RP-C205.

Por otra parte, se tiene que la celeridad o rapidez de la ola está dada por la siguiente ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \quad (\text{Ec - 24})$$

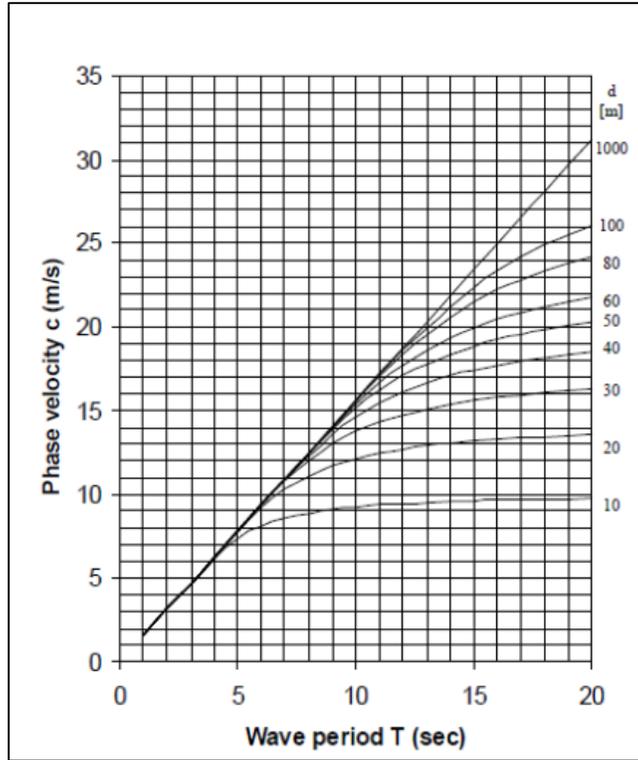
Para aguas profundas, donde  $d > \frac{\lambda}{2}$ , dicha ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2\pi}} = \frac{g}{\omega} = \frac{g T}{2\pi} \quad (\text{Ec - 25})$$

Y la longitud de la ola quedaría de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{g T^2}{2\pi} \quad \text{o} \quad \lambda = 1.56 T^2 \quad (\text{Ec - 26})$$

Donde, la solución gráfica de dicha ecuación se presenta a en la Figura 12.



**Figura 12.** Relación entre período de la ola y la celeridad de la ola. Teoría Airy.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

### II.2.3.2.1.2 Teoría de olas de Stokes

Las teorías de Stokes son una ampliación a la ecuación de la superficie de ola de la teoría lineal de olas, considerando que las olas son asimétricas con  $A_c > A_t$ . En este caso las crestas son más empinadas y los valles son más amplios.

Generalmente la Teoría de olas de Stokes se plantea a través de formulaciones de segundo y tercer orden como se presenta a continuación:

#### a. De segundo orden

Este orden de formulación de la teoría de Stokes es el que corresponde a la mayoría de los datos de oleaje, por lo que es el más empleado según lo que indica la norma DNV-RP-C205. El perfil de la superficie de la ola viene dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(\theta) + \frac{\pi H^2 \cosh(k d)}{8\lambda \sinh^3(k d)} * [2 + \cosh(2k d)] \cos(2\theta) \quad (\text{Ec - 27})$$

Donde:

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

Para aguas profundas, donde  $d > \frac{\lambda}{2}$ , dicha ecuación se reduce de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(\theta) + \frac{\pi H^2}{4\lambda} \cos(2\theta) \quad (\text{Ec - 28})$$

Para las olas de segundo orden en aguas profundas:

$$Ac = \eta(\theta = 0) = \frac{H}{2} \left( 1 + \frac{\pi H}{2\lambda} \right) \quad (\text{Ec - 29})$$

$$At = \eta(\theta = \pi) = \frac{H}{2} \left( 1 - \frac{\pi H}{2\lambda} \right) \quad (\text{Ec - 30})$$

De esta manera, 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 expuestos para la Teoría de Ola de Poca Amplitud (Airy), en las Ecuaciones Ec-26 y Ec-25, respectivamente.

### b. De tercer orden

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

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd) \left\{ 1 + \left( \frac{kH}{2} \right)^2 \left[ \frac{9 - 8\cosh^2(kd) + 8\cosh^4(kd)}{8\sinh^4(kd)} \right] \right\} \quad (\text{Ec - 31})$$

Para aguas profundas, donde  $d > \frac{\lambda}{2}$ , se presenta la siguiente simplificación:

$$c^2 = \frac{g}{k} \left[ 1 + \left( \frac{kH}{2} \right)^2 \right] \quad (\text{Ec - 32})$$

Las teorías de Stokes tienen una restricción, la cual es que la máxima relación de altura de cresta y altura de ola es de 0.635. Por otra parte, esta teoría no es aplicable para aguas poco profundas y con un  $U_R > 30$ . Para este tipo de condiciones es recomendable emplear la Teoría Sinusoidal de las Olas o la Teoría de la Ola en Función de Corrientes, expuesta más adelante.

Dado el amplio uso que posee tanto la Teoría de Stokes, como la Teoría de Ola de Poca Amplitud (Airy), la norma DNV-RP-C205 presenta la siguiente tabla con las fórmulas correspondientes a desplazamientos de partículas de fluidos, velocidad de partículas, aceleración y presión en la sub-superficie; a partir de la cual se pueden obtener los resultados apropiados para determinar el perfil de velocidades del oleaje.

**Tabla 1.** Fórmulas aplicables a Teoría de olas Airy y Teoría de olas de Stokes.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

Parameter	Airy wave theory		Stokes second-order wave theory
	General water depth	Deep water	
Velocity potential, $\phi$	$\frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$ $= \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin \theta$	$\frac{\pi H}{kT} e^{kz} \sin \theta$ $= \frac{gH}{2\omega} e^{kz} \sin \theta$	$\phi_i + \frac{3}{8} \frac{\pi H}{kT} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)] \sin 2\theta}{\sinh^4(kd)}$ 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, $\lambda$	$cT$	$gT^2/(2\pi)$	$cT$
Surface elevation, $\eta$	$\frac{H}{2} \cos \theta$	$\frac{H}{2} \cos \theta$	$\eta_i + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} [2 + \cosh 2kd] \cos 2\theta$
Horizontal particle displacement, $\xi$	$-\frac{H}{2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$-\frac{H}{2} e^{kz} \sin \theta$	$\xi_i + \frac{H}{8} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{1}{\sinh^3(kd)} \left[ 1 - \frac{3 \cosh[2k(z+d)]}{2 \sinh^2(kd)} \right] \sin 2\theta$ $+ \frac{H}{4} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} (\cos \theta)$
Vertical particle displacement, $\zeta$	$\frac{H}{2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$\frac{H}{2} e^{kz} \cos \theta$	$\zeta_i + \frac{3H}{16} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Horizontal particle velocity, $u$	$\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos \theta$	$u_i + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Vertical particle velocity, $w$	$\frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin \theta$	$w_i + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$
Horizontal particle acceleration, $\dot{u}$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \sin \theta$	$\dot{u}_i + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$
Vertical particle acceleration, $\dot{w}$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \cos \theta$	$\dot{w}_i - \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Subsurface pressure, $p$	$-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \cos \theta$	$-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H e^{kz} \cos \theta$	$p_i + \frac{3}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \left[ \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} - \frac{1}{3} \right] \cos 2\theta$ $-\frac{1}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} [\cosh[2k(z+d)] - 1]$
Group velocity, $c_g$	$\frac{c}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]$	$\frac{c}{2}$	$(c_g)_i$
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, $F$	$E c_g$	$\frac{1}{2} E c$	$E c_g$

Notation:  $d$  = mean water depth,  $g$  = acceleration of gravity,  $H$  = trough-to-crest wave height,  $k = 2\pi/\lambda$  = wave number,  $\lambda$  = 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  $i$  denotes linear small-amplitude theory.

### II.2.3.2.1.3 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  $U_R > 30$ , esto sucede cuando olas largas y de finita amplitud se propagan en aguas poco profundas. La relación entre altura de crestas y altura de olas está comprendida entre 0.65 y 1.

Para aguas poco profundas esta teoría, originalmente desarrollada por Korteweg y De Vries (1895), proporciona una predicción bastante confiable de la forma de onda y los movimientos asociadas para algunas condiciones, sin embargo, ha recibido poca atención en la solución de problemas relacionados con la ingeniería.

El desarrollo de teorías de olas individuales es omitido, y solo los resultados son presentados para que pueda ser útil para las soluciones de problemas prácticos.

### II.2.3.2.1.4 Teoría de Ola Solitaria

Para altos números de Ursell, el cual indica la no linealidad de extensas ondas de superficie de gravedad en una capa de fluido, la longitud de onda para la Teoría Sinusoidal tiende al infinito y es por esto que se le denomina Teoría de 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 Solitarias es el siguiente:

$$\eta(x, t) = H \cosh^{-1} \left[ \frac{\sqrt{3}\varepsilon}{2d} \left( 1 - \frac{5}{8}\varepsilon \right) (x - ct) \right] \quad (\text{Ec - 33})$$

Donde:

$\varepsilon = \frac{H}{d}$ , y la celeridad de la ola se considerará como  $c = 1.33\sqrt{gd}$ .

### II.2.3.2.1.5 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 de función de corriente tiene la siguiente solución:

$$\Psi(x, z) = cz + \sum_{n=1}^N X_{(n)} \sinh(kz) (z + d) \cosh(nkx) \quad (\text{Ec - 34})$$

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 la superficialidad  $\mu$ . Para  $N = 1$ , la teoría en función de la corriente se simplifica a la Teoría de ola de poca amplitud (Airy). Mientras se desee llegar con mayor exactitud a la altura de rompimiento de la ola, será necesaria la utilización de mayor cantidad de términos.

### **II.2.3.3 Corrientes marinas**

Una corriente oceánica o corriente marina es un movimiento de las aguas en los océanos y, en menor grado, de los mares más extensos, las cuales tienen multitud de causas, principalmente, el movimiento de rotación terrestre (que actúa de manera distinta y hasta opuesta en el fondo del océano y en la superficie) y por los vientos constantes o planetarios, así como la configuración de las costas y la ubicación de los continentes.

Estas corrientes son otro de los factores que inciden en el diseño de las tuberías submarinas, desde su proceso de instalación, hasta su operación durante toda su vida útil, debido a que estas 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 conllevan 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.

#### **II.2.3.3.1 Tipos de corrientes marinas**

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 sí tienen relevancia.
- 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 las 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 litorales.

En agua 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, tanto de manejo, como de dirección, de tal forma que se puedan simular con mayor exactitud las condiciones que realmente se poseen.

Por otra parte, 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 la 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.

### II.2.3.3.2 Velocidad de corrientes marinas

El vector de la velocidad de las corrientes marinas varía en función de la profundidad del agua. Este perfil de velocidades en función de la profundidad presenta mayor velocidad cerca de la superficie del agua, y va disminuyendo a medida que se vaya acercando este al fondo marino, tal y como se puede apreciar en la Figura 13. En general el vector velocidad varía en función del espacio, pero presenta también dependencia del tiempo debido a las fluctuaciones que tiene el flujo.

$$Vc = Vc(x, y, z, t) \quad (\text{Ec - 35})$$

Para la mayoría de las aplicaciones donde se incluyan cálculos de fuerzas debido a la corriente marina, la velocidad de la corriente puede ser considerada como un campo de flujo constante donde el vector velocidad (en magnitud y dirección) varía únicamente en función de la profundidad. A partir de esto la DNV-RP-C205 plantea la siguiente ecuación para la descripción del perfil de velocidades de la corriente marina:

$$V_{marea}(z) = V_{marea(0)} \left( \frac{d+z}{d} \right)^\alpha \quad (\text{Ec - 36})$$

Donde:

$V_{marea(0)}$  es la velocidad de la corriente marina en la superficie o profundidad cero, y  $\alpha = \frac{1}{7}$ .

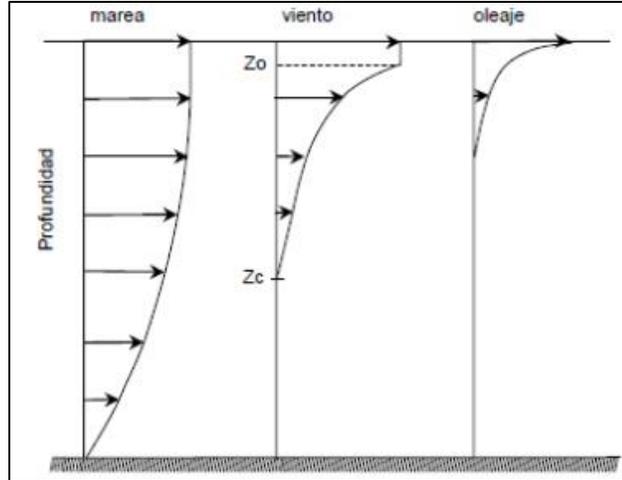
### II.2.3.4 Viento

El viento consiste en una corriente de aire que se produce en la atmósfera al variar la presión, y puede generar modificaciones en la distribución de velocidades de las corrientes marinas mediante su fluctuación estacional sobre la superficie del mar.

En zonas costeras el viento tiene una fuerte influencia sobre la superficie del agua, ya que este transfiere energía o movimiento a la superficie del agua generando lo que se conoce como circulación inducida por viento. Asimismo, contribuye significativamente en la generación de oleaje y mezclado en la capa superficial.

El esfuerzo del viento actuando sobre la superficie genera una corriente de deriva y modifica el esfuerzo cortante en la vertical. Se ha determinado empíricamente que la corriente

inducida por el viento, en la superficie, es proporcional a la magnitud del viento, por lo que se suelen representar las distribuciones de velocidades de las corrientes marinas considerando el efecto del viento como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13.** Esquema de los perfiles verticales de velocidad de las corrientes inducidas por la marea, el viento y el oleaje.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

Como se puede apreciar en el perfil de velocidades, el viento tiene influencia sobre la velocidad del flujo hasta cierta profundidad, la cual puede ser descrita, según DNV-RP-C205, a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{viento}(z) = V_{viento(0)} \left( \frac{do + z}{do} \right) \quad (\text{Ec - 37})$$

Donde:

$V_{viento(0)} = k V_{viento}$ , siendo  $k$  un valor entre 0.015 y 0.03, y  $V_{viento}$  la velocidad del viento en la superficie del flujo.

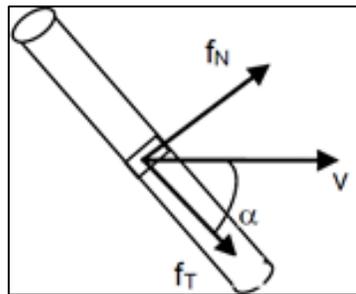
### II.2.3.5 Fuerzas hidrodinámicas

La acción del oleaje, corrientes marinas y viento generan fuerzas hidrodinámicas sobre los cuerpos sujetos a dichas acciones, debido a la velocidad del flujo ocasionada por dichos efectos.

Mediante la ecuación de Morrison se determina la fuerza hidrodinámica integrada por el arrastre, la fuerza de masa hidrodinámica y la fuerza Froude-Krylov, la cual se suele expresar en dos componentes, uno perpendicular a la estructura y otro tangencial a ella, tal y como se muestra

en la Figura 14. Es una fórmula de tipo semiempírico, que representa la fuerza por unidad de longitud sobre cilindros verticales en movimiento como la suma de las fuerzas de inercia y arrastre antes comentadas.

La fuerza de arrastre es la resistencia en el agua al movimiento relativo, la fuerza de masa hidrodinámica es causada por la masa del fluido alrededor de la tubería que se acelera con el movimiento de esta debido a la presión y la fuerza Froude-Krylov que es producida por un gradiente de presiones debido al movimiento acelerado del agua en las regiones aledañas a la tubería.



**Figura 14.** Descomposición de la fuerza hidrodinámica para elementos esbeltos.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

**a. Fuerza normal**

El componente normal se puede expresar de forma general mediante la siguiente ecuación:

$$f_N(t) = \rho (1 + C_A) A \dot{v} + \frac{1}{2} \rho C_D D v |v| \quad (\text{Ec - 38})$$

La ecuación de Morrison es válida si:

$$\lambda > 5 D \quad (\text{Ec - 39})$$

Para el caso de estructuras móviles en oleaje y corriente donde el flujo se mueve perpendicular al eje de la estructura la ecuación anterior sufre ciertas modificaciones.

$$f_N(t) = -\rho C_A A \ddot{r} + \rho (1 + C_A) A \dot{v} + \frac{1}{2} \rho C_D D v |v| - \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{r} |\dot{r}|$$

Expresando en función de velocidades relativas:

$$f_N(t) = \rho A \dot{v} + \rho C_A A a r + \frac{1}{2} \rho C_D D v_r |v_r| \quad (\text{Ec - 40})$$

$$C_A = \frac{m_a}{\rho A} \quad (\text{Ec - 41})$$

$$a = \dot{v} - \ddot{r} \quad (\text{Ec - 42})$$

$$v_r = v - \dot{r} \quad (\text{Ec - 43})$$

El uso de velocidades relativas es válido si se cumple la siguiente relación:

$$\frac{r}{D} > 1 \quad (\text{Ec - 44})$$

Para la determinación de los coeficientes de arrastre ( $C_D$ ) y de masa añadida ( $C_A$ ) es necesaria la determinación de los siguientes números adimensionales:

$$Re = \frac{\rho v_r D}{\mu} = \frac{v_r D}{\nu} \quad (\text{Ec - 45})$$

$$K_C = \frac{v_m T}{D} \quad (\text{Ec - 46})$$

$$\Delta = \frac{k}{D} \quad (\text{Ec - 47})$$

Donde:

A es el área perpendicular al flujo.

D es el diámetro externo de la tubería.

k es la rugosidad del recubrimiento de concreto.

$\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido.

$\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

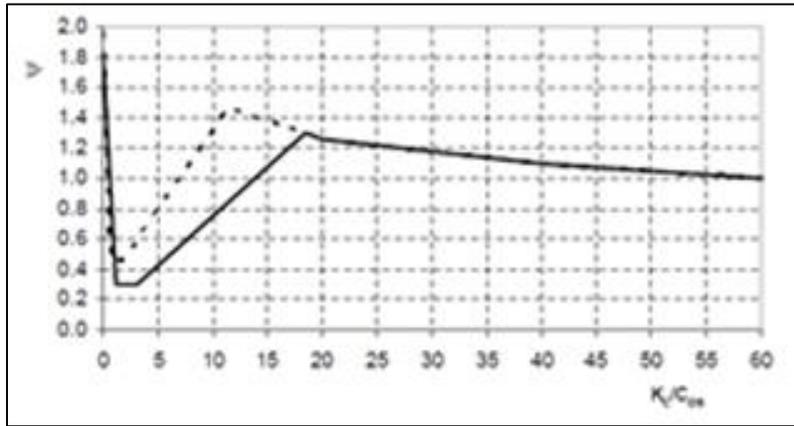
El coeficiente de arrastre es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar el arrastre o resistencia de un objeto en un medio fluido. El coeficiente de arrastre de cualquier objeto comprende los efectos de dos contribuciones básicas al arrastre dinámico del fluido: el arrastre de forma y la fricción de superficie.

$$C_D = C_{DS}(\Delta) \Psi(K_C) \quad (\text{Ec - 48})$$

Para valores de Reynolds altos ( $Re > 10^6$ ) y  $K_C$  altos, el coeficiente de arrastre se vuelve dependiente únicamente de la rugosidad relativa y se puede determinar el de la siguiente manera:

$$C_{DS}(\Delta) = \begin{cases} 0.65 & ; \Delta < 10^{-4} (\text{lisa}) \\ \frac{29 + 4 \log_{10}(\Delta)}{20} & ; 10^{-4} < \Delta < 10^{-2} \\ 1.05 & ; \Delta > 10^{-2} (\text{rugosa}) \end{cases} \quad (\text{Ec - 49})$$

Y  $\Psi(K_C)$  es el factor de amplificación de estela, el cual se puede determinar a partir de la gráfica expuesta en la Figura 15 en caso de que  $K_C$  sea mayor a 12.



**Figura 15.** Relación entre el Factor de amplificación de estela, y el cociente del Número de Keulegan-Carpenter y el Coeficiente de Arrastre.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

En caso de que  $K_C$  sea menor a 12 se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$\Psi(K_C) = \begin{cases} C_\pi + 0.10 (K_C - 12) & ; 2 \leq K_C < 12 \\ C_\pi - 1 & ; 0.75 \leq K_C < 2 \\ C_\pi - 1 - 2 (K_C - 0.75) & ; K_C \leq 0.75 \end{cases} \quad (\text{Ec - 50})$$

Donde:

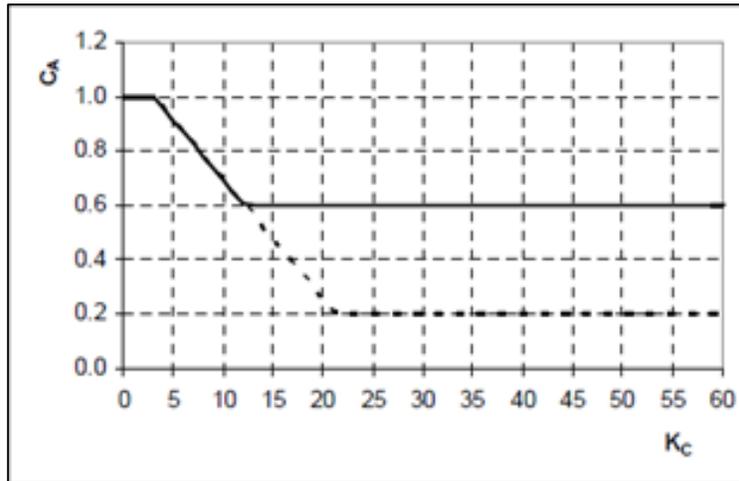
$$C_\pi = 1.50 - 0.024 \left( \frac{12}{C_{DS}} - 10 \right)$$

En el caso del coeficiente de masa añadida, el cual permite expresar la fuerza de inercia que ejerce el fluido sobre un sólido, debida a la aceleración del mismo sólido, la norma DNV-RP-C205 establece que se pueden aplicar las siguientes ecuaciones para determinarlo:

$$\text{Si } K_C < 3, \quad C_A = 1 \quad (\text{Ec - 51})$$

$$\text{Si } K_C > 3, \quad C_A = \max \begin{cases} 1 - 0.044 (K_C - 3) \\ 0.6 - (C_{DS} - 0.65) \end{cases} \quad (\text{Ec - 52})$$

Además, se puede determinar haciendo uso de la Figura 16:



**Figura 16.** Relación entre el Coeficiente de masa añadida y el Número de Keulegan-Carpenter.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

### b. Fuerza Tangencial

Este componente se debe a la fricción entre el fluido y el elemento, es de suma importancia cuando el componente tangencial de la velocidad relativa es elevado, en caso contrario el empuje es despreciable al ser mucho menor al componente normal al miembro. Esta fuerza puede ser expresada de la siguiente manera:

$$f_T = \frac{1}{2} \rho C_{DT} D v^2 \quad (\text{Ec - 53})$$

Donde:

D es el diámetro total de la tubería,  $C_{Dt}$  es el Coeficiente de Arrastre Tangencial y se determina en función de valores empíricos establecidos por la norma como se muestra a continuación:

$$C_{Dt} = C_D (m + n \sin(\alpha)) \cos(\alpha) \quad (\text{Ec - 54})$$

Determinando los valores de m y n a partir de lo expresado en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores empíricos de ajuste para determinación de coeficiente de arrastre tangencial.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

	<i>m</i>	<i>n</i>
Bare cables, smooth cylinders	0.02-0.03	0.04-0.05
Faired cables	0.25-0.50	0.50-0.25
6-stranded wire	0.03	0.06

## II.3 Características de las tuberías submarinas

### II.3.1 Material

El principal material empleado para las tuberías submarinas es el acero, el cual debe soportar las sollicitaciones a las cuales estará sometida la tubería, que se traducen en momentos y esfuerzos longitudinales durante la instalación y operación. Para ello es recomendable que el acero empleado en las tuberías posea resistencia a la cedencia mínima específica no menor de 65 ksi, aproximadamente 448 MPa, además de poder soportar impactos, soldaduras y ciertas irregularidades durante su construcción, sin disminuir considerablemente su capacidad.

La especificación API 5L suministra las propiedades mecánicas de diferentes tipos de acero empleados en el ámbito de tuberías submarinas, tal como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Propiedades de aceros empleados en tuberías.

**Fuente:** API 5L: Specification for Line Pipe.

(1) Grade	(2) Yield Strength, Minimum		(3) Ultimate Tensile Strength, Minimum		(4) Elongation in 2 in. (50.8 mm), Minimum, Percent
	psi	MPa	psi	MPa	
A25	25,000	(172)	45,000	(310)	a
A	30,000	(207)	48,000	(331)	a
B	35,000	(241)	60,000	(414)	a
X42	42,000	(290)	60,000	(414)	a
X46	46,000	(317)	63,000	(434)	a
X52	52,000	(359)	66,000	(455)	a
X56	56,000	(386)	71,000	(490)	a
X60	60,000	(414)	75,000	(517)	a
X65	65,000	(448)	77,000	(531)	a
X70	70,000	(483)	82,000	(565)	a

El empleo de aceros de alta resistencia conlleva una serie de ventajas que hacen tan extendido su uso, como:

- Reducción de costos en el proyecto al disminuir los espesores requeridos para soportar el diferencial de presiones a los cuales se ve sometida la tubería.
- Disminución del peso de la tubería, lo que facilita el transporte de esta.
- Empleo de menor cantidad de consumibles al realizar la soldadura de las tuberías, además de llevar a cabo el proceso en menos tiempo.
- Aumento del grado del material, lo que reduce la velocidad de enfriamiento de la soldadura, hecho que generaría problemas relacionados con la dureza, la tenacidad a la fractura y el agrietamiento en frío.

A pesar de que se trata de aceros que son resistentes a la corrosión, a la cual evidentemente estarán sometidos al encontrarse en el medio marino, dado que la tubería debe mantenerse en el lecho marino durante toda su vida útil, esta no debe corroerse ni ser dañada por objetos ajenos a su operación, por lo que se puede emplear una protección de concreto, tal como se muestra en la Figura 17, la cual ayuda a mantener la estabilidad vertical y horizontal de la tubería, y además proporciona cierta protección a la tubería contra la corrosión, aunque adicionalmente se emplea protección catódica en la tubería, la cual es una técnica para controlar la corrosión galvánica de

una superficie de metal convirtiéndola en el cátodo de una celda electroquímica. Este tipo de protección mediante el revestimiento de la tubería con concreto no aporta capacidad estructural a la tubería durante el proceso de instalación de la misma, debido a que este suele agrietarse a causa de las deformaciones generadas.

En la norma DNVGL-ST-F101 se exponen ciertos lineamientos que rigen este tipo de protección, entre los cuales se establece un espesor de al menos 40 mm y una resistencia a la compresión mínima de 40 MPa (407.89 kgf/cm<sup>2</sup>), utilizándose por lo general concretos de pesos unitarios que van desde 2040 kgf/m<sup>3</sup> hasta 3040 kgf/m<sup>3</sup>.

Este tipo de protección conlleva aumento del diámetro externo de la tubería, lo que se traduce en mayores efectos de las cargas ambientales; al poseer mayor tamaño la acción de fuerzas hidrodinámicas se incrementará. Una forma de evitar parcialmente el efecto de dichas acciones es enterrar la tubería en el lecho, con lo que además se dota a la tubería de protección contra redes pesqueras y objetos caídos.



**Figura 17.** Tubería de acero recubierta con concreto.

**Fuente:** Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation. Bay, Q.

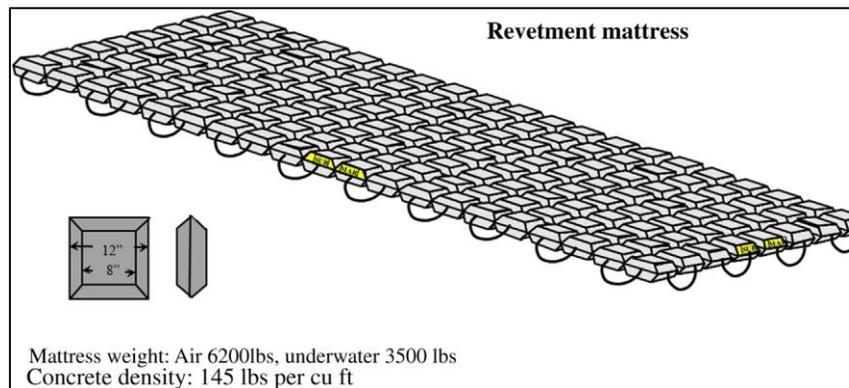
Al emplearse este revestimiento de concreto las propiedades de la tubería se ven modificadas, no solo la sección y sus propiedades geométricas, sino también su módulo de elasticidad, puesto que ahora se trata de una sección mixta, la cual presentará un nuevo módulo de elasticidad determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{eq} = E_{acero} (1 + CSF) \quad (Ec - 55)$$

$$CSF = k_c \left( \frac{E_c I_{concreto}}{E I_{acero}} \right)^{0.75} \quad (\text{Ec} - 56)$$

Donde el coeficiente  $k_c$  es una constante empírica, cuyo valor para tuberías de acero, según establecido en la norma DNV-RP-F105, es de 0.25.

Otros métodos comunes para proteger la tubería son las descargas de roca, método que es aplicable cuando la creación de zanjas no es viable debido a las condiciones del lecho marino, como por ejemplo que su dureza no permita afectarlo sin generar un aumento considerable en los costos del proyecto; o el uso de colchones de concreto, como se muestra en la Figura 18, método que consiste en colocar pequeños bloques de concreto unidos entre sí formando un manto que cubre a la tubería y le otorga estabilidad en ambientes poco severos.



**Figura 18.** Revestimiento con colchones de concreto.

**Fuente:** Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation. Bay, Q.

### II.3.2 Diámetro

La definición del diámetro de la tubería submarina se realiza a partir de las condiciones de conducción hidráulica de la misma, es decir, se define a partir del caudal de flujo a transportar, la velocidad del flujo y los requerimientos de energía presentes en el sistema.

Una vez definido el caudal de flujo que transportará la tubería, y además la velocidad a la cual este será transportado, a partir de la ecuación de continuidad, la cual plantea la conservación de la masa de fluido a través de dos secciones de un conducto (la masa que entre debe ser igual a la masa que sale), se podrá determinar el diámetro de la tubería.

$$Q = V A \quad (\text{Ec} - 57)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{Ec - 58})$$

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} \quad (\text{Ec - 59})$$

En cuanto a la velocidad del flujo, esta dependerá tanto del material de la tubería (no se pueden permitir problemas de erosión interna en la tubería), como de las condiciones de energía del sistema, ya que la velocidad es un factor de suma importancia en la consideración de pérdidas de energía por fricción en la tubería. Tomando en consideración las ecuaciones de Darcy Weibach para pérdidas de energía por fricción, se tiene que:

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ec - 60})$$

Donde L es la longitud de la tubería, y f es el factor de fricción de Darcy el cual se puede determinar a partir de la fórmula de Swamee presentada a continuación, aplicable para números de Reynolds pequeños (flujo laminar), ya que en caso de ser turbulento (número de Reynolds grande) se elimina el término que contiene el número de Reynolds.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{k/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (\text{Ec - 61})$$

Donde k es la rugosidad del material, y Re es el Número de Reynolds, el cual se puede determinar a partir de la Ecuación Ec-45.

### II.3.3 Espesor

El espesor de la tubería debe ser determinado a partir de las cargas actuantes y la resistencia del acero (cedencia y rotura), de tal forma que esta pueda soportar la presión interna, la presión externa, cargas externas (permanentes y variables), cambios de temperatura, sobre presión interna por golpe de ariete, entre otras.

Para determinar el espesor a partir de la presión interna del flujo se emplea la ecuación planteada por Barlow, la cual plantea lo siguiente:

$$e = \frac{p D}{2\sigma t} \quad (\text{Ec - 62})$$

Donde:

$p$  es la presión interna del flujo

$\sigma_t$  es el esfuerzo de trabajo de acero (50% del esfuerzo cedente, en operación normal).

La presión externa puede ser originada por vacío interno, lo que llevaría al colapso de la tubería, por lo que Euler plantea que para evitar este efecto y deformaciones plásticas el espesor mínimo debería ser 0.007 veces el diámetro de la tubería. Además, el espesor de la tubería debe ser tal que las condiciones ambientales a las cuales estará sometida la tubería no generen problemas por corrosión en la misma, el cual puede verse disminuido al emplear revestimiento en la tubería.

#### **II.4 Análisis estructural de la tubería**

El análisis estructural se refiere al uso de ecuaciones de la resistencia de materiales para determinar los esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre una estructura resistente, como edificaciones, represas, tuberías, entre muchas otras.

Este análisis estructural se lleva a cabo a partir de la verificación de los estados límites de diseño, el cual en el caso de la tubería durante su proceso de instalación debe verificar para todos los modos de falla relevantes, las cuales se clasifican en dos grupos, los de servicio y los generados por cargas accidentales.

Según la norma DNVGL-ST-F101 en función del escenario en el que se encuentre la tubería, los estados límite a verificar son los presentados en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Relaciones típicas entre escenarios y estados límites.

**Fuente:** Submarine Pipeline systems, DNVGL-ST-F101.

Scenario	Ultimate limit states							Serviceability limit states			
	Fracture			Instability							
				Local buckling							
	Pressure containment	Fatigue	Fracture	System collapse	Propagating buckling	Combined loading	Global buckling	Dent	Ovalisation	Accumulated deformation	Displacement
Wall thickness design	X			X	X						
Installation		X	X	X	X	X		X		X	
Free-span	(X)	X	X			X					
Trawling/3rd party	(X)					X		X			
On bottom stability	(X)	(X)	(X)			(X)		(X)	(X)	X <sup>1</sup>	
Pipeline Walking						X					
Global Buckling	(X)	X	X			X			X		
1) Typically applied as a simplified way to avoid checking each relevant limit state											

A partir de esta tabla, se puede apreciar que, según la norma, los estados límite que deben ser verificados para el proceso de instalación de la tubería son: fatiga, fractura, colapso, propagación del pandeo, cargas combinadas, ovalización y desplazamiento.

Para la determinación de las solicitaciones que deben verificarse según los estados límite se debe emplear la siguiente combinación de cargas:

$$L_{sd} = L_f \gamma_f \gamma_c + L_e \gamma_e + L_i \gamma_i \gamma_c + L_a \gamma_a \gamma_c \quad (\text{Ec - 63})$$

Donde los factores de mayoración se pueden obtener a partir de las Tablas 5 y 6.

**Tabla 5.** Factores de combinación de carga.

**Fuente:** Submarine Pipeline systems, DNVGL-ST-F101.

Limit state/load combination	Load effect combination		Functional loads <sup>1)</sup>	Environmental load	Interference loads	Accidental loads
			Y F	Y E	Y F	Y A
ULS	a	System check <sup>2)</sup>	1.2	0.7		
	b	Local check	1.1	1.3	1.1	
FLS	c		1.0	1.0	1.0	
ALS	d		1.0	1.0	1.0	1.0

1) If the functional load effect reduces the combined load effects,  $\gamma_F$  shall be taken as 1/1.1.  
 2) This load effect factor combination shall only be checked when system effects are present, i.e. when the major part of the pipeline is exposed to the same functional load. This will typically only apply to pipeline installation.

**Tabla 6.** Factor de efecto de condición de carga,  $\gamma_c$ .

**Fuente:** Submarine Pipeline systems, DNVGL-ST-F101.

Condition	$\gamma_c$
Pipeline resting on uneven seabed	1.07
J-tube pull-in <sup>1</sup>	0.82
System pressure test	0.93
S-lay installation; Local buckling load control check on stinger <sup>2</sup>	0.80
Reeling installation; Displacement controlled check, seamless pipes <sup>2</sup>	0.77
Reeling installation; Displacement controlled check, welded pipes <sup>2,3</sup>	0.82
Otherwise	1.00

1) Load combination a needs not to be analysed  
 2) For installation both load combination a and b shall always be analysed, see also [5.8.2]  
 3) This factor has not been re-assessed but reflects the less uniform material properties around the circumference

### II.4.1 Estados límite de Fatiga y Fractura

El sistema de tubería submarina deberá tener la seguridad adecuada contra fallas de fractura dentro de la vida útil del sistema. En general, esto se logra seleccionando materiales con propiedades adecuadas de tenacidad a la fractura, propiedades de tracción y calidad de soldadura combinadas con principios de diseño racional.

El estado límite de fatiga y fractura es en general aplicable a todos los tipos de materiales, siempre que se conozcan o establezcan las propiedades representativas de los materiales necesarios para realizar las evaluaciones. Las soldaduras son, en general, más críticas teniendo en cuenta el estado límite de fatiga y fractura porque suelen tener mayores tensiones debido a las concentraciones de tensión y tensiones residuales de soldadura y pueden incluir defectos.

Esto puede dar como resultado un tiempo de iniciación más corto para el crecimiento de grietas por fatiga, rasgaduras o fracturas inestables en caso de tensiones / tensiones elevadas combinadas con propiedades de tenacidad a la fractura bajas.

Se deberá prestar especial atención a la evaluación de la fatiga de los detalles de la construcción que puedan causar concentraciones de esfuerzos y a la posibilidad de tener fatiga de alta tensión de bajo ciclo. El criterio de diseño específico que se utilizará depende del método de análisis.

#### **II.4.2 Pandeo local**

El pandeo local de un elemento (pandeo de la pared de la tubería) que se encuentra sometido a fuerzas de compresión y que produce el colapso del miembro estructural a partir de una gran deformación en la sección transversal, tal y como se puede apreciar en la Figura 19, es un estado límite que debe ser verificado en una tubería durante el proceso de instalación de la misma, debido a la cantidad de solicitaciones a las que esta es sometida y los criterios que el pandeo local conlleva.



**Figura 19.** Pandeo Local en tubería submarina.

**Fuente:** Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation. Bay, Q.

##### **II.4.2.1 Pandeo local – Colapso del sistema**

La presión externa en cualquier punto a lo largo de la tubería debe cumplir el siguiente criterio (verificación de colapso del sistema):

$$p_e - p_{min} \leq \frac{p_c(t_1)}{\gamma_m \gamma_{SC, LB}} \quad (\text{Ec - 64})$$

Donde la presión característica de colapso ( $p_c$ ) (resistencia a la sobrepresión externa) se puede calcular de la siguiente manera:

$$[p_c(t) - p_{el}(t)] [p_c(t)^2 - p_p(t)^2] = p_c(t) p_{el}(t) p_p(t) O_0 \frac{D}{t} \quad (\text{Ec - 65})$$

Teniendo que:

$$p_{el}(t) = \frac{2E \left(\frac{t}{D}\right)^3}{1 - \nu^2} \quad (\text{Ec - 66})$$

$$p_p(t) = f_y \alpha_{fab} \frac{2t}{D} \quad (\text{Ec - 67})$$

$$O_0 = \frac{D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}}{D} \quad (\text{Ec - 68})$$

Donde:

$\nu$  es el coeficiente de Poisson,

$D$  es el diámetro externo de la tubería de acero

$\alpha_{fab}$  es el factor de fabricación, el cual se define a partir de los valores incluidos en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Factor de fabricación.

**Fuente:** Submarine Pipeline systems, DNVGL-ST-F101.

Pipe	Seamless	UO, TRB, ERW and HFW	UOE
$\alpha_{fab}$	1.00	0.93	0.85

#### II.4.2.2 Pandeo local – Propagación del pandeo

La propagación de pandeo no se puede iniciar a menos que se haya producido pandeo local previamente. En caso de que la presión externa exceda el criterio dado a continuación, se deben instalar rigidizadores locales (*buckle arrestors*) y determinar el espaciado entre estos en función del costo y la filosofía de reposición de tramos de la tubería, de tal forma que este efecto pueda ser controlado.

El criterio de propagación de pandeo plantea que:

$$p_e - p_{min} \leq \frac{p_{pr}(t_2)}{\gamma_m \gamma_{SC, LB}} \quad (\text{Ec - 69})$$

Donde:

$$p_{pr} = 35 f_y \alpha_{fab} \left( \frac{t_2}{D} \right)^{2.5} \quad (\text{Ec - 70})$$

El rigidizador local antes mencionado debe tener cierta capacidad, la cual dependerá de la resistencia a la propagación de pandeo de la tubería, la resistencia que debería tener un rigidizador si este fuese de la misma longitud que la tubería, y la longitud de rigidizador que se le podrá asignar a la tubería. Un rigidizador integral debe ser diseñado a partir de:

$$p_e \leq \frac{p_x}{1.1 \gamma_m \gamma_{SC, LB}} \quad (\text{Ec - 71})$$

Donde la presión de transferencia  $p_x$  se determina a partir de:

$$p_x = p_{pr} + (p_{pr, BA} - p_{pr}) \left[ 1 - e^{-20 \frac{t_2 L_{BA}}{D^2}} \right] \quad (\text{Ec - 72})$$

#### **II.4.2.3 Pandeo local – Criterio de combinación de cargas**

El criterio de combinación de cargas o efectos del pandeo local se diferencia para dos casos, siendo el primer caso el de condición de cargas controladas (Condición LC), el cual consiste en que la respuesta estructural se rige principalmente por las cargas impuestas, y el segundo caso es el de condición de desplazamientos controlados (Condición DC), el cual consiste en que la respuesta estructural se rige principalmente por los desplazamientos geométricos impuestos.

Según se establece en la norma, el criterio de condición de cargas controladas, puede ser aplicado en lugar de desplazamientos controlados en cualquier caso, puesto que, desde el proceso de instalación hasta la puesta en operación de la tubería se tiene conciencia de las cargas a las cuales está siendo sometida la tubería (el diseño de la tubería depende fundamentalmente de ello), en cambio, los desplazamientos presentes en la misma no son determinados en gran mayoría de los casos, ya que se busca controlar los factores que generan los mismos.

Los elementos de tubería sometidos a momento de flexión, fuerza axial efectiva y sobrepresión externa se diseñarán para cumplir el siguiente criterio en todas las secciones transversales:

$$\left[ \gamma_m \gamma_{SC,Lb} \frac{|M_{sd}|}{\alpha c M_p(t)} + (\gamma_m \gamma_{SC,Lb} \left( \frac{S_{sd}(pi)}{\alpha c S_p(t)} \right)^2 \right)^2 + \left[ \gamma_m \gamma_{SC,Lb} \frac{p_e - p_{min}}{pc(t)} \right]^2 \leq 1 \quad (\text{Ec} - 73)$$

La cual aplica para:

- $15 \leq D/t_2 \leq 45$
- $p_{min} \leq p_e$
- $|S_{sd}|/S_p < 0.4$

Donde:

$$S_p(t) = fy \pi (D - t) t \quad (\text{Ec} - 74)$$

$$M_p(t) = fy (D - t)^2 t \quad (\text{Ec} - 75)$$

$$\alpha c = (1 - \beta) + \beta \left( \frac{fu}{fy} \right) \quad (\text{Ec} - 76)$$

$$\beta = \frac{60 - \frac{D}{t}}{90} \quad (\text{Ec} - 77)$$

En caso de no cumplir con este criterio se deberán evaluar las condiciones en las cuales se está llevando a cabo la instalación de la tubería, ya que las solicitaciones a las cuales está siendo sometida la tubería, sea momento flector, fuerza axial efectiva o sobrepresión externa, están superando la resistencia de la tubería y por ende comprometiendo su funcionamiento.

### II.4.3 Ovalización

La ovalización es una deformación característica de las camisas de los cilindros debida al desgaste irregular de la superficie interior que, después de un largo período de funcionamiento, adquiere una forma oval en vez de la circular.

El sistema de tuberías submarinas no puede ser sujeto a una ovalización excesiva. El aplanamiento residual debido a las cargas de flexión y punto, junto con la tolerancia de fuera de redondez de la fabricación de la tubería, no debe exceder el 3%, se define como:

$$O_0 = \frac{D_{\text{máx}} - D_{\text{mín}}}{D} \leq 0.03 \quad (\text{Ec} - 78)$$

Este requerimiento puede no considerarse si:

- Se ha incluido una reducción en la resistencia del momento por parte de la tubería.
- Se cumplen las restricciones geométricas, así como los requisitos de la tubería en cuanto al material y sus propiedades.
- Se cumplen las tolerancias en el sistema de reparación correspondiente.

#### **II.4.4 Desplazamiento**

Según lo establecido en la norma DNVGL-ST-F101, es necesario considerar el desplazamiento longitudinal acumulado de la tubería, o también denominado “tubería andante”, para el diseño de la misma, ya que este puede generar una acumulación de deformaciones plásticas que pueden comprometer la integridad estructural de la tubería. Este hecho puede llegar a ocurrir por las siguientes causas:

- La tubería es más corta que dos longitudes de anclaje.
- Se poseen partes de tubería con anclaje virtual.
- La tubería se encuentra en pendientes distintas del fondo marino.
- La tubería es conectada a la fuerza por tracción.

Se debe diseñar la tubería de tal forma que el desplazamiento de la misma sea aceptable, lo cual puede estar limitado por:

- Interferencia con otras estructuras o relieves marinos.
- Exposiciones a otras cargas o amenazas.
- Cambio en la configuración que causa condiciones de carga no aceptables, por ejemplo, excesivos espacios libres.

## CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

### III.1 Tipo de investigación

El presente trabajo especial de grado se puede clasificar como un trabajo de investigación del tipo documental y experimental. Tipo documental ya que tiene como objetivo analizar diferentes fenómenos que se presentan en la realidad, haciendo uso como recurso principal los diferentes tipos de documentos que produce la sociedad y a los cuales se tiene acceso, ya que este trabajo estudia el efecto de las acciones a las cuales se encuentra sometida una tubería submarina durante su proceso de instalación mediante el empleo de la configuración de tendido en S a partir de datos ya establecidos. Y tipo experimental ya que se llevan a cabo hojas de cálculo, modelos numéricos y parametrización del proceso de instalación, a partir de lo cual se emiten unos resultados y conclusiones.

### III.2 Niveles de exploración

Se pretende dar a conocer a partir de este trabajo especial de grado el procedimiento para realizar el análisis de las cargas actuantes sobre la tubería durante su proceso de instalación y los efectos de estas sobre la tubería, de tal manera que se pueda parametrizar dicho proceso de instalación.

#### III.2.1 Estudio del proceso de instalación de tuberías submarinas desde una embarcación de ensamblaje y tendido mediante la configuración de tendido en S

Esta etapa, fundamental para la investigación, consiste en el estudio del proceso de instalación de tuberías submarinas haciendo uso de la bibliografía experimentada, destacando el Trabajo especial de doctorado “*Offshore Pipelaying Dynamics*” (Jensen G. (2010)) y la norma DNVGL-ST-F101 “*Submarine Pipeline Systems*”, aunados a una serie de libros y normativas sobre las cargas actuantes sobre la tubería durante el proceso de instalación y las propiedades de esta, de tal forma que se pueda evaluar si puede soportar las sollicitaciones a las cuales se encuentra sometida.

#### III.2.2 Desarrollo de guía y hojas de cálculo para el desarrollo del proceso de instalación de tuberías submarinas mediante la configuración de tendido en S

Luego de estudiar una serie de conceptos inherentes a este tipo de instalación de tuberías submarinas, se lleva a cabo una guía donde se muestra la metodología de cálculo a ser utilizada

para este proceso de instalación, para posteriormente crear hojas de cálculo que permitan realizar de manera más ágil los cálculos requeridos.

### **III.2.3 Modelado del proceso de instalación de la tubería**

Una vez determinadas las condiciones de instalación de la tubería para cada uno de los casos planteados, y haciendo uso de las hojas de cálculo realizadas mediante el uso de elementos finitos en el programa SAP2000 V.20, se llevaron a cabo los modelos idealizados de la instalación, para de esta manera obtener las solicitaciones a las cuales se encuentra la tubería.

### **III.2.4 Interpretación, análisis de resultados y parametrización del proceso de instalación de la tubería**

Luego de realizar la simulación de los modelos, se procede a extraer los resultados de los mismos, con la finalidad de evaluarlos y determinar si ante estas solicitaciones la tubería posee la suficiente capacidad estructural como para soportarlas según lo establecido en la norma DNVGL-ST-F101, y de esta forma parametrizar el proceso de instalación de la tubería una vez valoradas estas condiciones.

### **III.2.5 Conclusiones y recomendaciones**

Posterior a la realización de los modelos y el análisis de los resultados obtenidos a partir de estos, se emiten las conclusiones y recomendaciones que se deben tener en cuenta durante el proceso de instalación de tuberías submarinas mediante la configuración de tendido en S.

### **III.2.6 Elaboración de tomo**

La elaboración del tomo se lleva a cabo en paralelo con todos los procesos expuestos anteriormente, de tal manera, que al finalizar los modelos y el correspondiente análisis de los datos el tomo fuera culminado.

## **CAPÍTULO IV. DESARROLLO**

### **IV.1 Descripción del proyecto**

El proyecto consiste en realizar la simulación y análisis de la instalación de tuberías submarinas desde una embarcación de ensamblaje y tendido mediante la configuración de tendido en S, a través del software SAP2000 V.20. Para ello se emplearán condiciones similares a las del entorno costa afuera venezolano, definiendo un rango de aplicación del proyecto entre 20 m y 160 m de profundidad, de tal forma que los escenarios en los que se simula la instalación de la tubería submarina sean similares a aquellos en los que se ejecutan este tipo de proyectos al norte del país.

El proyecto considera el empleo de tuberías de 14", 16" y 18" de diámetro para el rango de profundidades anteriormente identificado. Estas tuberías tienen diámetros comerciales empleados en distintos proyectos para el transporte de hidrocarburos en Venezuela, por lo que se posee referencia de su uso y funcionamiento bajo las condiciones de simulación que se aplican. Para el análisis del proceso de instalación de estas tuberías se toman en consideración los parámetros establecidos en la norma DNVGL-ST-F101, de tal forma que se verifiquen los mismos y se pueda determinar si bajo las sollicitaciones a las cuales se encuentra sometida la tubería es viable o no realizar la instalación.

### **IV.2 Características y propiedades mecánicas de las tuberías**

#### **IV.2.1 Especificaciones de los materiales**

Según lo establecido en la norma el acero empleado en las tuberías submarinas debe poseer una resistencia mínima a la cedencia de 65 ksi, por lo que las tuberías utilizadas para el desarrollo del proyecto son del acero grado X65, el cual posee las características presentadas en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Propiedades del acero grado X65 empleado en las tuberías.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Peso específico del acero de la tubería	$\gamma_p$	7850	kgf/m <sup>3</sup>
Esfuerzo de cedencia mínimo especificado del acero	SMYS	65	ksi
		448	MPa
Esfuerzo de tensión último mínimo especificado del acero	SMTS	77	ksi
		531	MPa
Módulo de Young del acero	E	2100000	kgf/cm <sup>2</sup>

En cuanto al concreto empleado para el revestimiento de la tubería, se expone en la norma DNVGL-ST-F101 que este debe tener una resistencia a la compresión mínima de 40 MPa, además de un peso tal que ayude a la tubería con la estabilidad durante su vida útil, por lo que se emplea un concreto con las características indicadas en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Propiedades del concreto de revestimiento empleado en las tuberías.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Peso específico del concreto de revestimiento	$\gamma_c$	2600	kgf/m <sup>3</sup>
Resistencia a la compresión mínima	$f'_c$	40	MPa
Módulo de Young del concreto	$E_c$	304960.2	kgf/cm <sup>2</sup>

#### IV.2.2 Propiedades geométricas

Una vez definidos los materiales que conforman la tubería y el revestimiento de la misma según lo indicado en la norma, se tiene que a partir de las condiciones de conducción hidráulica se debe definir el diámetro de la tubería, en este caso, debido a que este análisis es realizado previo a la instalación de la tubería, se asume que estos cálculos fueron realizados, adoptando como diámetros de tubería 14", 16" y 18", de tal forma que se puedan comparar los resultados obtenidos para cada uno de estos casos. En cuanto al espesor de la tubería se emplea 0.5" para todos los casos, siendo este mayor al dado por cuestiones de presión interna de la tubería, y un espesor del revestimiento de concreto de 2", mayor al mínimo recomendado por la norma. Para cada uno de los diámetros comerciales adoptados para la realización de los modelos de instalación se tienen las características mostradas en las Tablas 10, 11 y 12.

**Tabla 10.** Propiedades geométricas de la Tubería de 14” de diámetro.**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Diámetro exterior de la tubería	Do	14	pulg
		0.356	m
Espesor de la tubería	t	0.5	pulg
		0.0127	m
Diámetro interno de la tubería	Di	13	pulg
		0.330	m
Espesor del revestimiento de concreto	tc	2	pulg
		0.051	m
Diámetro total de la tubería	D	18	pulg
		0.457	m
Área tubería de acero	A	136.810	cm <sup>2</sup>
Área de recubrimiento de concreto	Ac	648.586	cm <sup>2</sup>
Momento de inercia de la sección de acero	I	20135.452	cm <sup>4</sup>
Momento de inercia de la sección de concreto	Ic	135993.477	cm <sup>4</sup>
Constante empírica	Kc	0.250	
Factor de mejora de la rigidez del concreto	CSF	0.246	
Módulo de Young equivalente	Eeq	2617421.796	kgf/cm <sup>2</sup>

**Tabla 11.** Propiedades geométricas de la Tubería de 16” de diámetro.**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Diámetro exterior de la tubería	Do	16	pulg
		0.406	m
Espesor de la tubería	t	0.5	pulg
		0.0127	m
Diámetro interno de la tubería	Di	15	pulg
		0.381	m
Espesor del revestimiento de concreto	tc	2	pulg
		0.051	m
Diámetro total de la tubería	D	20	pulg
		0.508	m
Área tubería de acero	A	157.079	cm <sup>2</sup>
Área de recubrimiento de concreto	Ac	729.658	cm <sup>2</sup>
Momento de inercia de la sección de acero	I	30465.726	cm <sup>4</sup>
Momento de inercia de la sección de concreto	Ic	193006.127	cm <sup>4</sup>
Constante empírica	Kc	0.250	
Factor de mejora de la rigidez del concreto	CSF	0.235	
Módulo de Young equivalente	Eeq	2593170.260	kgf/cm <sup>2</sup>

**Tabla 12.** Propiedades geométricas de la Tubería de 18” de diámetro.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Diámetro exterior de la tubería	Do	18	pulg
		0.457	m
Espesor de la tubería	t	0.5	pulg
		0.0127	m
Diámetro interno de la tubería	Di	17	pulg
		0.432	m
Espesor del revestimiento de concreto	tc	2	pulg
		0.051	m
Diámetro total de la tubería	D	22	pulg
		0.559	m
Área tubería de acero	A	177.348	cm <sup>2</sup>
Área de recubrimiento de concreto	Ac	810.731	cm <sup>2</sup>
Momento de inercia de la sección de acero	I	43836.239	cm <sup>4</sup>
Momento de inercia de la sección de concreto	Ic	264141.177	cm <sup>4</sup>
Constante empírica	Kc	0.250	
Factor de mejora de la rigidez del concreto	CSF	0.226	
Módulo de Young equivalente	Eeq	2574984.380	kgf/cm <sup>2</sup>

### IV.2.3 Propiedades físicas

Una vez definidos los materiales que conforman las tuberías, y las dimensiones de estas, a partir del peso específico de los materiales se determina el peso propio de las tuberías, presentado para cada tubería en las Tablas 14, 15 y 16. Para el caso en que las tuberías se modelen de tal forma que la instalación de estas se realice en condición llena, es decir, que se emplee algún fluido para otorgarle peso a la tubería, se utiliza agua a 25 °C, cuyas propiedades se indican en la Tabla 13, siendo este es el fluido más implementado en este tipo de proceso.

**Tabla 13.** Propiedades del agua en función de la temperatura.

**Fuente:** Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205.

Temperature [°C]	Density, $\rho$ , [kg/m <sup>3</sup> ]			Kinematic viscosity, $\nu$ , [m <sup>2</sup> /s]		
	Fresh water	Sea water*	Dry air**	Fresh water	Sea water*	Dry air
0	999.8	1028.0	1.293	$1.79 \times 10^{-6}$	$1.83 \times 10^{-6}$	$1.32 \times 10^{-5}$
5	1000.0	1027.6	1.270	1.52	1.56	1.36
10	999.7	1026.9	1.247	1.31	1.35	1.41
15	999.1	1025.9	1.226	1.14	1.19	1.45
20	998.2	1024.7	1.205	1.00	1.05	1.50
25	997.0	1023.2	1.184	0.89	0.94	1.55
30	995.6	1021.7	1.165	0.80	0.85	1.60

**Tabla 14.** Peso propio Tubería de 14" de diámetro.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Peso seco de la tubería	$W_d$	107.397	kgf/m
Peso seco del revestimiento de concreto	$W_{dc}$	168.632	kgf/m
Peso del contenido de la tubería	$W_{pc}$	85.377	kgf/m
Peso del volumen de agua desplazado	$W_{disp}$	167.982	kgf/m
Peso sumergido de la tubería vacía	$W_s$	108.047	kgf/m
Peso sumergido de la tubería llena	$W_{sl}$	193.424	kgf/m

**Tabla 15.** Peso propio Tubería de 16" de diámetro.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Peso seco de la tubería	$W_d$	123.307	kgf/m
Peso seco del revestimiento de concreto	$W_{dc}$	189.711	kgf/m
Peso del contenido de la tubería	$W_{pc}$	113.667	kgf/m
Peso del volumen de agua desplazado	$W_{disp}$	207.385	kgf/m
Peso sumergido de la tubería vacía	$W_s$	105.633	kgf/m
Peso sumergido de la tubería llena	$W_{sl}$	219.300	kgf/m

**Tabla 16.** Peso propio Tubería de 18" de diámetro.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Peso seco de la tubería	$W_d$	139.218	kgf/m
Peso seco del revestimiento de concreto	$W_{dc}$	210.790	kgf/m
Peso del contenido de la tubería	$W_{pc}$	145.999	kgf/m
Peso del volumen de agua desplazado	$W_{disp}$	250.936	kgf/m
Peso sumergido de la tubería vacía	$W_s$	99.072	kgf/m
Peso sumergido de la tubería llena	$W_{sl}$	245.071	kgf/m

### IV.3 Cálculos realizados

Una vez determinadas las propiedades de las tuberías, previo a la realización de los modelos, es necesario determinar ciertos factores necesarios para llevar a cabo estos, los cuales son determinados a través de las hojas de cálculo realizadas.

Los cálculos llevados a cabo tienen como finalidad determinar la longitud del *overbend*, la cual se considera igual a la longitud requerida para el *stinger*, la longitud del *sagbend* y la tensión mínima a aplicar a la tubería de tal forma que se pueda realizar la instalación de esta mediante la configuración en S adecuadamente.

En primera instancia se llevan a cabo los cálculos referentes al *overbend* y por consiguiente al *stinger*, con la finalidad de determinar la longitud de este, así como la profundidad a la cual debe sumergirse el mismo para realizar una adecuada instalación, tal y como se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Parámetros calculados para Región *Overbend*.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Unidad
Factor de diseño	DF	-
Radio mínimo del <i>stinger</i> para el S-Lay	R	m
Profundidad requerida del lanzamiento del agujón	H <sub>st</sub>	m
Ángulo de lanzamiento del agujón	$\theta = \cos^{-1}(R - H_{st} / R)$	°
Proyección horizontal del agujón de lanzamiento	L <sub>st</sub>	m
Longitud requerida del agujón de lanzamiento	S <sub>st</sub>	m

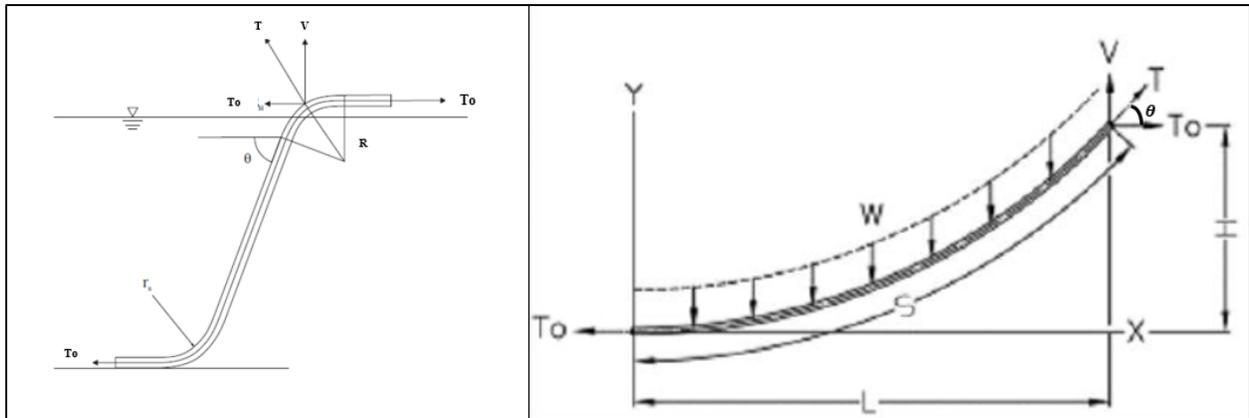
**Tabla 18.** Parámetros calculados para Región *Sagbend*.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Unidad
Altura de diseño del <i>Sagbend</i>	H = d - H <sub>st</sub>	m
Tensión requerida en el punto de despegue de la tubería	T	Ton
Componente Horizontal de T	T <sub>o</sub>	Ton
Componente Vertical de T	V	Ton
Longitud del tramo libre	S	m
Proyección Horizontal del tramo libre	L	m
Ángulo de lanzamiento del agujón	$\theta = \tan^{-1}(V/T_o)$	°

La hoja de cálculo contiene un cálculo iterativo o cíclico, en el cual la determinación de la profundidad requerida del lanzamiento del agujón o *stinger* (H<sub>st</sub>) varía hasta que el ángulo de lanzamiento de este sea igual tanto por los cálculos realizados en la región *overbend*, como en la región *sagbend* (véase Figura 20); se está hablando del mismo ángulo de lanzamiento y el mismo término H<sub>st</sub> en el cálculo de ambas regiones, una vez que los ángulos de lanzamiento coincidan

luego del proceso iterativo, se obtiene el valor de  $H_{st}$  y, por consiguiente, todos los demás términos que se desean calcular.



**Figura 20.** Determinación de ángulo de lanzamiento del *stinger*.

**Fuente:** Propia.

En el caso de la región *overbend*, para la determinación de cada uno de estos términos se realizan los siguientes cálculos:

- $R$ : es determinado a partir de la Ecuación Ec-10 expuesta en el Capítulo II.
- $H_{st}$ : es determinado una vez haya concluido el proceso iterativo.
- $\theta$ : en el caso del *overbend* el ángulo de lanzamiento del *stinger* se determina a partir de la relación trigonométrica entre las dimensiones del radio del *stinger* y la profundidad de lanzamiento del *stinger*, a partir de la ecuación expuesta en la Tabla 17.
- $L_{st}$ : es determinada a partir de la proyección de la dimensión del radio de este en el eje horizontal con el ángulo de lanzamiento del mismo.
- $S_{st}$ : es determinado a partir de la multiplicación del radio del *stinger* por el ángulo de lanzamiento del mismo.

En cuanto a la región *sagbend*, para la determinación de cada uno de estos términos se realizan los siguientes cálculos:

- H: es la diferencia entre la profundidad del agua y la profundidad requerida de lanzamiento del *stinger*, es decir, la distancia vertical entre el fondo marino y el punto de despegue de la tubería y el *stinger*.
- T: es determinada a partir de la Ecuación Ec-7 expuesta en el Capítulo II.
- V: el componente vertical de la tensión se determina a partir del peso de la tubería en el tramo libre de la tubería, es decir, el peso de la tubería que no se encuentra en el *stinger*. Este se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$V = W_S * S \quad (\text{Ec - 79})$$

- T<sub>0</sub>: una vez determinada la tensión requerida en el punto de despegue de la tubería, y el componente vertical de la misma, haciendo uso del teorema de Pitágoras se puede determinar la proyección horizontal de esta.

$$T_0 = \sqrt{T^2 - V^2} \quad (\text{Ec - 80})$$

- S: es determinado a partir de la Ecuación Ec-14 expuesta en el Capítulo II.
- L: es determinada a partir de la Ecuación Ec-15 expuesta en el Capítulo II.
- $\theta$ : en el caso del *sagbend* el ángulo de lanzamiento del *stinger* se determina a partir del ángulo que forma la tensión requerida con respecto a la horizontal, a partir de la ecuación expuesta en la Tabla 18.

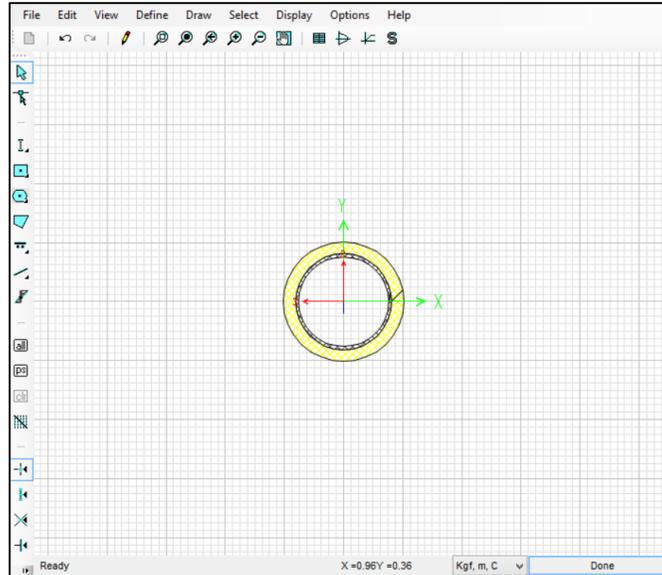
#### **IV.4 Desarrollo de modelos de instalación de tuberías submarinas**

Los modelos de instalación de tuberías submarinas mediante la configuración en S se realizan en el programa SAP2000 V.20, a partir de los resultados obtenidos en los cálculos realizados en las hojas de cálculo y las condiciones de instalación.

##### **IV.4.1 Diseño de la tubería**

###### **IV.4.1.1 Definición de los materiales y secciones de las tuberías**

Conociendo las propiedades de los materiales a emplear en las tuberías (acero de grado X65 y concreto) se definen estos en el programa, de tal forma que se puedan asignar a los elementos definidos como tuberías. Una vez definidos los materiales, se crea un “Frame Section” con las características de la tubería, es decir, el material, el diámetro y el espesor de esta, además de incluir el revestimiento de concreto, tal y como se puede apreciar en la Figura 21, donde la tubería de acero (de color gris) se encuentra recubierta por lo que se simula como una tubería de concreto (de color amarillo). En la Figura 22 se pueden apreciar las propiedades de dicha sección.



**Figura 21.** Diseño de la tubería de 16” de diámetro.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

Section Name: Tubería 16"			
<b>Properties</b>			
Cross-section (axial) area	0.0263	Section modulus about 3 axis	2.303E-03
Moment of Inertia about 3 axis	5.849E-04	Section modulus about 2 axis	2.303E-03
Moment of Inertia about 2 axis	5.849E-04	Plastic modulus about 3 axis	2.893E-03
Product of Inertia about 2-3	0.	Plastic modulus about 2 axis	2.893E-03
Shear area in 2 direction	0.0181	Radius of Gyration about 3 axis	0.1491
Shear area in 3 direction	0.0181	Radius of Gyration about 2 axis	0.1491
Torsional constant	1.200E-03	Shear Center Eccentricity (x3)	0.

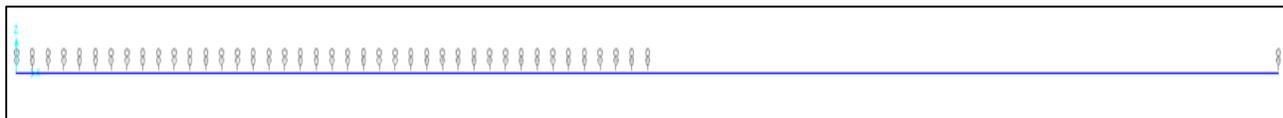
**Figura 22.** Propiedades de la tubería de 16” de diámetro diseñada. (Unidades indicadas en la Figura 20).

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

#### IV.4.1.2 Distribución de los ejes estructurales

Una vez modelada la sección de la tubería, se definen los ejes estructurales (“Grids”) en los cuales se asigna esta, de tal forma que se pueda identificar tanto la región *overbend*, como la

región *sagbend*, como se muestra en la Figura 23. Las longitudes asignadas a estas regiones mencionadas corresponden a las proyecciones horizontales determinadas mediante las hojas de cálculo, puesto que la longitud total, la cual considera la deformación de la tubería, se adquiere una vez se ha desarrollado el modelo y la tubería se deforma según lo estipulado.



**Figura 23.** Distribución de ejes estructurales de la tubería.

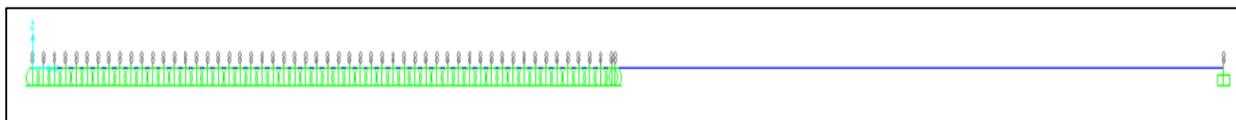
**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

La finalidad de definir los ejes estructurales, además de identificar las dos regiones de la tubería, es que en el programa SAP2000 V.20 al identificar los ejes estructurales puede asignar con mayor facilidad y precisión los apoyos o restricciones que sean necesarios asignar a la tubería.

#### **IV.4.1.3 Asignación de restricciones y desplazamientos**

Una vez definida la tubería y la distribución de los ejes estructurales de la misma, se asignan las correspondientes restricciones en el programa, las cuales, dado que se trata de un *stinger* o agujón, son simuladas a través de apoyos móviles o rodillos (como se puede apreciar en la Figura 24), restringiendo así únicamente el desplazamiento vertical de la tubería, asemejándose a lo que realmente ocurre en la barcaza durante el proceso de instalación de la tubería, ya que el *stinger* solo permite que se apoye sobre este la tubería. En este caso, los apoyos asignados se encuentran a una distancia de 1 m entre ellos, simulando la distancia que hay entre los rodillos del *stinger*.

En el caso del *Touchdown Point* se restringen todos los desplazamientos, esto mediante un empotramiento en dicho punto, ya que la tubería debe llegar al fondo marino y además se empotra en él, ya que en caso de que se posea otra tubería con la cual se deba conectar esta que se está instalando, se debe garantizar que se pueda llevar a dicho punto.



**Figura 24.** Tubería con restricciones asignadas.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

Luego de la asignación de las restricciones, como se mencionó previamente en el Capítulo II, el *stinger* durante el proceso de instalación mediante la configuración en S debe adoptar la forma de una circunferencia, de tal forma que sean aplicables los conceptos de la teoría de la catenaria natural, por lo que es necesario asignarle a cada uno de los nodos de la tubería dentro de los límites del *stinger* tanto el desplazamiento vertical, como el horizontal, determinados haciendo uso del ángulo de lanzamiento del agujón determinado y a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta x = X - R \operatorname{sen}(\beta) \quad (\text{Ec - 81})$$

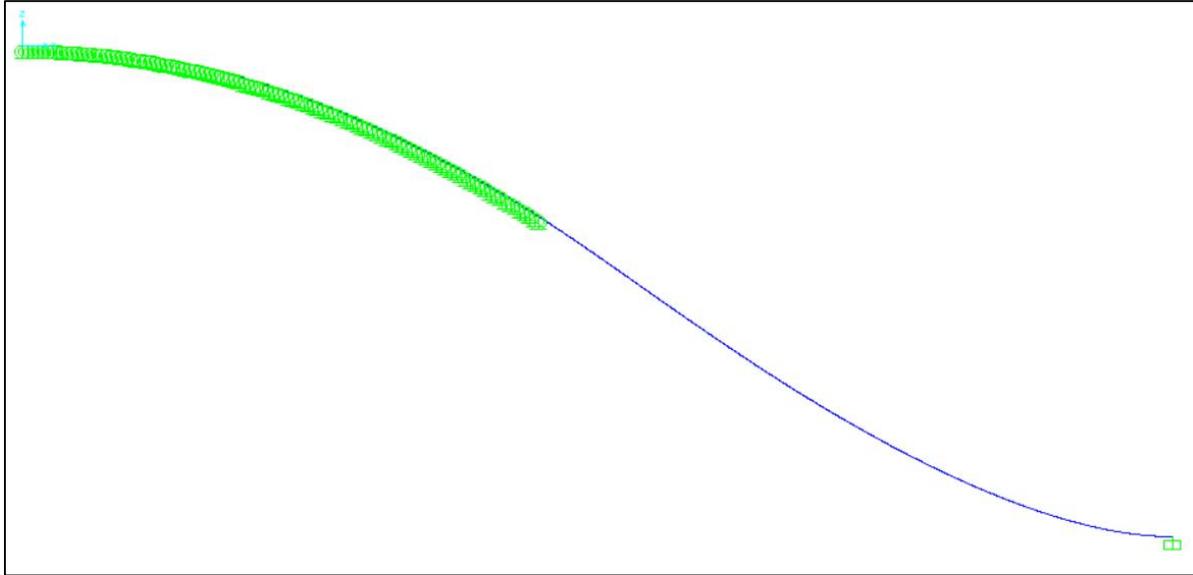
$$\Delta y = R - R \operatorname{cos}(\beta) \quad (\text{Ec - 82})$$

Donde:

$$\beta = \frac{x}{R} \quad (\text{Ec - 83})$$

De esta manera se simula la forma circular del *stinger*, la cual adquirirá la tubería deformada por su propio peso mientras está apoyada en los rodillos, ya que esta se fabrica en línea recta y solo adquiere la forma de S durante la instalación, así como se ilustra en la Figura 25.

En el caso del empotramiento establecido en el *Touchdown Point* se asigna un desplazamiento vertical igual a la profundidad de instalación de la tubería, ya que este punto debe coincidir con el lecho marino.



**Figura 25.** Deformada de tubería de 16” de diámetro instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

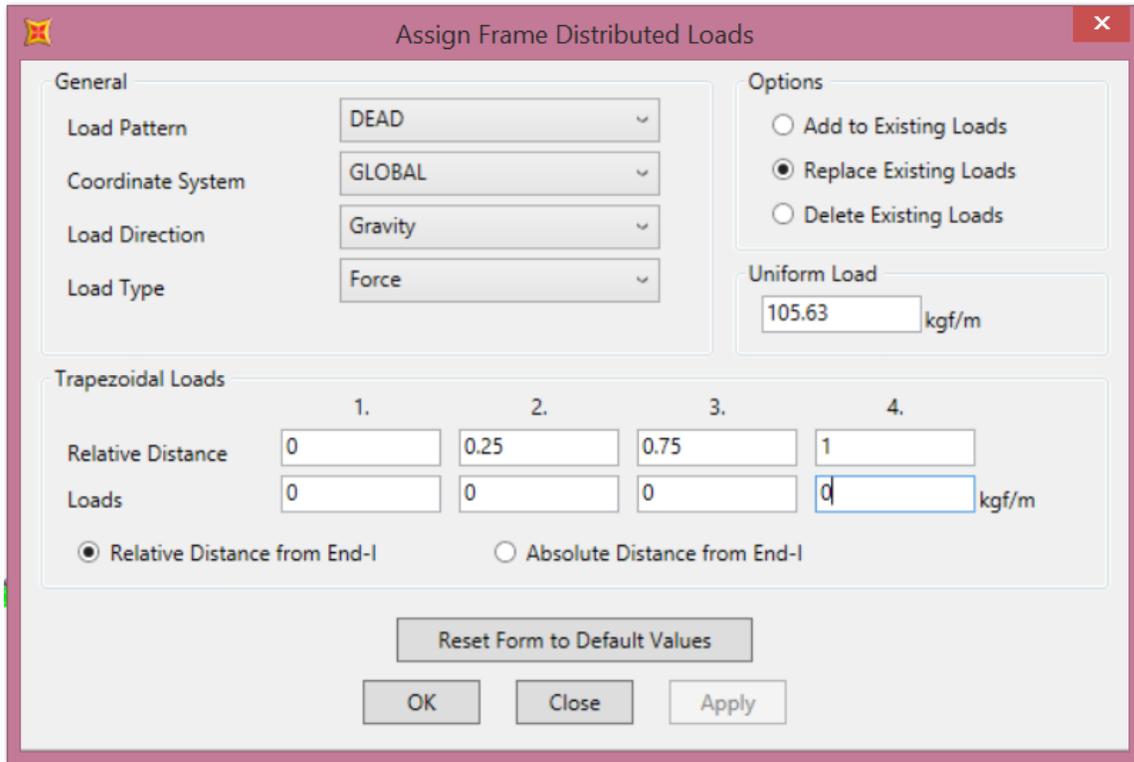
#### **IV.4.2 Definición de acciones sobre la tubería**

Luego de asignar los desplazamientos correspondientes a cada uno de los apoyos, para de esta forma definir el proceso de instalación mediante la configuración en S, es necesario asignar las cargas que están actuando sobre la tubería durante el proceso de instalación.

##### **IV.4.2.1 Acciones gravitacionales (Peso Propio)**

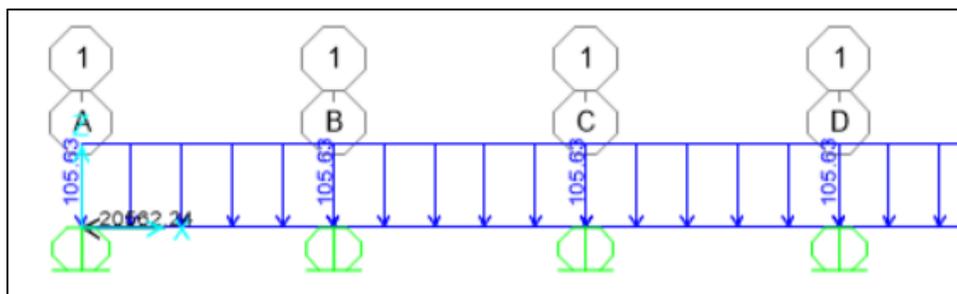
El programa SAP2000 V.20 es capaz de emplear el peso propio de la tubería como una carga distribuida sin necesidad de asignar ninguna carga, ya que a partir de la sección de tubería definida y las propiedades de la misma, este puede calcular el peso propio de la tubería. Pero en vista de que en todos los casos es necesario considerar el efecto del empuje del agua, a causa de la flotación, es preferible asignar una carga distribuida que considere tanto el peso de la tubería, como el empuje del agua, valor determinado previamente haciendo uso de las hojas de cálculo y que se asigna en el programa como se puede visualizar en la Figura 26 (donde se indica que es carga DEAD, en el sentido de la gravedad y con el valor calculado previamente). Al asignar esta carga distribuida, la cual se visualiza en el programa SAP2000 V.20 como se ilustra en la Figura 27; es necesario desactivar la opción que da el programa de que actúe el peso propio de la tubería, ya que, de hacerlo, este se estaría considerando dos veces. Hacerlo de esta manera garantiza, además, que al asignar la carga distribuida en el caso de los modelos que se realicen con la tubería llena,

solo se tenga que asignar una carga distribuida igual a la determinada en las hojas de cálculo, y no un peso adicional únicamente generado por el fluido dentro de la tubería.



**Figura 26.** Asignación de carga distribuida por peso de la tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.



**Figura 27.** Carga distribuida por peso propio aplicada sobre un tramo de la tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

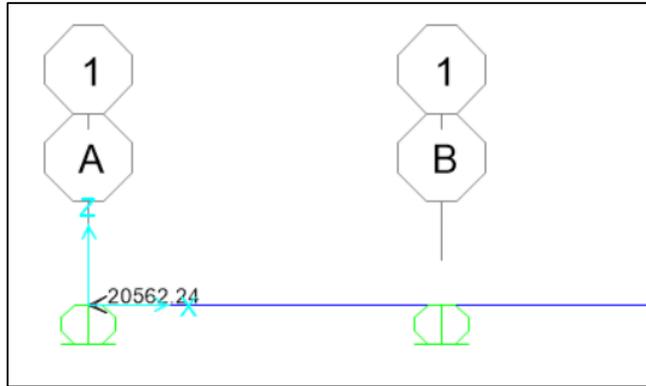
#### IV.4.2.2 Tensión aplicada por la barcaza

Como fue explicado en el Capítulo II, es necesario aplicar una tensión a la tubería que permita que la curvatura generada en la región *sagbend* sea controlada, con la finalidad de evitar excesiva flexión, pandeo local y posible colapso de la tubería. En el modelo, esta tensión aplicada por la barcaza se asigna como una fuerza horizontal (negativa, como se indica en la Figura 28, ya que en el programa se posee el sentido positivo del eje X hacia la derecha, y esta fuerza va hacia la izquierda dado el sentido en que se está instalando la tubería) al punto de la tubería en contacto con la barcaza, es decir, el punto de inicio de la tubería para los efectos del modelo, tal y como se muestra en la Figura 29, para de esta forma certificar la distribución de esta fuerza a lo largo de la tubería, y por ende tener la misma fuerza axial a lo largo de toda la tubería durante el proceso de instalación.

Section	Parameter	Value	Unit
General	Load Pattern	DEAD	
	Coordinate System	GLOBAL	
Forces	Force Global X	-20562.24	kgf
	Force Global Y	0	kgf
	Force Global Z	0	kgf
	Moment about Global X	0	kgf-m
	Moment about Global Y	0	kgf-m
	Moment about Global Z	0	kgf-m
Options	Add to Existing Loads	<input type="radio"/>	
	Replace Existing Loads	<input checked="" type="radio"/>	
	Delete Existing Loads	<input type="radio"/>	

**Figura 28.** Asignación de tensión requerida sobre la tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

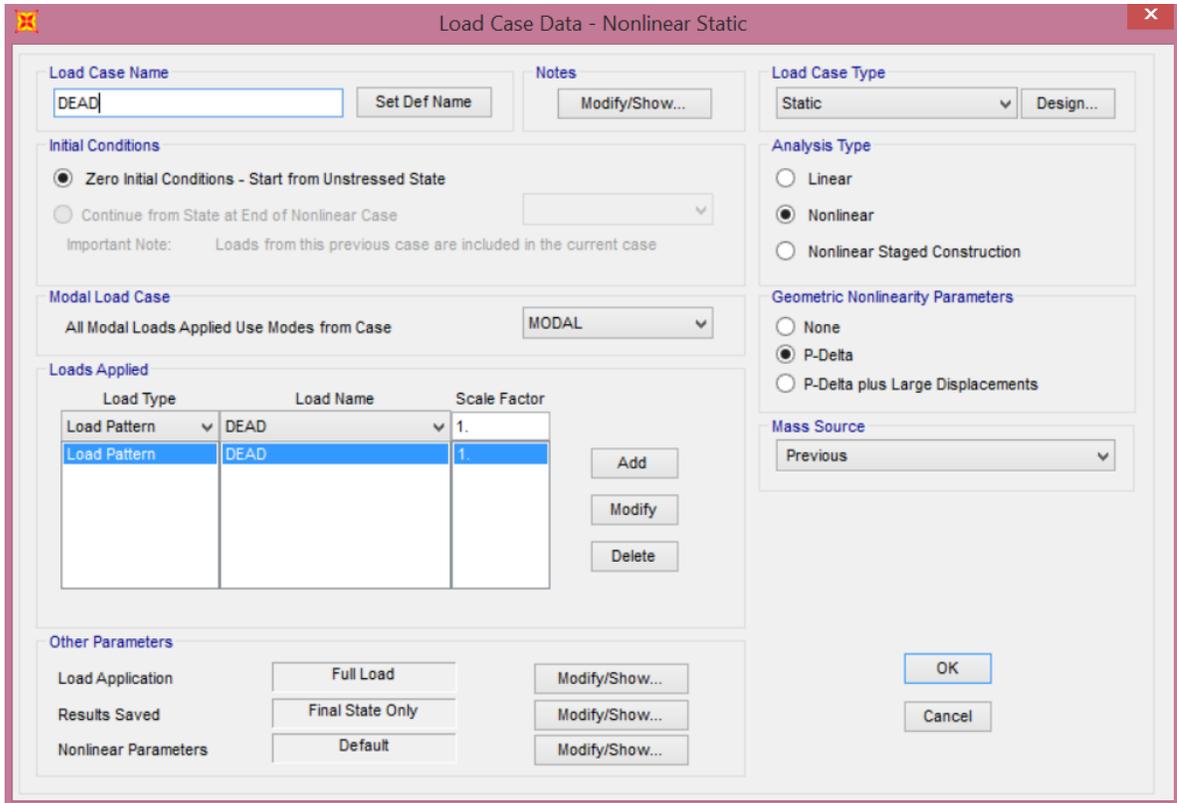


**Figura 29.** Tensión requerida sobre la tubería. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

Tanto esta tensión requerida como los desplazamientos de los apoyos son asignados como carga permanente o “DEAD”, al igual que la carga distribuida del peso propio de la tubería, debido a que estas se encuentran presentes durante todo el proceso de instalación de la tubería, y por ende deben ser consideradas en todo momento.

Todas estas cargas consideradas como permanentes (“DEAD”) son asignadas al mismo caso de carga, siendo este de un tipo de carga estática a partir del cual se realizará un análisis no lineal tomando en consideración el efecto P-Delta, siendo este el efecto de una carga axial sobre el comportamiento de la flexión transversal de los elementos reticulares, donde la compresión axial reduce la rigidez de flexión de los elementos reticulares y la tracción axial rigidiza estos elementos. Esta definición del caso de cargas permanentes en el programa SAP2000 V.20 se puede apreciar en la Figura 30.



**Figura 30.** Caso de carga para cargas permanentes.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

#### IV.4.2.3 Acciones ambientales

##### IV.4.2.3.1 Oleaje

El efecto del oleaje sobre la tubería durante la instalación de esta es considerado a partir de los datos de oleaje en el Mar Caribe indicados en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Datos de oleaje en el Mar Caribe.

**Fuente:** Informe interino de procesamiento e interpretación de datos oceanográficos. Ingeniería de Consulta INCOSTAS, S.A.

Compute Node	13677		
Data Range:	09/01/1930 a	09/18/2010	
Period of Return (Years)	Significant Height (Hs) (m)	Maximum Height (Hmáx)* (m)	Peak period associated with the significant wave height (s)
1	3.00	5.4	9.4
5	4.00	7.2	9.7
10	4.50	8.1	9.7
25	4.65	8.4	9.9
50	5.45	9.8	10.7
75	5.80	10.4	10.7
100	5.95	10.7	10.8
200	6.15	11.1	10.9

\* Estimated from the relationship: Hmáx=1.8Hs

En vista de que a partir del análisis de las condiciones ambientales se define el calendario de instalación de las tuberías submarinas, se emplea como período de retorno 1 año, ya que siempre se buscará realizar la instalación bajo las mejores condiciones ambientales posibles, por lo que no es correcto someter la tubería durante el modelado a condiciones a las cuales no estará sometida.

A partir de los datos del oleaje, se establece la teoría de olas aplicable a este caso, esto haciendo uso de la Figura 10, en la cual se pueden evaluar los rangos de validación de las distintas teorías de olas. Para el uso de dicha figura es necesario determinar los siguientes parámetros:

- Pendiente de la ola (S):

$$S = \frac{2\pi H}{g T^2} = \frac{2\pi * 3}{9.81 * 9.4^2} = 0.0217$$

- Superficie de la ola ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{2\pi d}{g T^2} = \frac{2\pi * 100}{9.81 * 9.4^2} = 0.725$$

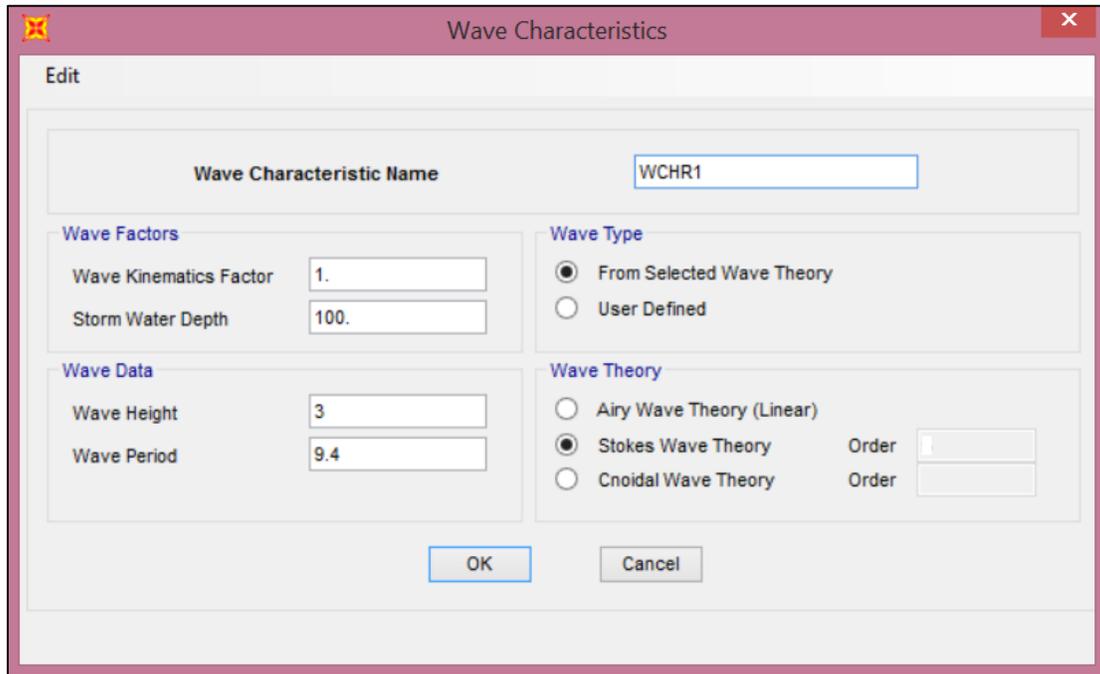
- Número Ursell (Ur):

$$Ur = \frac{H \lambda^2}{d^3} = \frac{3 * 294.41^2}{100^3} = 0.26$$

Con los parámetros obtenidos la teoría de olas ideal a aplicar es la Teoría de olas de Stokes de segundo orden, según lo establecido en la norma DNV-RP-C205 en la Figura 10.

Para la aplicación de la acción del oleaje sobre la tubería en los modelos, el programa SAP2000 V.20 permite a partir de los datos del oleaje, asignar, como se muestra en la Figura 31,

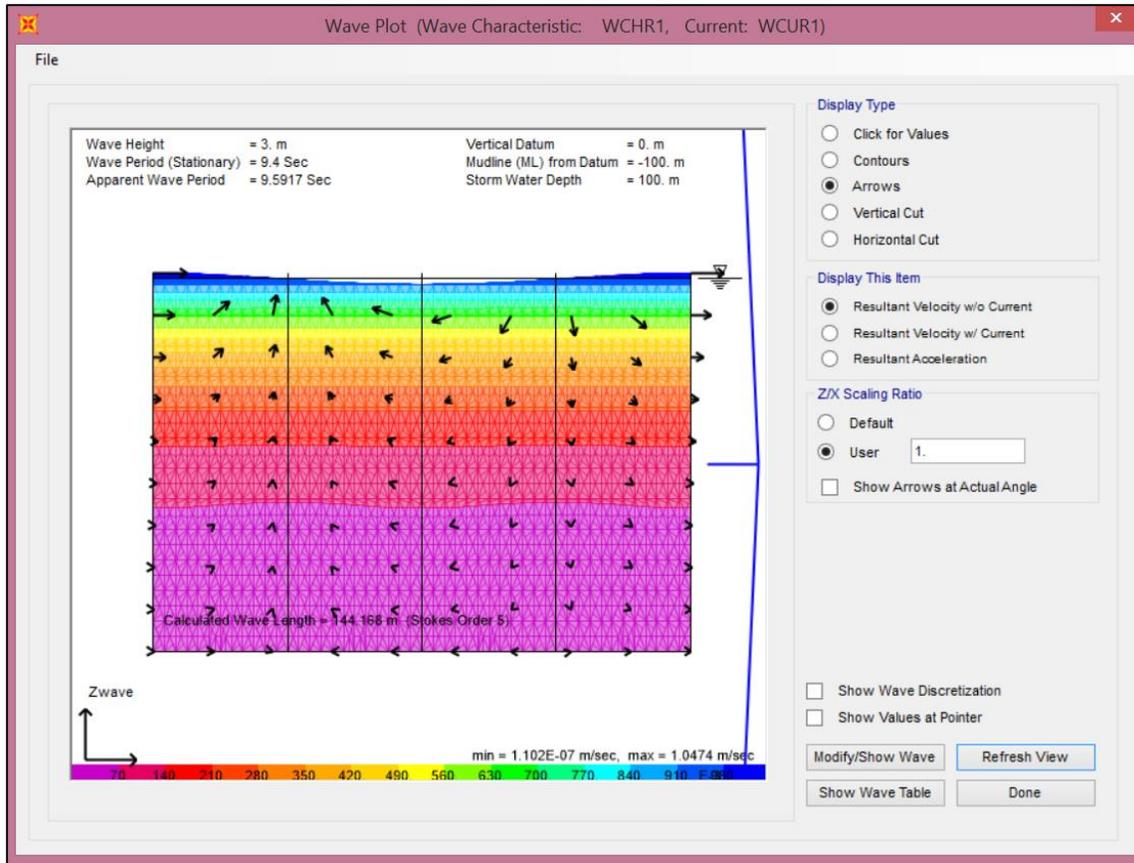
estos datos a una carga particular de oleaje y, según la Teoría de olas seleccionada y la aplicación del concepto de fuerza de arrastre, ejercer sobre la tubería este efecto.



**Figura 31.** Asignación de carga de oleaje sobre la tubería. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

Una vez definida la carga de oleaje, el programa permite graficar la distribución de velocidades del flujo a causa de las olas, como se ilustra en la Figura 32, de tal forma que se puede identificar la profundidad de influencia de la ola sobre la velocidad del flujo y por ende sobre la tubería.



**Figura 32.** Distribución de velocidades del flujo por efecto del oleaje. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

#### IV.4.2.3.1 Corrientes marinas y viento

El efecto de las corrientes marinas y el viento sobre la tubería durante la instalación de esta es considerado a partir de los datos mostrados en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Datos sobre corrientes marinas y viento en el Mar Caribe.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Período de Retorno	TR	1	años
Velocidad de la marea en la superficie	$V_m(0)$	0.25	m/s
Velocidad del viento en la superficie	$V_w(0)$	0.0771	m/s

Para la aplicación de la acción de las corrientes marinas y el viento sobre la tubería en los modelos el programa SAP2000 V.20 permite generar la fuerza de arrastre que ejercen estos efectos

sobre la tubería, esto a partir de los datos de la distribución de velocidades del flujo asociados a la acción tanto de las corrientes marinas, como del viento, determinadas a través de las Ecuaciones Ec-36 y Ec-37 para las profundidades respectivas de cada modelo, mediante el empleo de hojas de cálculo.

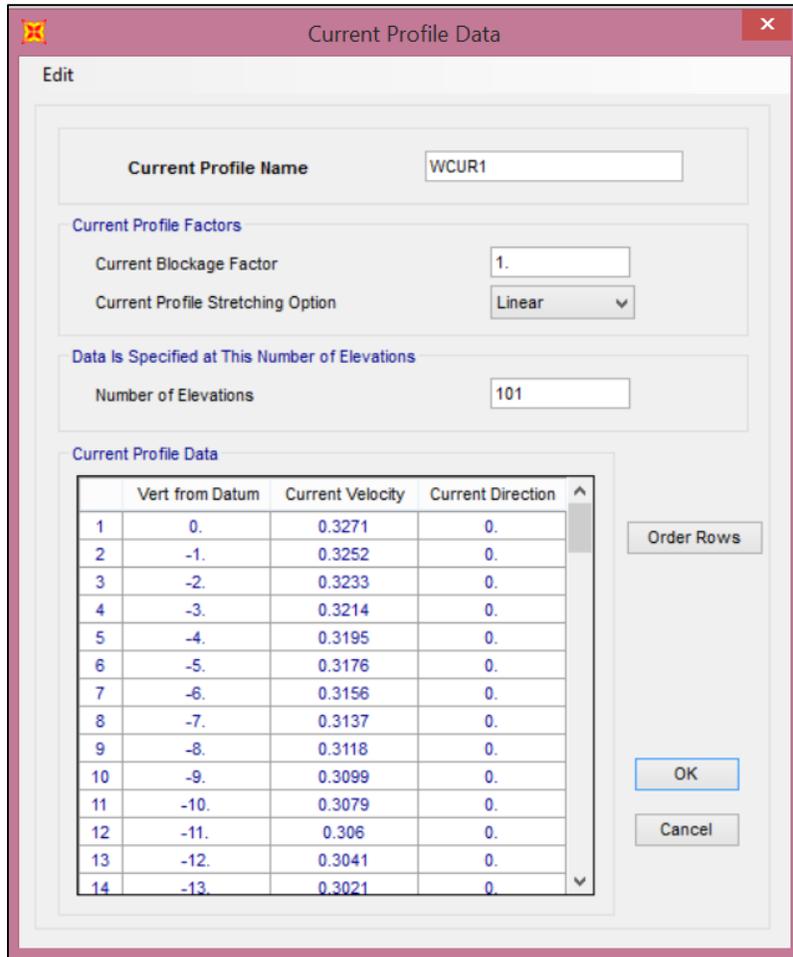
En vista de que el programa no permite la introducción del efecto del viento directamente, se superponen las distribuciones de velocidades del flujo generadas tanto por las corrientes marinas, como por el viento, es decir, se asume que los dos efectos ocurren en simultaneo durante el proceso de instalación de la tubería. En la Tabla 21 se presenta el cálculo realizado para determinar la distribución de velocidades por efecto de marea y viento, en el cual se registran en primera instancia las velocidades de la corriente debido a la marea y al viento para cada profundidad, y luego se suman para obtener la velocidad total de la corriente.

**Tabla 21.** Parámetros calculados para la distribución de velocidades por efecto de marea y viento.

**Fuente:** Propia.

Parámetro	Símbolo	Unidad
Profundidad	$z$	m
Velocidad de la Corriente debido a la Marea	$V_m$	m/s
Velocidad de la Corriente debido al Viento	$V_w$	m/s
Velocidad Total de la Corriente	$V$	m/s

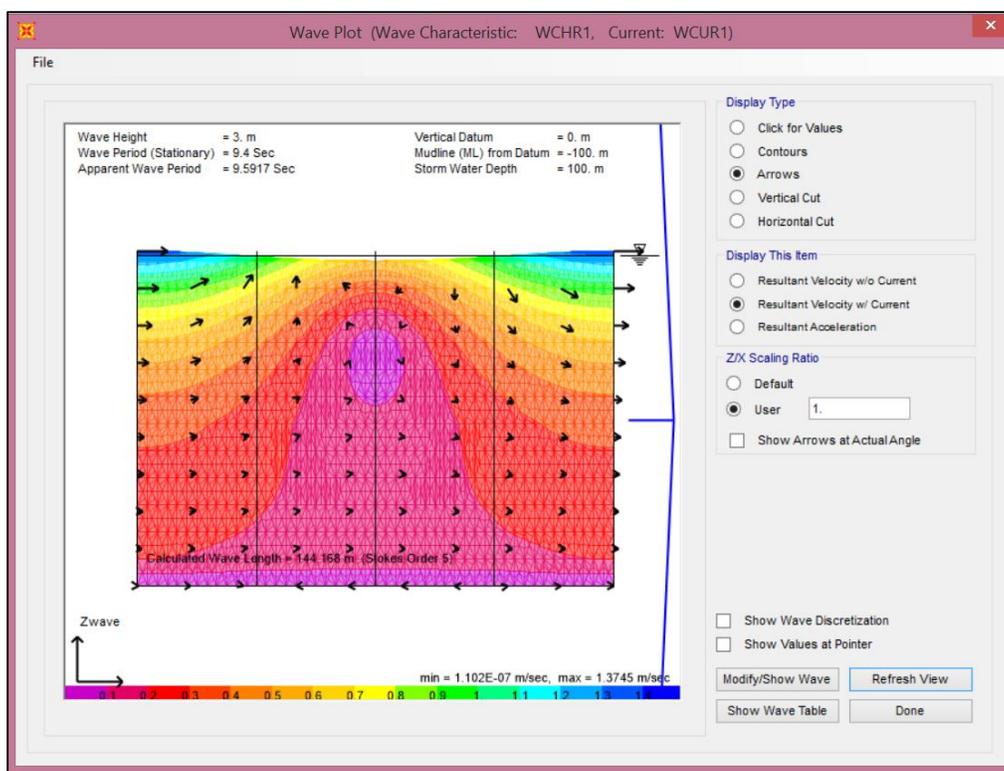
Para cada caso de profundidad se determinaron por separado los perfiles de velocidades generados por mareas y por el viento, según lo estipulado en la norma DNV-RP-C205, luego se superpusieron los efectos, así obteniéndose un perfil de velocidades unificado el cual es introducido en el programa a través de la opción de los datos del perfil de la corriente, como se muestra en la Figura 33.



**Figura 33.** Asignación de carga de corrientes marinas y viento sobre la tubería. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

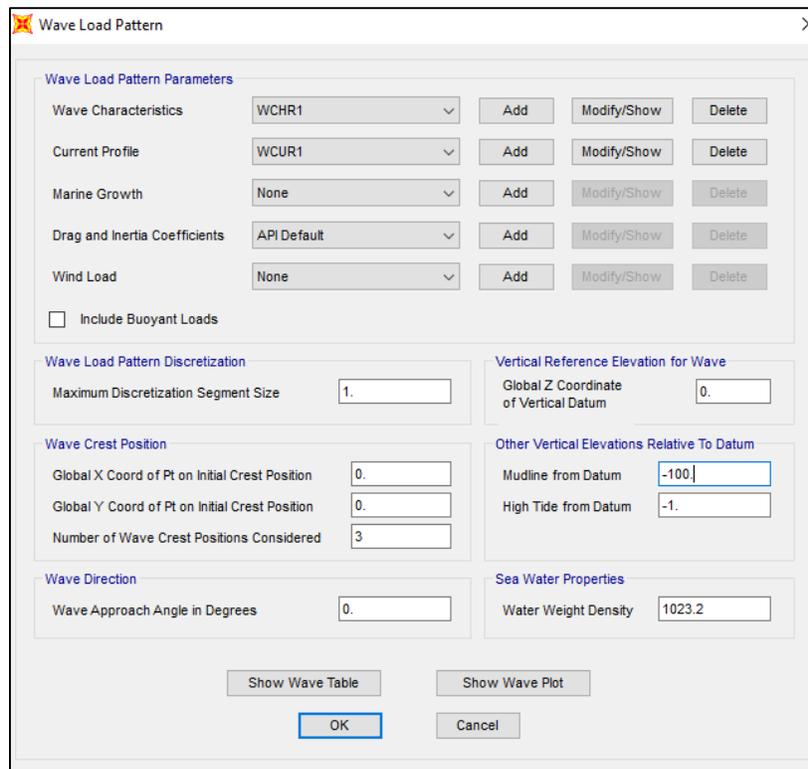
Una vez definida las cargas de marea y viento sobre la tubería, el programa permite graficar la distribución de velocidades del flujo generada por estos efectos junto con la generada por el oleaje, de tal forma que se puede visualizar la superposición de los efectos, y por ende, las condiciones en las cuales realmente se está instalando la tubería, tal y como se ilustra en la Figura 34, en la cual las flechas indican el sentido del flujo, apreciando que el efecto del oleaje a medida que se aumenta la profundidad se va disipando, ya que las líneas del flujo (simuladas con flechas) son prácticamente horizontales a mayor profundidad, y a medida que se va acercando al lecho marino la velocidad del flujo va disminuyendo hasta ser cero en el fondo.



**Figura 34.** Distribución de velocidades del flujo por efecto del oleaje, marea y viento. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20

Al aplicarse la carga ambiental se debe considerar que el miembro no está inundado, ya que esta consideración ya fue tomada al calcular el peso sumergido de la tubería, por el mismo motivo se debe eliminar el efecto de la flotación que el programa estima por defecto. En la Figura 35 se muestra el menú para la definición del patrón de la carga ambiental, observando que se poseen las características de la ola y el perfil de velocidades de la corriente, así como el datum de referencia y densidad del fluido, en este caso agua de mar, cuyas propiedades se indican en la Tabla 13.

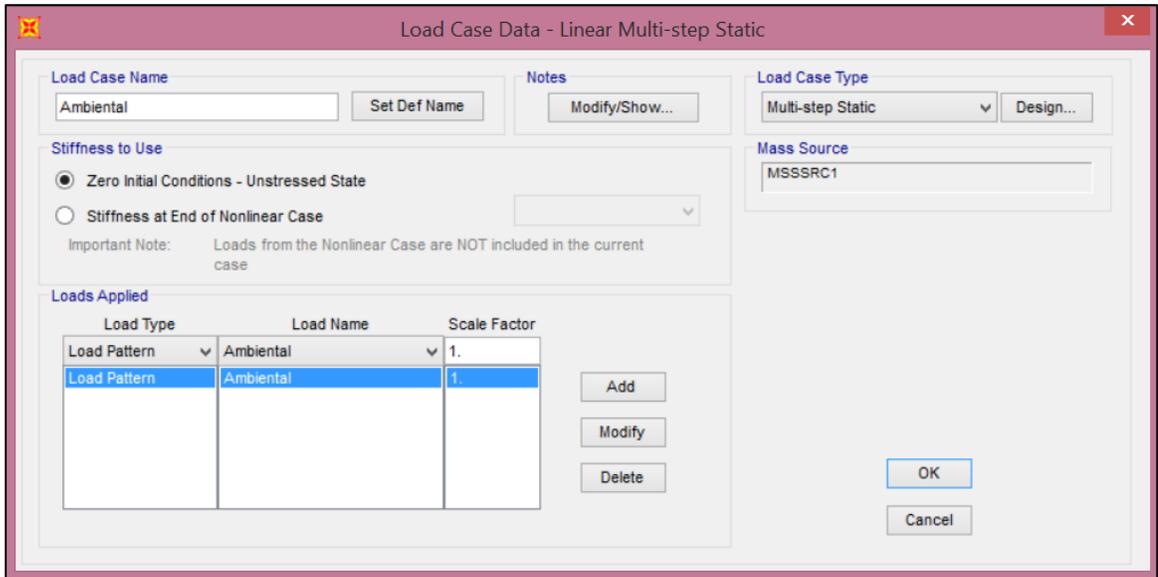


**Figura 35.** Definición de patrón de carga ambiental. Caso de tubería instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

En vista de que el programa lo permite, se consideran tres posiciones del movimiento de la cresta de ola dentro de una distancia equivalente a una longitud de ola, para de esta manera poder evaluar de forma simultánea diferentes estados de esfuerzo según la posición en la cual se encuentre la ola al momento de evaluar la condición de la instalación de la tubería.

Como se muestra en la Figura 36, todas estas cargas consideradas como ambientales son asignadas al mismo caso de carga, el cual es un tipo de carga “Multi-step Static”, es decir, esta carga se aplica luego de que sea aplicada la carga correspondiente al “paso” previo, en este caso, estas condiciones de carga se aplican a la tubería bajo la acción de las cargas permanentes, para de esta manera garantizar que la tubería se ve afectada por las condiciones ambientales cuando se está instalando.



**Figura 36.** Caso de carga para cargas ambientales.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

#### IV.4.3 Definición de combinaciones de carga

A partir de la Ecuación Ec-63 presentada en el Capítulo II, se obtiene que la combinación de carga a ser empleada para el análisis de las solicitaciones generadas sobre la tubería durante el proceso de instalación es:

$$Lsd = 0.96 Lf + 0.7 Le \quad (\text{Ec - 84})$$

Para la asignación de esta combinación de carga al modelo, una vez definidos los casos de carga que se contemplen en la combinación, se crea un caso de carga que incluye estos casos, en el orden en que estos deben ejecutarse, dado que la carga ambiental se considera como de un tipo de carga "Multi-step Static", y se asignan los factores de la combinación de carga, tal y como se muestra en la Figura 37.

**Load Combination Data**

Load Combination Name (User-Generated)

Notes

Load Combination Type

Options

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
DEAD	Nonlinear Static	0.96
DEAD	Nonlinear Static	0.96
Ambiental	Linear Multi-step Static	0.7

**Figura 37.** Asignación de combinación de carga al modelo.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

## CAPÍTULO V. ANÁLISIS, ADAPTACIÓN Y VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA TUBERÍA

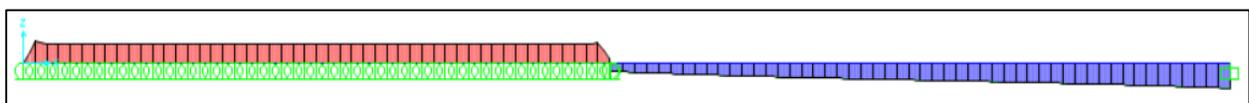
### V.1 Análisis de solicitaciones a las cuales está sometida la tubería

Mediante los modelos de carga conceptualizados e introducidos en el programa SAP2000 V.20 es posible realizar el análisis de las solicitaciones generadas en la tubería durante el proceso de instalación de la misma por la acción de las cargas actuantes, y por consiguiente determinar cada una de estas, para de esta forma determinar si la tubería es capaz de soportar las condiciones de instalación o no.

#### V.1.1 Momento flector o de flexión

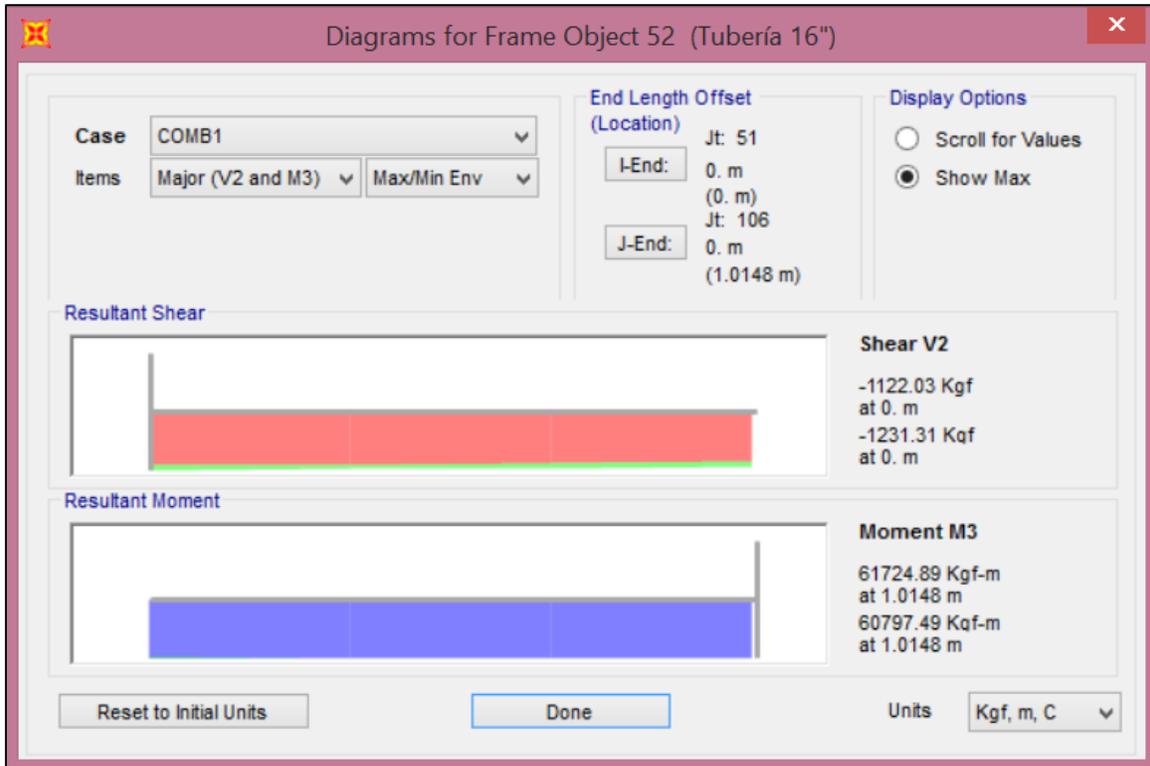
El momento flector o de flexión viene dado fundamentalmente por la curvatura que adquiere la tubería durante el proceso de instalación, influenciado por la presión y la fuerza longitudinal.

Para la determinación de esta solicitación es necesario analizar el modelo realizado en el programa SAP2000 V.20, de tal forma que se apliquen las cargas asignadas según la combinación de cargas definidas, y poder visualizar los resultados del análisis estructural llevado a cabo por el programa. En la Figura 38 se puede apreciar el diagrama de momento flector graficado por el programa a partir de las solicitaciones generadas, y en la Figura 39 el detalle del segmento de tubería con el mayor momento flector.



**Figura 38.** Diagrama de momento flector. Caso de tubería de 16” de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.



**Figura 39.** Diagrama de momento detallado en segmento de tubería con momento máximo. Caso de tubería de 16" de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

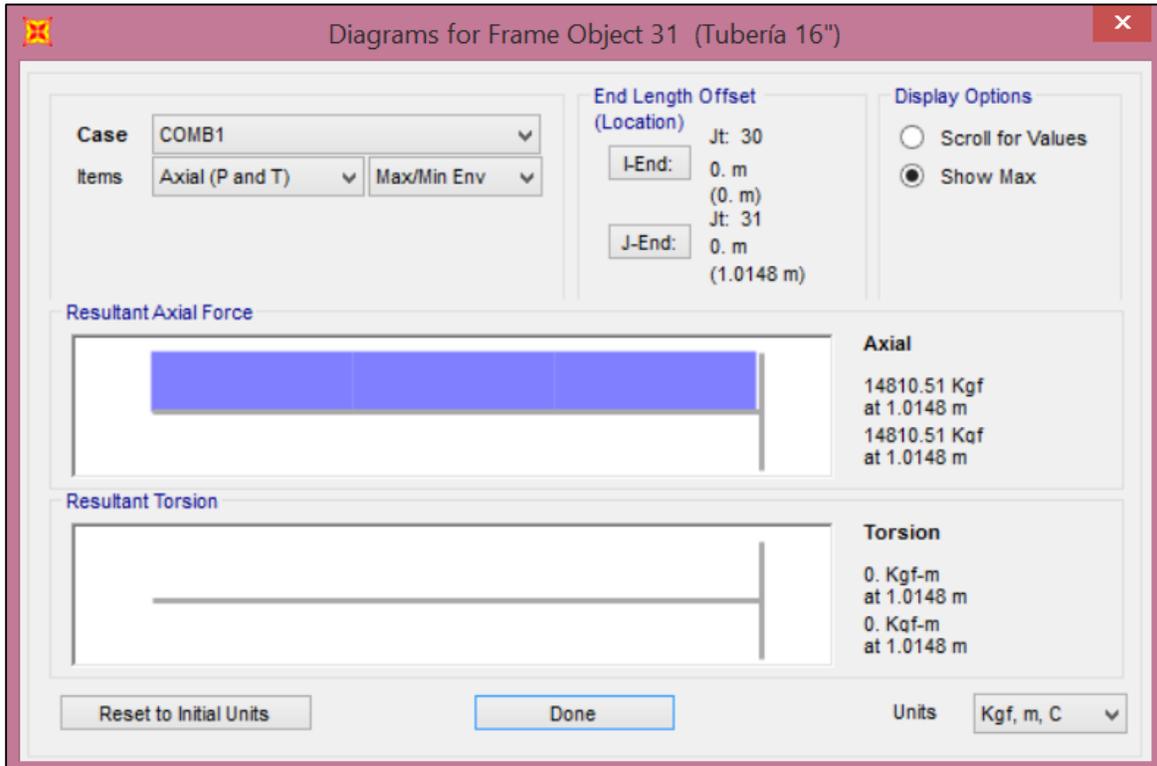
### V.1.2 Fuerza Axial

En vista de que en el modelaje del proceso de instalación de la tubería se aplica únicamente como carga axial la tensión requerida a ser aplicada por la barcaza debería ser la misma a lo largo de toda la tubería, considerando que esta se ve afectada al igual que las demás cargas aplicadas por la combinación de cargas definida (como la tensión aplicada se trata como una carga permanente, esta se verá multiplicada por 0.96), por lo que mediante el análisis estructural llevado a cabo por medio del programa SAP2000 V.20 se puede verificar esta condición. A partir del análisis estructural se obtienen los diagramas de fuerza axial, como el ilustrado en la Figura 40, en el cual se puede observar por segmentos el detalle de dicho diagrama, como se puede apreciar en la Figura 41.



**Figura 40.** Diagrama de fuerza axial. Caso de tubería de 16" de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.



**Figura 41.** Diagrama de fuerza axial detallado en segmento de tubería. Caso de tubería de 16" de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

### V.1.3 Presión Hidrodinámica

La presión hidrodinámica generada por las condiciones de instalación de la tubería puede ser la causante del colapso de esta si se llega a superar la resistencia de la tubería.

Una vez definidas las condiciones ambientales en el modelo, el programa permite visualizar, en función de la profundidad, la presión externa actuante sobre la tubería, la cual no es igual a lo largo de toda la longitud de la tubería, debido a la presencia del oleaje que modifica ligeramente las condiciones de presión en función de la ubicación horizontal de la tubería. En la Figura 42 se puede apreciar la tabla extraída del programa SAP2000 V.20 en la cual se muestra la

presión externa de la tubería en función de la localización horizontal de esta, tomando en consideración que para la máxima profundidad a la cual se está realizando la instalación se presentan las máximas presiones.

	Horiz Loc	Vrt from	Horiz Wave	Horiz	Horiz Total	Horiz Wave	Vert Wave	Vert Wave	Pressure
1	0.	-20.	0.2098	0.	0.2098	0.	0.	0.	20750.165
2	1.9228	-20.	0.208	0.	0.208	0.021	0.	0.	20748.056
3	3.8457	-20.	0.2027	0.	0.2027	0.0416	0.	0.	20741.765
4	5.7685	-20.	0.1939	0.	0.1939	0.0614	0.	0.	20731.399
5	7.6913	-20.	0.1817	0.	0.1817	0.0803	0.	0.	20717.136
6	9.6142	-20.	0.1665	0.	0.1665	0.0977	0.	0.	20699.22
7	11.537	-20.	0.1484	0.	0.1484	0.1135	0.	0.	20677.958
8	13.4598	-20.	0.1277	0.	0.1277	0.1274	0.	0.	20653.713
9	15.3826	-20.	0.1049	0.	0.1049	0.139	0.	0.	20626.899
10	17.3055	-20.	0.0803	0.	0.0803	0.1483	0.	0.	20597.977
11	19.2283	-20.	0.0543	0.	0.0543	0.1551	0.	0.	20567.441
12	21.1511	-20.	0.0274	0.	0.0274	0.1592	0.	0.	20535.813
13	23.074	-20.	0.	0.	0.	0.1605	0.	0.	20503.634
14	24.9968	-20.	-0.0274	0.	-0.0274	0.1592	0.	0.	20471.455
15	26.9196	-20.	-0.0543	0.	-0.0543	0.1551	0.	0.	20439.827
16	28.8425	-20.	-0.0803	0.	-0.0803	0.1483	0.	0.	20409.291
17	30.7653	-20.	-0.1049	0.	-0.1049	0.139	0.	0.	20380.369
18	32.6881	-20.	-0.1277	0.	-0.1277	0.1274	0.	0.	20353.555
19	34.611	-20.	-0.1484	0.	-0.1484	0.1135	0.	0.	20329.31
20	36.5338	-20.	-0.1665	0.	-0.1665	0.0977	0.	0.	20308.048

**Figura 42.** Tabla de resultados de presión en función de la localización horizontal de la tubería para 20 m de profundidad. (Presión dada en kgf/m<sup>2</sup>).

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

#### V.1.4 Esfuerzo longitudinal o axial

El esfuerzo longitudinal o axial es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones perpendiculares a la sección transversal de la tubería, por lo que todas las acciones a las cuales se encuentra sometida la tubería afectan dicho esfuerzo.

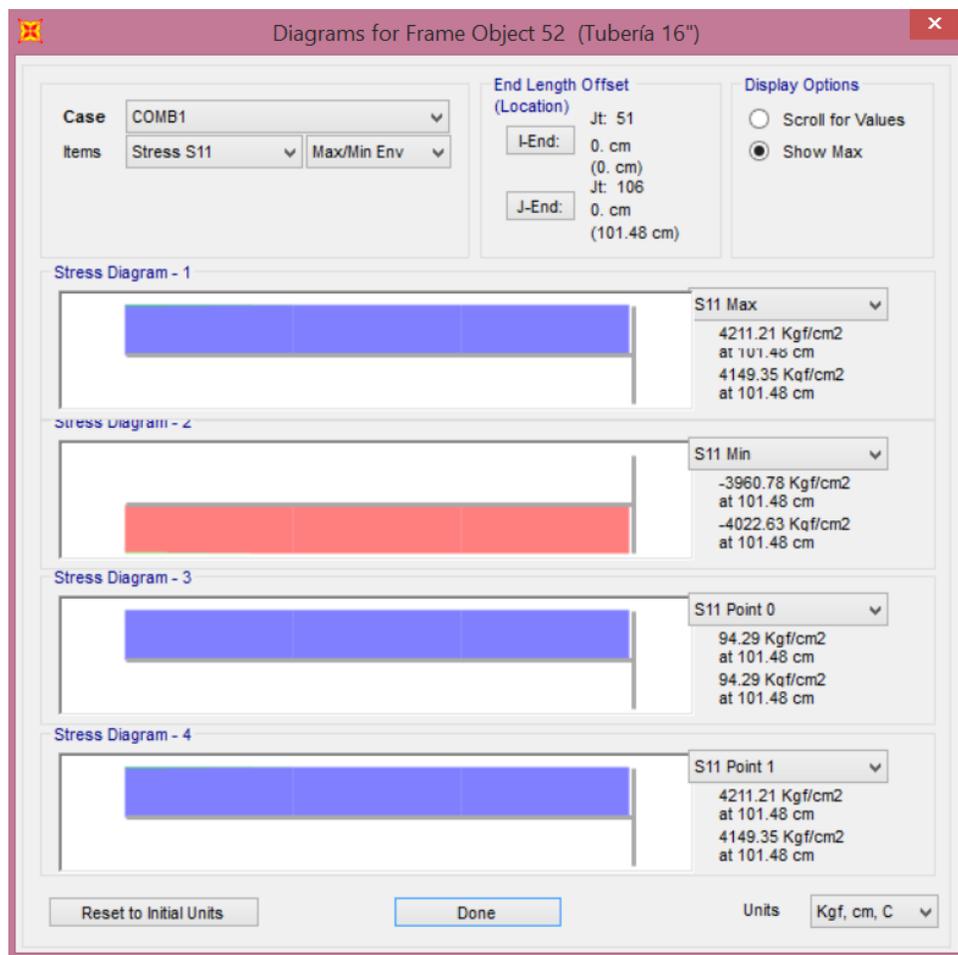
Haciendo uso del programa SAP2000 V.20, previa definición de todas las condiciones de instalación de la tubería, es posible determinar el diagrama de esfuerzo longitudinal, como se muestra en la Figura 43 (en la Figura 44 se ilustra el detalle de segmento con máximo esfuerzo longitudinal) y por consiguiente su máximo valor, a partir del cual se identificará si efectivamente

el material de la tubería es capaz de resistir dicho esfuerzo, o si, por el contrario, no puede soportarlo ya que las propiedades de dicho material no son las óptimas para su uso en el proceso de instalación.



**Figura 43.** Diagrama de esfuerzo longitudinal o axial. Caso de tubería de 16" de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.



**Figura 44.** Diagrama de esfuerzo longitudinal o axial detallado en segmento de tubería. Caso de tubería de 16" de diámetro vacía instalada a 20 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

## V.2 Resultados de los modelos

Con base a los resultados extraídos del análisis estructural de los modelos realizados a partir de las hojas de cálculo desarrolladas, se verifica si las condiciones a las cuales está siendo sometida la tubería pueden ser soportadas o no por la misma, esto haciendo uso de la Ecuación Ec-73, con la cual se verifica si la tubería es capaz de soportar el momento flector, la fuerza axial y la presión actuante sobre ella.

En el caso de este proyecto solo se verifican los estados límite correspondientes al pandeo local (colapso del sistema, propagación del pandeo y criterio de combinación de cargas), ya que los demás estados no aplican o no pueden analizarse por el alcance de este proyecto. En el caso del estado límite de fatiga y fractura se considera que este no puede ocurrir durante el proceso de instalación de la tubería, debido a que este proceso ocurre en un período de tiempo corto y los esfuerzos son controlados de tal forma que no se supere el esfuerzo de cedencia mínimo especificado del material, por lo que no ocurriría fatiga del material de la tubería; como si pudiera ocurrir durante la vida útil de esta debido a la constante acción de las corrientes marinas sobre esta.

En cuanto a la ovalización, en vista de que con las herramientas empleadas no se puede determinar si la tubería muestra modificaciones en su diámetro, no se puede verificar si esta presenta un aplanamiento en su sección una vez han sido aplicadas las cargas durante el proceso de instalación, aunque es probable que esto no ocurra debido a que se está cumpliendo con los parámetros establecidos por la norma en cuanto a las propiedades geométricas de la tubería y los materiales.

Y para el caso del estado límite de desplazamientos, en vista de que no se presentan ninguna de las posibles causas del mismo en los modelos desarrollados (presentadas en el Capítulo II), no es posible que este se presente, por lo cual no se tomará en consideración durante el análisis.

Para cada una de las profundidades de instalación, y según el diámetro de la tubería empleada y la condición de instalación que se esté aplicando (tubería vacía o tubería llena), se realiza un registro en tablas, a fin de poder visualizarlos, analizarlos y compararlos.

### V.2.1 Resultado de los modelos para condición de instalación de tubería vacía

Para la condición de instalación de la tubería submarina vacía, los resultados obtenidos son los presentados en las Tablas 22 a la 29. Donde  $\sigma_l$  es el esfuerzo axial actuante en la tubería y el Factor de diseño es el resultado obtenido al aplicar la Ecuación Ec-73.

**Tabla 22.** Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 20 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	14072	47.00	49.65	47777.32	2.07	13509.26	4315.14	0.62
16	15428	50.16	51.77	61724.00	2.07	14810.51	4211.21	0.61
18	16039	53.32	55.71	76595.51	2.07	15397.72	4081.17	0.58

**Tabla 23.** Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 40 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	15289	63.66	70.72	63023.71	4.1	14677.41	5200.31	1.08
16	16604	68.44	75.74	78410.85	4.1	15939.38	5331.31	0.98
18	17125	73.00	79.46	92028.15	4.1	16440.00	4841.24	0.84

**Tabla 24.** Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 60 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	16592	75.00	87.86	80006.36	6.14	15928.54	6832.72	1.74
16	17849	80.88	93.29	96876.58	6.14	17135.29	6570.55	1.49
18	18280	86.49	98.23	115673.43	6.14	17548.71	6131.32	1.33

**Tabla 25.** Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 80 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	17979	83.00	102.57	98809.39	8.19	17259.64	8076.96	2.66
16	19181	90.00	108.68	118175.10	8.19	18413.75	7999.22	2.22
18	19499	96.59	114.40	137491.32	8.19	18718.65	7275.53	1.89

**Tabla 26.** Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 100 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	19439	89.00	115.82	119692.9	10.23	18661.90	10690.69	3.90
16	20562	97.25	122.58	140173.3	10.23	19739.75	9474.73	3.12
18	20770	104.69	128.79	161467.8	10.23	19939.47	8532.24	2.60

**Tabla 27.** Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 120 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	20962	94.00	127.55	141864.94	12.28	20123.28	12674.04	5.47
16	22011	102.99	134.83	164736.68	12.28	21130.25	11112.11	4.31
18	22099	111.19	142.16	182260.59	12.28	21214.88	9833.29	3.32

**Tabla 28.** Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 140 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	22561	98.14	138.23	165838.64	14.32	21658.1	13889.98	7.48
16	23522	107.62	146.43	190060.67	14.32	22580.79	12820.40	5.74
18	23479	116.43	154.18	213982.82	14.32	22539.37	11286.10	4.58

**Tabla 29.** Resultados de los modelos para condición vacía. Profundidad de 160 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	24214	101.27	148.41	191227.26	16.37	23245.39	17055.65	9.94
16	25089	111.39	157.29	217675.47	16.37	24085.89	14671.83	7.53
18	24917	120.87	165.68	241859.16	16.37	23920.74	12747.61	5.85

### V.2.2 Resultado de los modelos para condición de instalación de tubería llena

Para la condición de instalación de la tubería submarina llena, los resultados obtenidos son los presentados en las Tablas 30 a la 37:

**Tabla 30.** Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 20 m.**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	25191.70	47.00	49.65	49235.84	2.07	24184.03	4524.39	0.66
16	33362.81	50.16	51.77	63498.67	2.07	32028.30	4430.97	0.64
18	39674.64	53.32	55.71	78641.33	2.07	38087.65	4315.80	0.62

**Tabla 31.** Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 40 m.**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	27370.03	63.66	70.72	67863.90	4.1	26275.23	6184.57	1.26
16	34469.81	68.44	75.74	84928.34	4.1	33091.02	5875.21	1.15
18	41737.32	73.00	79.46	103488.48	4.1	40067.83	5626.09	1.07

**Tabla 32.** Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 60 m.**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	29703.10	75.00	87.86	89922.53	6.14	28514.98	8148.76	2.2
16	37056.02	80.88	93.29	110462.12	6.14	35573.78	7589.38	1.94
18	45218.15	86.49	98.23	133432.70	6.14	43409.42	7203.10	1.78

**Tabla 33.** Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 80 m.**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	32185.30	83.00	102.57	115029.67	8.19	30897.89	10383.19	3.6
16	39807.15	90.00	108.68	140437.64	8.19	38214.86	9610.18	3.14
18	48545.26	96.59	114.40	166968.90	8.19	46603.45	8968.29	2.79

**Tabla 34.** Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 100 m.**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	34800.82	89.00	115.82	142671.7	10.23	33408.79	12842.39	5.54
16	42688.31	97.25	122.58	172327.8	10.23	40980.78	11754.79	4.73
18	51378.50	104.69	128.79	204229.7	10.23	49323.36	10928.42	4.17

**Tabla 35.** Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 120 m.**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	37525.34	94.00	127.55	172666.47	12.28	36024.33	15510.10	8.12
16	45695.36	102.99	134.83	207708.49	12.28	43867.55	14132.29	6.87
18	54664.91	111.19	142.16	243764.92	12.28	52478.31	13007.91	5.94

**Tabla 36.** Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 140 m.**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	40387.43	98.14	138.23	204917.51	14.32	38771.93	18378.01	11.43
16	48832.24	107.62	146.43	244693.67	14.32	46878.95	16619.10	9.53
18	58078.01	116.43	154.18	287453.07	14.32	55754.89	15304.66	8.26

**Tabla 37.** Resultados de los modelos para condición llena. Profundidad de 160 m.**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	43347.40	101.27	148.41	238963.30	16.37	41613.50	21405.10	15.55
16	52087.09	111.39	157.29	284620.47	16.37	50003.61	19301.51	12.90
18	61637.18	120.87	165.68	332069.38	16.37	59171.69	17750.51	11.02

### V.3 Adaptación de los modelos a las condiciones reales de instalación

Dado que la finalidad de la simulación del proceso de instalación de las tuberías es reproducir lo más fidedignamente posible las condiciones que ocurren en la realidad, además de certificar que el proceso pueda llevarse a cabo de tal forma que la tubería soporte las solicitaciones, es necesario ajustar los modelos desarrollados a partir de las condiciones determinadas mediante

las hojas de cálculo. Estos modelos realizados a partir de los resultados obtenidos en las hojas de cálculo se encuentran bajo condiciones en las cuales se aplica el Método de la Viga (Pequeñas Deflexiones) y el Método de la Catenaria Natural, métodos que consideran únicamente deformaciones pequeñas, además de describir las condiciones en la región central del tramo libre (alejado tanto del *stinger* como del punto de contacto con el lecho marino), lo cual no ocurre a lo largo de la tubería durante su instalación bajo el método de tendido mediante la configuración de tendido en S.

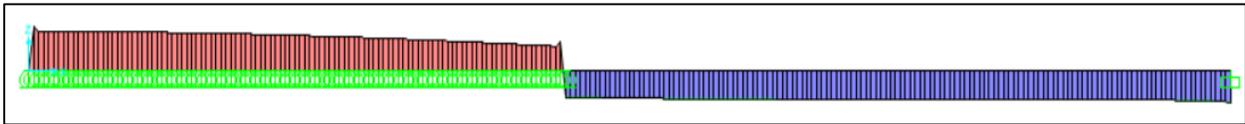
Para asemejar los modelos a lo que ocurre en la realidad durante el proceso de instalación es necesario llevar a cabo una adaptación de los mismos, con la cual se busca simular el punto de separación entre la tubería y el *stinger*, puesto que debido a la rigidez de la tubería esta no permanece en contacto con toda la estructura del *stinger*, cosa que si está ocurriendo en los modelos simulados a partir de los resultados obtenidos en las hojas de cálculo (condición por la que se presentan momentos flectores que en realidad no existen durante el proceso de instalación). Además, se ajustan estos modelos de tal forma que los diagramas de momento a lo largo del *sagbend* sean uniformes, de modo que se someta a las mismas solicitaciones toda la tubería, ya que el momento uniforme a lo largo del *sagbend* corresponde a la condición de catenaria con rigidez constante. Cualquier otra configuración del diagrama de momentos causaría el movimiento del “*Touchdown Point*”, hasta alcanzar la uniformidad de dicho diagrama de momentos.

La adaptación de los modelos se puede llevar a cabo a partir de la modificación de la longitud del *stinger*, ya que la tubería al poseer rigidez flexional solo sigue la curvatura dada por los apoyos hasta cierto punto (punto de despegue), por lo que es necesario determinar ese punto mediante ajustes progresivos del *stinger*, para de esta manera no generar solicitaciones adicionales sobre la tubería al restringir el movimiento vertical de la tubería.

En vista de que se debe obtener un diagrama de momento uniforme a lo largo del *sagbend*, como los mostrados en las Figura 45 para la condición de tubería vacía y en la Figura 46 para la condición de tubería llena, se puede modificar la tensión aplicada a la tubería por medio de los tensionadores de la barcaza, ya que al aplicar más o menos tensión a la tubería, esta modificará su curvatura y por consiguiente los momentos generados por la misma. En caso de que se presente un diagrama de momentos cóncavo, lo que indica que se presenta mucha más curvatura en la zona cercana al lecho marino, se debe aumentar la tensión aplicada, de tal forma que la tubería presente

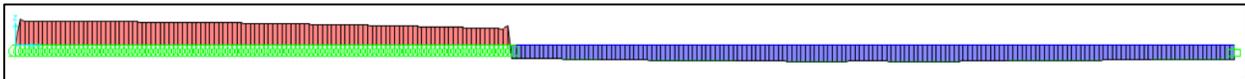
menos curvatura al hacer contacto con el lecho marino, y por consiguiente el momento disminuya en esta zona y aumente en el resto de la región *sagbend*. Por otra parte, si se presenta un diagrama de momentos convexo, indicativo de que se está presentando más curvatura en la zona media de la región *sagbend*, se debe disminuir la tensión aplicada de tal forma que toda la tubería presente una curvatura similar y por consiguiente el mismo diagrama de momentos.

En caso de que no se pueda obtener un diagrama de momentos constante mediante la modificación de la tensión aplicada, es necesario aumentar la longitud de la tubería, específicamente la longitud de la región *sagbend*, ya que al alargar la zona libre de la tubería la curvatura presente es menor, para así poder llegar al lecho marino en la profundidad deseada.



**Figura 45.** Diagrama de momento flector. Caso de tubería de 16” de diámetro adaptada a las condiciones reales de instalación en condición vacía, instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.



**Figura 46.** Diagrama de momento flector. Caso de tubería de 16” de diámetro adaptada a las condiciones reales de instalación en condición llena, instalada a 100 m de profundidad.

**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

### **V.3.1 Resultado de modelos adaptados a contextos reales de instalación para la condición de tubería vacía**

Para la condición de instalación de la tubería submarina vacía, en el caso de los modelos adaptados a las condiciones reales de instalación, los resultados obtenidos son los presentados en las Tablas 38 a la 45:

**Tabla 38.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 20 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	14000	48.00	54.00	30031.64	2.07	13440	2750.09	0.25
16	15000	50.16	59.84	39236.20	2.07	14400	2708.65	0.24
18	15000	53.32	61.68	51870.73	2.07	14400	2787.43	0.27

**Tabla 39.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 40 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	12000	74	61.00	42278.94	4.1	11520	3815.52	0.49
16	20000	69	93.00	32950.04	4.1	19200	2319.93	0.17
18	20000	73	99.46	42160.59	4.1	19200	2307.40	0.18

**Tabla 40.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 60 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	14000	88.00	88.00	31861.70	6.14	13440	2911.69	0.28
16	20000	86.00	114.00	34070.77	6.14	19200	2394.68	0.19
18	23750	86.49	133.24	37161.35	6.14	22800	2066.50	0.14

**Tabla 41.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 80 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	17000	99	114	26816.02	8.19	16320	2487.20	0.20
16	20000	102	128	34686.41	8.19	19200	2475.78	0.20
18	24500	101	154	38410.34	8.19	23520	2135.68	0.16

**Tabla 42.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 100 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	20000	109	139	27442.77	10.23	19200	2653.59	0.21
16	21000	113	149	34708.76	10.23	20160	2437.23	0.20
18	24500	115	173	39781.81	10.23	23520	2297.17	0.17

**Tabla 43.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 120 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	23000	115	171	20150.68	12.28	22080	1940.73	0.12
16	22000	125	165	28443.61	12.28	21120	2031.58	0.14
18	25500	127	188	38872.15	12.28	24480	2161.62	0.17

**Tabla 44.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 140 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	27000	115	210	18735.15	14.32	25920	1845.05	0.10
16	27000	130	202	32561.78	14.32	25920	2336.81	0.19
18	29000	135	215	35748.83	14.32	27840	2021.11	0.16

**Tabla 45.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición vacía. Profundidad de 160 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Vacía							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	27000	119	227.00	19687.76	16.37	25920	1291.66	0.12
16	27000	135	217.22	28439.32	16.37	25920	2040.40	0.15
18	33500	140	250.00	33040.26	16.37	32160	1904.16	0.15

### V.3.2 Resultado de modelos adaptados a contextos reales de instalación para la condición de tubería llena

Para la condición de instalación de la tubería submarina llena, en el caso de los modelos adaptados a las condiciones reales de instalación, los resultados obtenidos son los presentados en las Tablas 46 a la 53:

**Tabla 46.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 20 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	30000	46.00	60.00	26155.27	2.07	28800	2520.07	0.19
16	35000	50.16	59.84	38288.29	2.07	33600	2767.65	0.24
18	42000	53.32	61.68	51245.07	2.07	40320	2899.32	0.26

**Tabla 47.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 40 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	38000	62	98	21337.70	4.1	36480	2150.81	0.13
16	42000	69	95	33132.63	4.1	40320	2466.56	0.18
18	51000	73	97	43718.83	4.1	48960	2555.80	0.20

**Tabla 48.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 60 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	38000	77	119	21744.92	6.14	36480	2186.84	0.13
16	44000	85	118	32526.94	6.14	42240	2438.39	0.17
18	50000	92	116	44170.45	6.14	48000	2574.10	0.20

**Tabla 49.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 80 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	38000	92	135	20707.73	8.19	36480	2095.18	0.12
16	45000	99	136	29880.86	8.19	43200	2268.01	0.15
18	52000	107	135	44464.06	8.19	49920	2600.22	0.21

**Tabla 50.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 100 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	38000	105	149	22322.04	10.23	36480	2237.73	0.14
16	48000	110	158	30752.11	10.23	46080	2344.88	0.16
18	55500	120	156	42617.64	10.23	53280	2523.39	0.20

**Tabla 51.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 120 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	39000	115	167	22015.76	12.28	37440	2217.7	0.14
16	48000	125	170	31816.12	12.28	46080	2415.42	0.18
18	56250	132	173	41198.33	12.28	54000	2452.92	0.20

**Tabla 52.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 140 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	40000	115	193	16888.26	14.32	38400	1771.95	0.09
16	55500	130	202	28214.26	14.32	53280	2221.04	0.15
18	62100	140	200	37904.65	14.32	59616	23012.83	0.18

**Tabla 53.** Resultados de modelos adaptados a las condiciones reales de instalación para condición llena. Profundidad de 160 m.

**Fuente:** Propia.

Do	Condición Llena							Factor de diseño
	T	Lst	L	Msd	Pe	Ssd	$\sigma_l$	
pulg	kgf	m	m	kgf*m	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>	
14	51000	119	235.00	13794.00	16.37	48960	1575.91	0.07
16	54000	135	217.22	29349.44	16.37	51840	2287.57	0.16
18	68000	150	220.00	39025.21	16.37	65280	2403.200	0.20

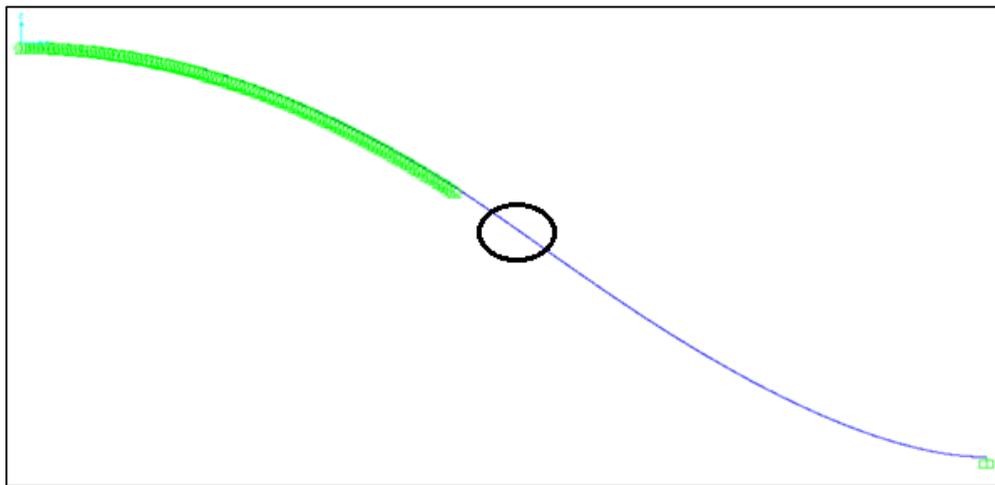
## CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### VI.1 Evaluación de modelos no ajustados a las condiciones reales de instalación

#### VI.1.1 Diagramas de momento

Al realizar los modelos no adaptados a las condiciones reales de instalación, es decir, aquellos cuyas condiciones de instalación son las determinadas a partir de las hojas de cálculo, se simula la característica forma en S del método empleado, esto debido a que las tensiones aplicadas, en conjunto con la configuración de apoyos que simulan el *stinger* de la barcaza, garantizan el desarrollo de la catenaria, tal y como se puede apreciar en la Figura 47.

A partir de la configuración dada a la tubería, la curva descrita por esta posee la misma concavidad que el *stinger*, y a partir del punto de inflexión, indicado en la Figura 47, esta cambia para poder adaptarse a la horizontalidad del lecho marino y de esta manera llegar al *Touchdown Point*.



**Figura 47.** Deformada de tubería de 16" de diámetro instalada a 100 m de profundidad. Modelo sin adaptar a las condiciones reales de instalación. (La circunferencia denota el punto de inflexión de la tubería)

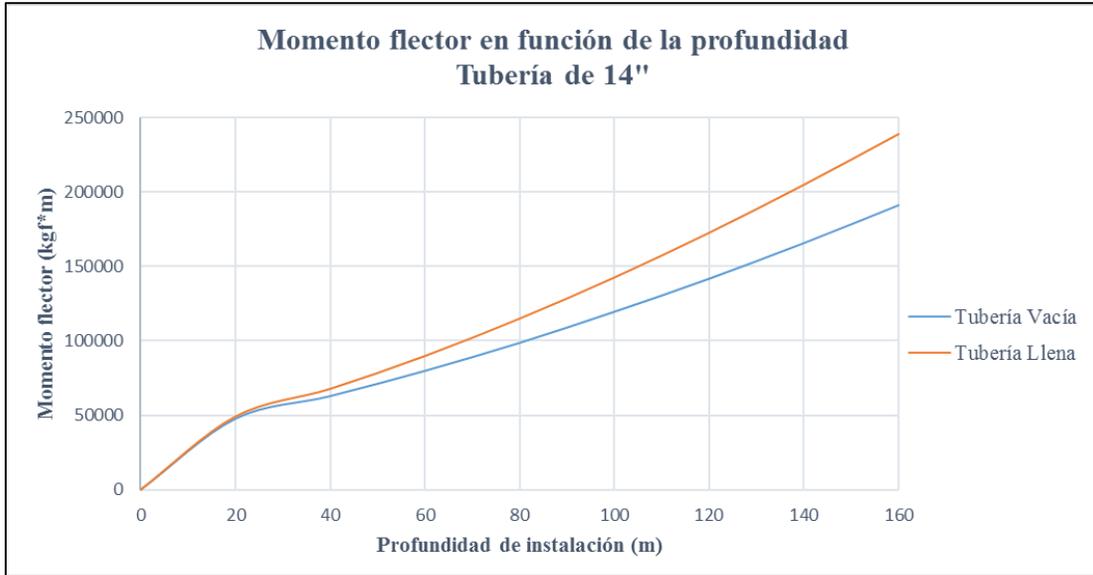
**Fuente:** Programa SAP2000 V.20.

Como se mencionó previamente, el momento flector o de flexión viene dado fundamentalmente por la curvatura que adquiere la tubería, presentando momentos negativos en la región *overbend*, con diagramas de momento que van acorde con la curvatura de la tubería en dicha zona, es decir, de mayor momento al inicio de la tubería a menor momento al llegar al final

del *stinger*, debido a la curva descrita por el *stinger*. En el punto final del *stinger* se presenta para ambos los casos de instalación, tanto con la tubería llena, como con la tubería vacía, un aumento abrupto del momento, el cual es generado por la rigidez de la tubería, ya que en vista de que esta no continua con la curva descrita por el *stinger*, tiende a separarse en cierto punto en función de la rigidez flexional, y por restringir dicho desplazamiento mediante el empleo de los apoyos que simulan los apoyos del *stinger*, se generan estos aumentos en las solicitaciones, los cuales no ocurren en la realidad.

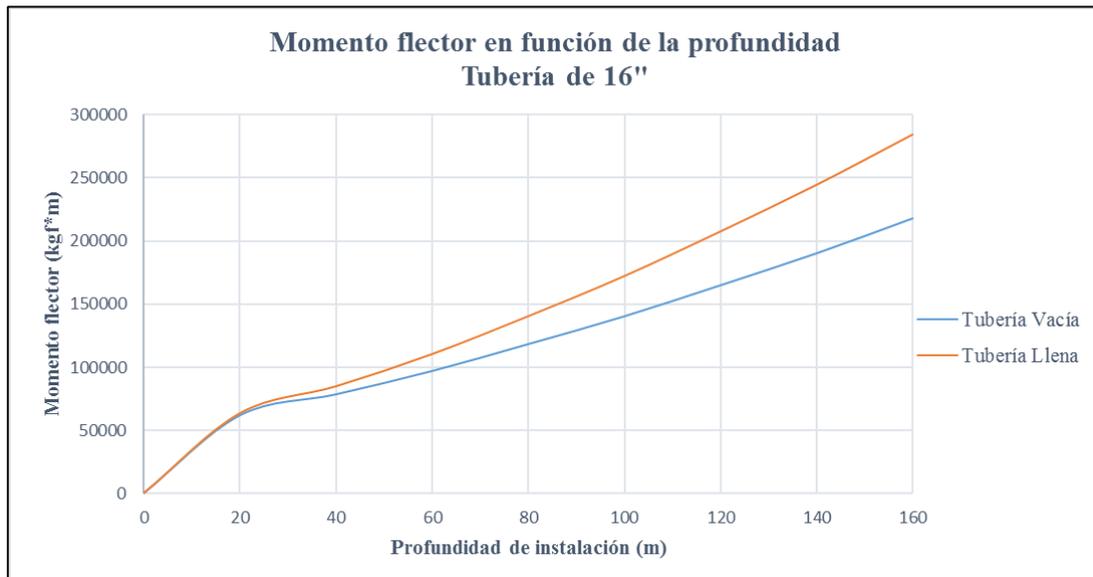
Por su parte, en la región *sagbend* se presenta, para todos los casos, diagramas de momento flectores positivos que aumentan a medida que se va acercando al lecho marino, presentando un incremento notable al llegar al *Touchdown Point* debido a que la tubería no posee la longitud adecuada para desarrollar una catenaria lo suficientemente suave como para garantizar un diagrama de momento uniforme. Para el caso de la condición de instalación de tuberías llenas estos momentos son mayores al caso de tuberías vacías debido a que la carga vertical sobre la tubería es mayor, y por consiguiente las deformaciones también, lo que se traduce en un aumento de los momentos.

Para ambas condiciones de instalación los valores de los momentos flectores se incrementan a medida que se aumenta la profundidad de instalación, esto debido a que la tubería presenta mayores deformaciones verticales para poder garantizar que se alcance el lecho marino, por lo que a mayores profundidades de instalación las solicitaciones son mayores, como se puede apreciar en las Figuras 48, 49 y 50.



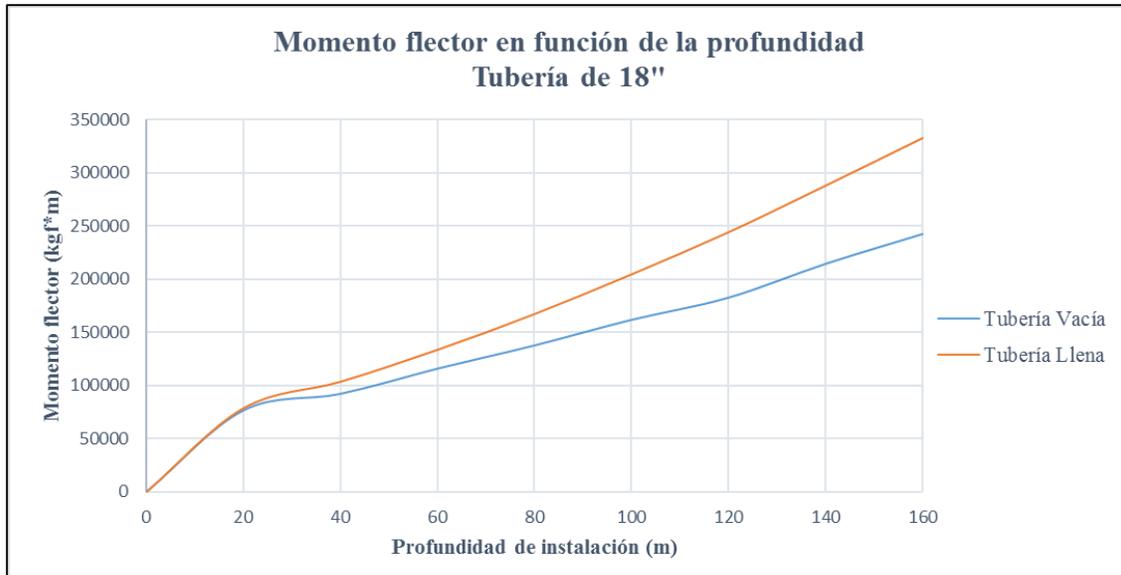
**Figura 48.** Momento flector en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 49.** Momento flector en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 50.** Momento flector en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.

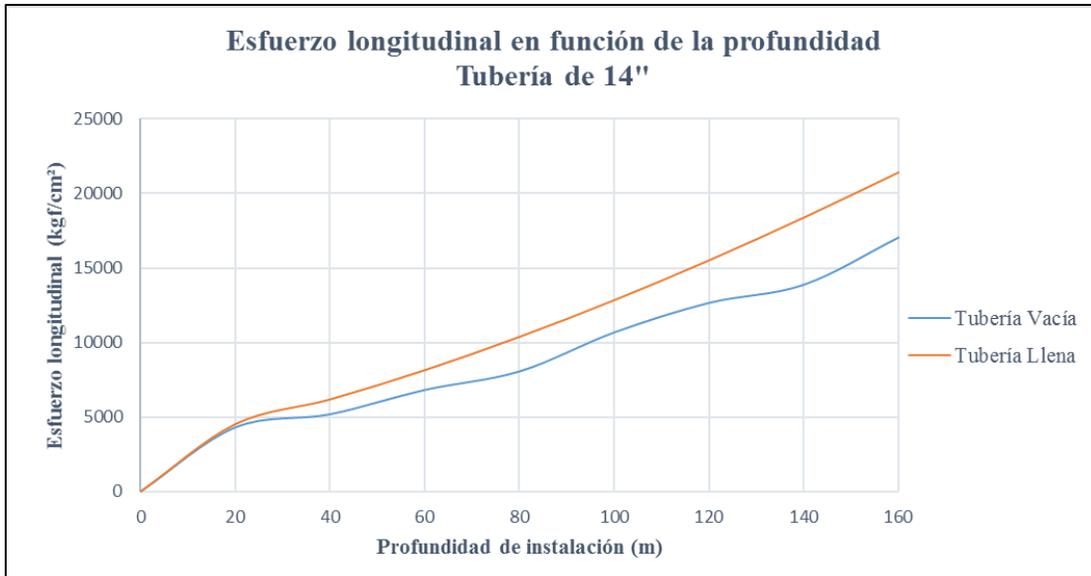
**Fuente:** Propia.

### **VI.1.2 Esfuerzo longitudinal o axial actuante**

Durante el proceso de instalación de la tubería, la combinación de los momentos y la fuerza axial actuante generan esfuerzos longitudinales superiores a la tensión de cedencia del acero de la tubería ( $f_y$ ), por lo que el acero de la tubería deja de trabajar en su rango elástico y empieza a trabajar de manera plástica, es decir, teniendo deformaciones permanentes y no recupera espontáneamente su forma original al retirar las cargas. Lo anterior no es lo que se busca que ocurra durante el proceso de instalación, ya que durante la vida útil de la tubería esta estará sometida a cargas cíclicas, las cuales generan el fallo del acero por fatiga, y si ya este se encuentra trabajando en su rango plástico, la carga requerida para producir fallos de esta forma es menor a la carga de rotura elástica. Además, el hecho que la tubería presente deformaciones en su sección transversal imposibilita el uso de la tubería durante la operación, incluyendo el empleo de las herramientas inteligentes para su mantenimiento (los así llamados cochinos).

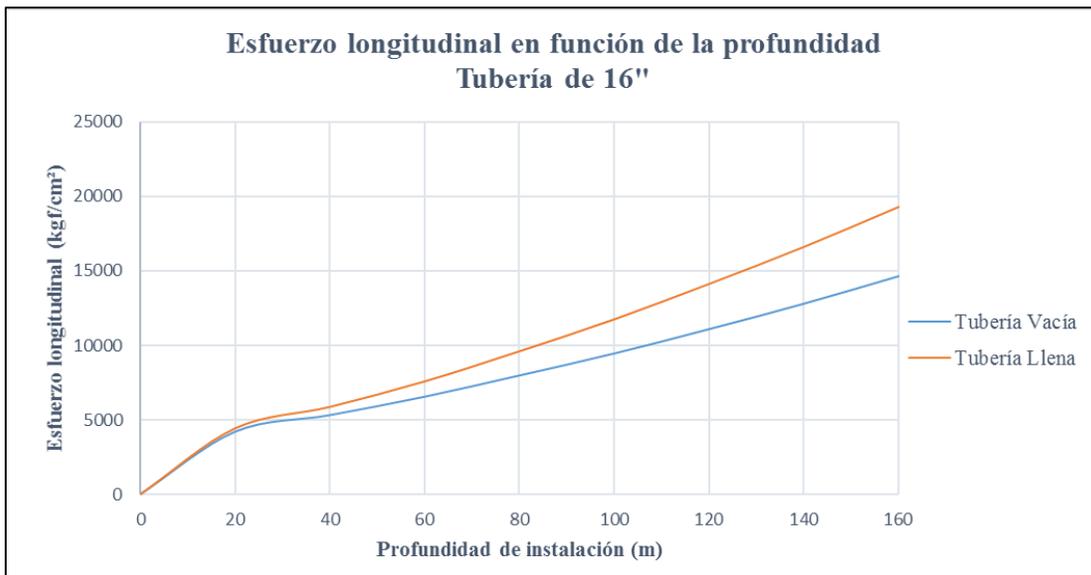
En los modelos que simulan la instalación de la tubería submarina bajo los resultados obtenidos en las hojas de cálculo, sin su adaptación a las condiciones reales, se observa que a partir de los 20 m de profundidad de instalación, para todos los diámetros de tubería empleados (14", 16" y 18"), y para ambas condiciones de instalación (vacía y llena), el esfuerzo longitudinal supera

el rango elástico del acero de la tubería, por lo que no es viable realizar la instalación de la misma bajo dichas condiciones, destacando además, que para profundidades mayores dicho esfuerzo es mayor, tal y como se puede apreciar en las Figuras 51, 52 y 53.



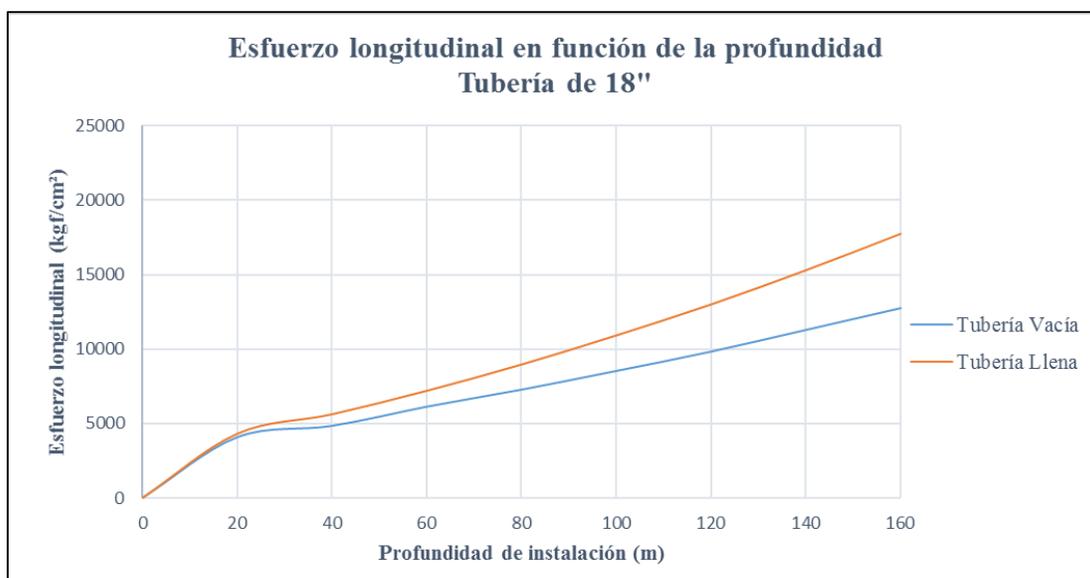
**Figura 51.** Esfuerzo longitudinal en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 52.** Esfuerzo longitudinal en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 53.** Esfuerzo longitudinal en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.

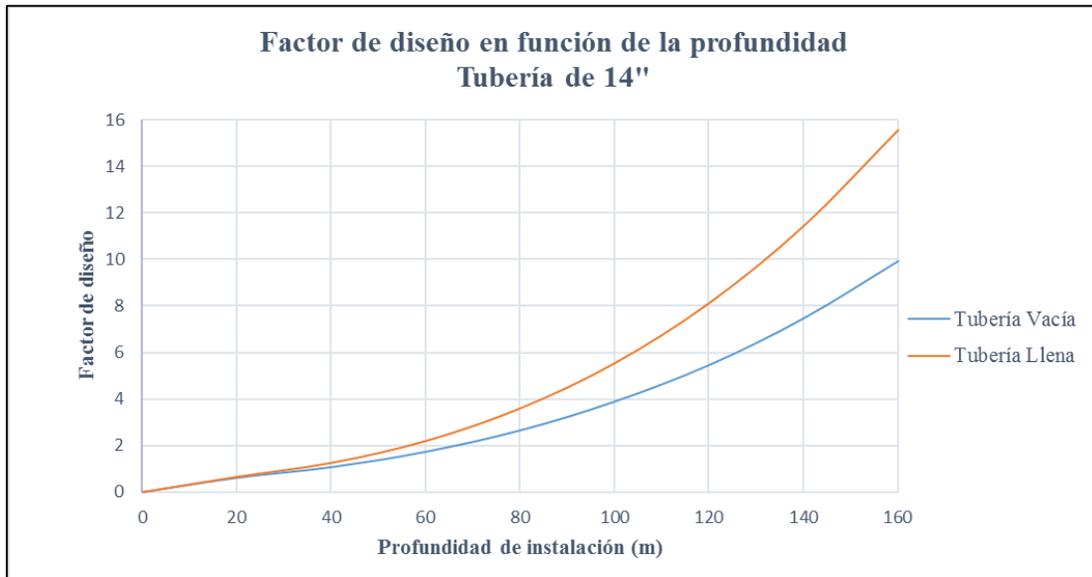
**Fuente:** Propia.

### VI.1.3 Factor de diseño

Al determinar las solicitaciones presentes en la tubería durante el proceso de instalación en este caso de los modelos no adaptados a las condiciones reales, y determinar la relación de estas con respecto a la capacidad de la tubería a partir de lo estipulado en la norma DNVGL-ST-F101 (relación obtenida a partir de la Ecuación Ec-73), se obtuvieron resultados negativos, es decir, relaciones mayores a 1 a partir de 40 m de profundidad para todos los diámetros de tubería empleados. En dichos resultados se puede apreciar mayor influencia en la falla asociada al momento flector, siendo este, en la mayoría de los casos, mucho mayor al momento resistente de las tuberías. En el caso de la fuerza axial y la presión característica de colapso, las tuberías presentan mayor capacidad resistente que estas solicitaciones en todos los casos de instalación simulados, por lo que se destaca la relevancia de los momentos flectores como causante del fallo estructural de las tuberías.

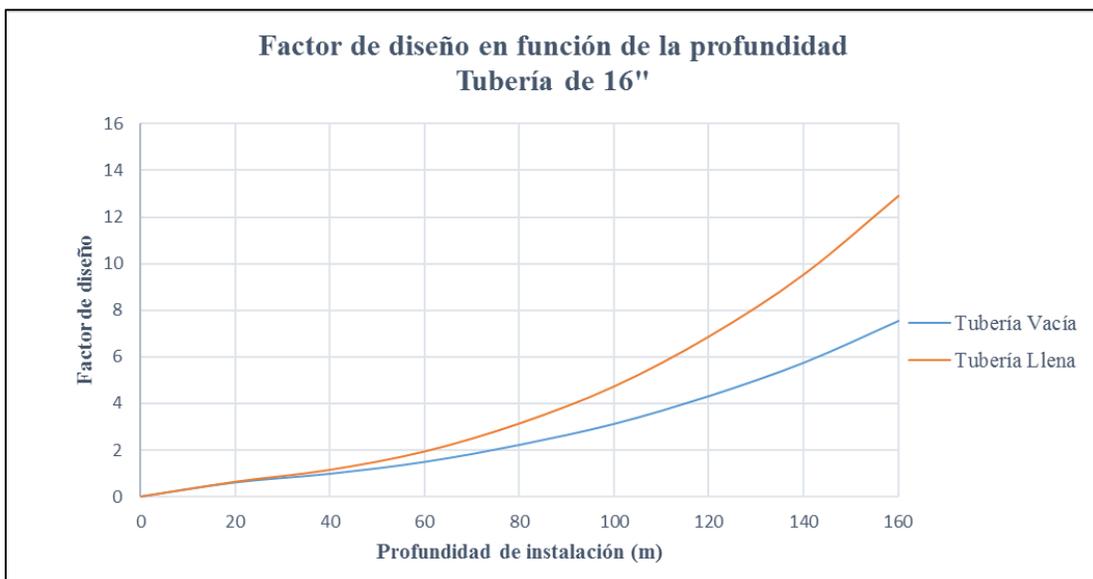
Comparando los resultados obtenidos en los escenarios de instalación tanto en condición vacía, como en condición llena, se puede apreciar que para la segunda condición, dado que los momentos flectores son mucho mayores, la relación entre la capacidad resistente de la tubería y las solicitaciones da resultados mayores a 1 y además mucho mayores a los obtenidos para la

condición de tubería vacía, aumentando en función de la profundidad de instalación tal y como se puede apreciar en las Figuras 54, 55 y 56.



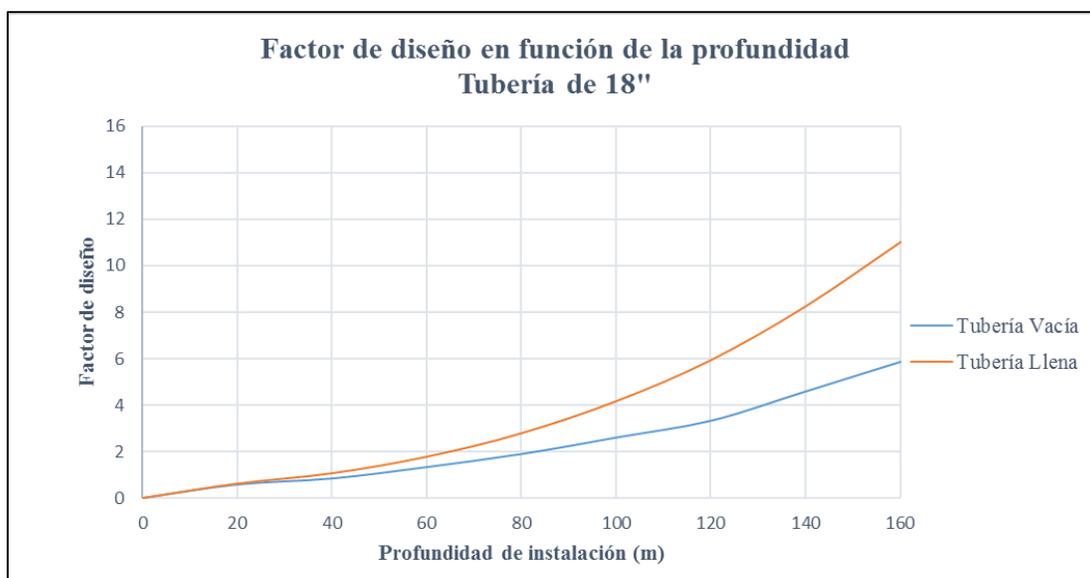
**Figura 54.** Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 55.** Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 56.** Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación sin adaptar a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.

## VI.2 Evaluación y parametrización del proceso de instalación de tuberías submarinas mediante la configuración en S

Una vez llevado a cabo el proceso de ajuste de los modelos, a partir del cual se simula lo que realmente ocurre durante el proceso de instalación de la tubería mediante la modificación de la longitud del *stinger*, la longitud de la tubería y la tensión aplicada por la barcaza sobre la tubería, se obtuvieron los resultados presentados previamente para cada uno de los casos. En estos resultados se puede observar que al simular las condiciones a las que efectivamente se encuentra sometida la tubería, esta es capaz de soportar las solicitaciones a las cuales se encuentra sometida hasta una profundidad de instalación de 160 m, tanto para cuando la tubería se encuentra llena, como cuando esta se encuentra vacía.

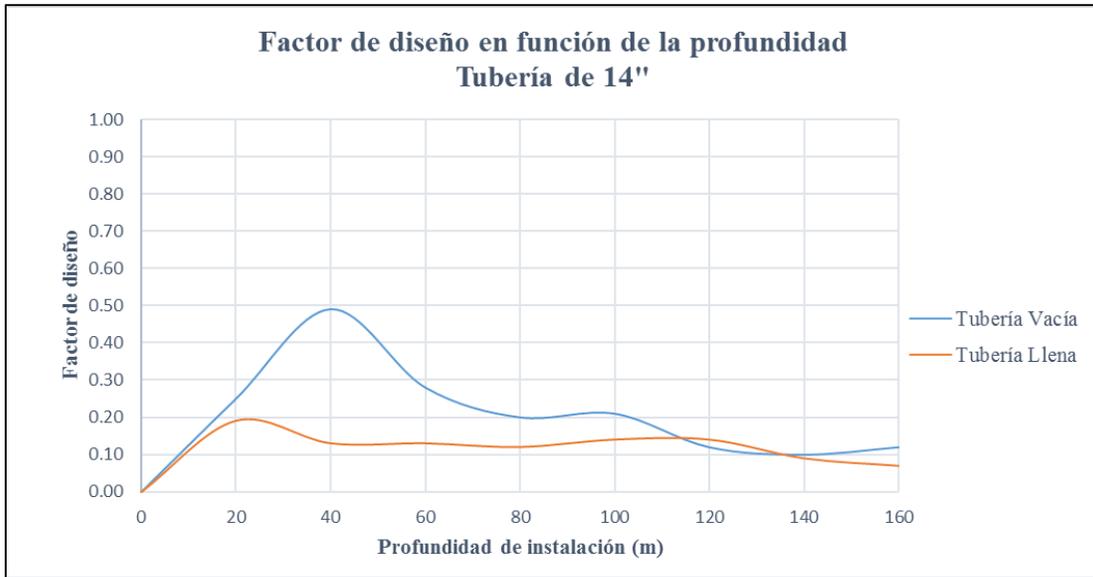
Al ajustar los modelos se puede observar como los momentos flectores en la tubería disminuyen debido a que no se presentan excesos de curvatura en estas, por lo que al verificar la resistencia de las tuberías con respecto a las solicitaciones se obtuvo que, en todos los casos planteados, la relación es inferior a 1, indicativo de que líneas de tubería de todos los diámetros evaluados sí son capaces de soportar las solicitaciones presentes durante el proceso de instalación.

A partir de los resultados obtenidos es posible realizar una parametrización del proceso de instalación de las tuberías submarinas mediante la configuración en S para las condiciones definidas en este trabajo. Con dicha parametrización es posible determinar las características del proceso de instalación que deben presentarse con la finalidad de llevar a cabo una adecuada instalación de las tuberías. Estas características para llevar a cabo un adecuado proceso de instalación son:

- Factor de diseño de la tubería: permite verificar si la tubería es capaz de resistir adecuadamente las solicitaciones a las cuales estará sometida.
- Longitud de la proyección horizontal del *stinger* y del tramo libre de tubería: permite identificar la longitud de tubería que se debe disponer para llevar a cabo la instalación, y además identificar si la barcaza empleada para la instalación de la tubería posee una estructura del agujón con la longitud requerida.
- La tensión a ser aplicada por la barcaza a la tubería a través de los tensionadores: permite determinar qué tipo de barcaza es posible emplear a partir de la capacidad de tensión que puedan generar los tensionadores de la misma.

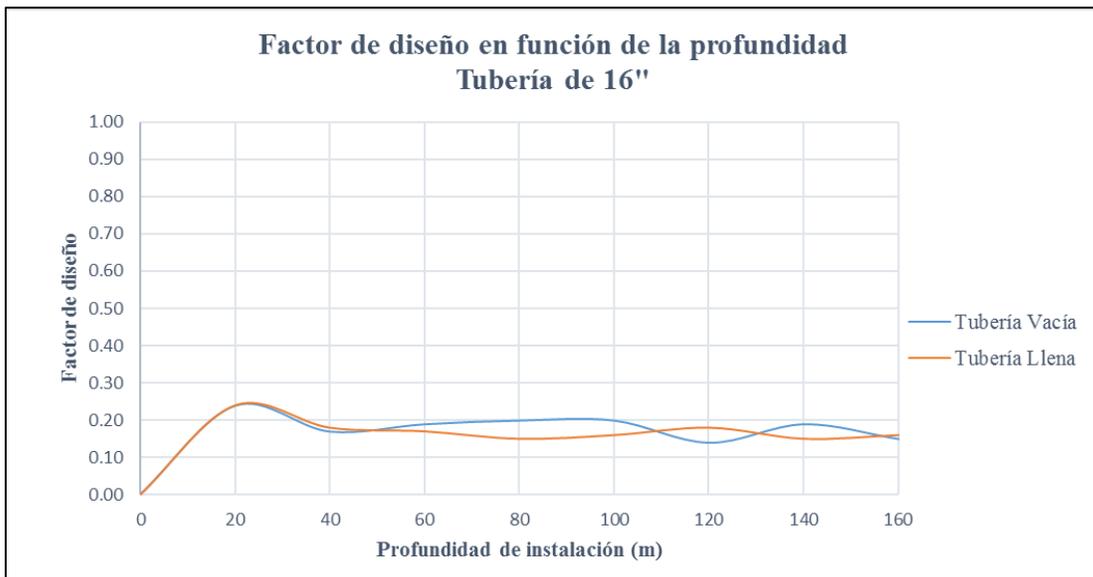
En el caso del factor de diseño se tiene que en vista de que el ajuste o adaptación a las condiciones reales de instalación se llevó a cabo a través de un proceso de ajustes progresivos, mediante otros modelos no se obtendrían los mismos resultados para cada uno de los casos, pero si es posible identificar a partir de estos resultados la viabilidad de la instalación de las tuberías según cada una de las condiciones.

En las Figuras 57, 58 y 59 se puede apreciar la variación del factor de diseño en función de la profundidad para ambas condiciones de instalación, según el diámetro de tubería utilizado.



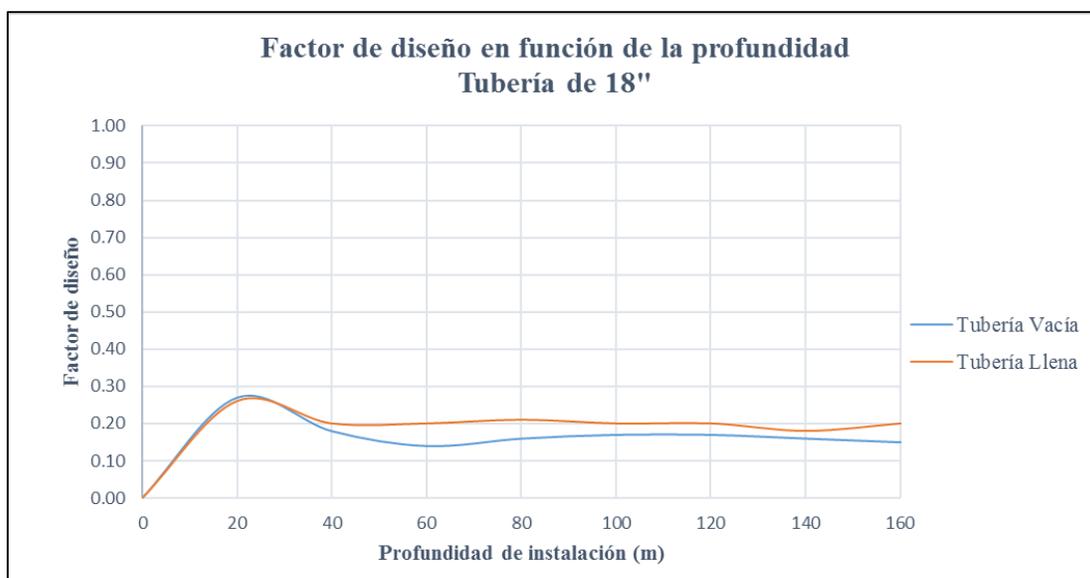
**Figura 57.** Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 58.** Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.

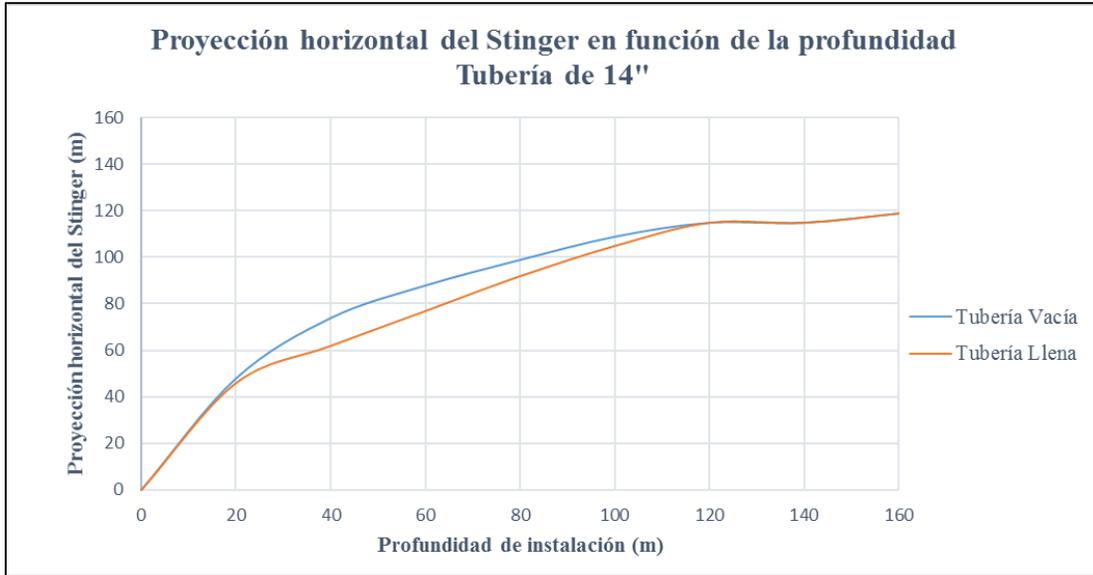


**Figura 59.** Factor de diseño en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.

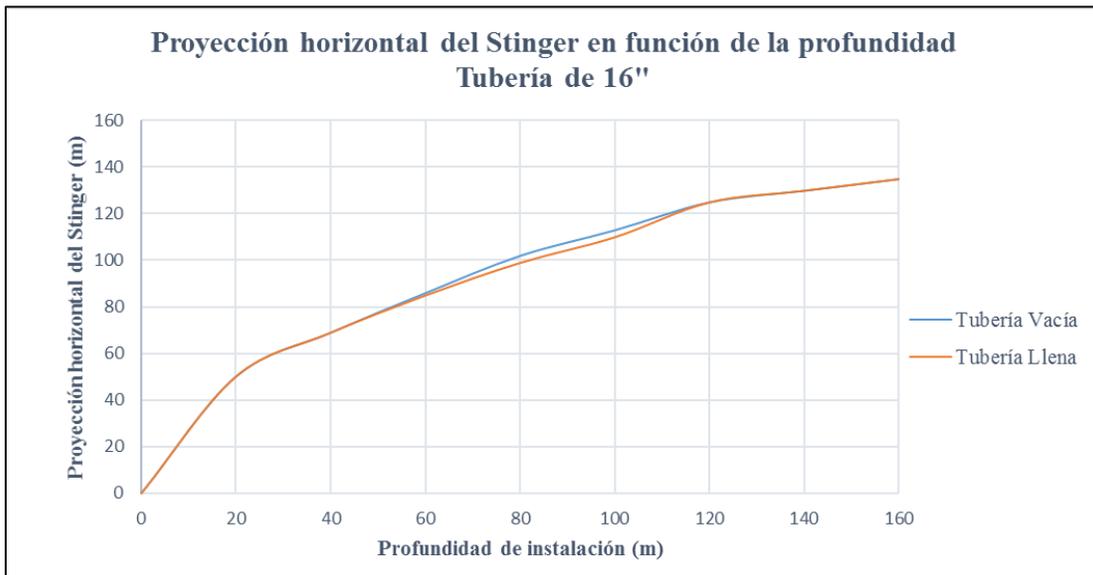
En cuanto a la proyección horizontal del *stinger* y del tramo libre de la tubería (*sagbend*), a partir de los resultados obtenidos luego de ajustar los modelos a las condiciones reales de instalación se pueden visualizar las longitudes horizontales requeridas para poder realizar la instalación de la tubería, a fin de que se pueda evaluar si se posee la longitud de *stinger* requerida en la barcaza, y se conozcan las extensiones de tubería a ser empleadas según la profundidad y la condición de instalación que se emplee (tubería llena o tubería vacía).

En las Figuras 60, 61 y 62 se puede apreciar la proyección horizontal del *stinger* en función de la profundidad para ambas condiciones de instalación y los diámetros de tubería empleados, a partir de las cuales se pueden entablar comparaciones entre los métodos de instalación y estimar la longitud horizontal de *stinger* requerida para cada profundidad de instalación. De igual forma se presenta en las Figuras 63, 64 y 65 la proyección horizontal del *sagbend* en función de la profundidad, para todos los casos establecidos.



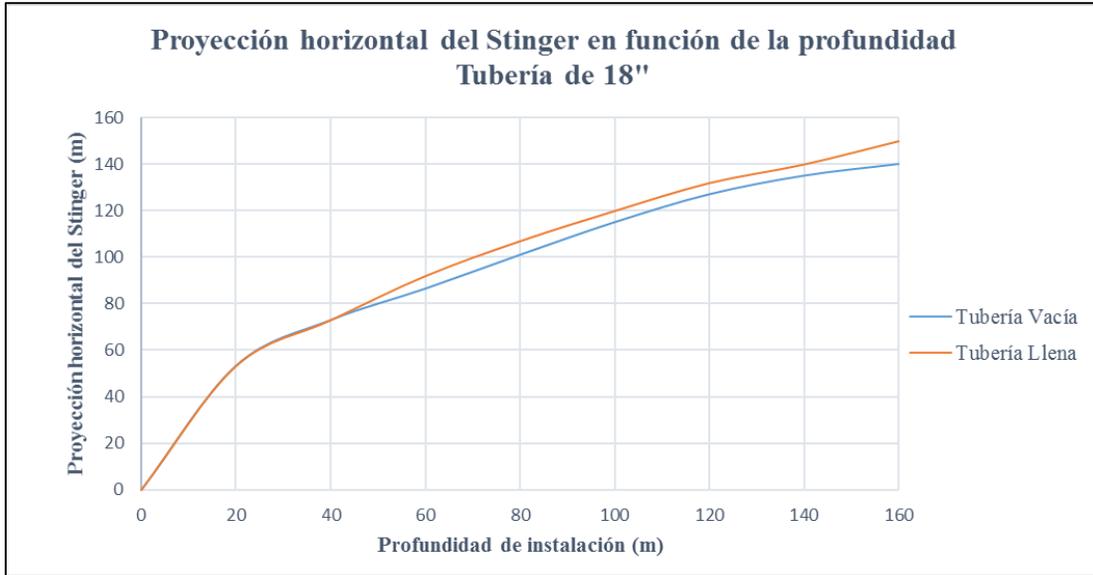
**Figura 60.** Proyección horizontal del stinger en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



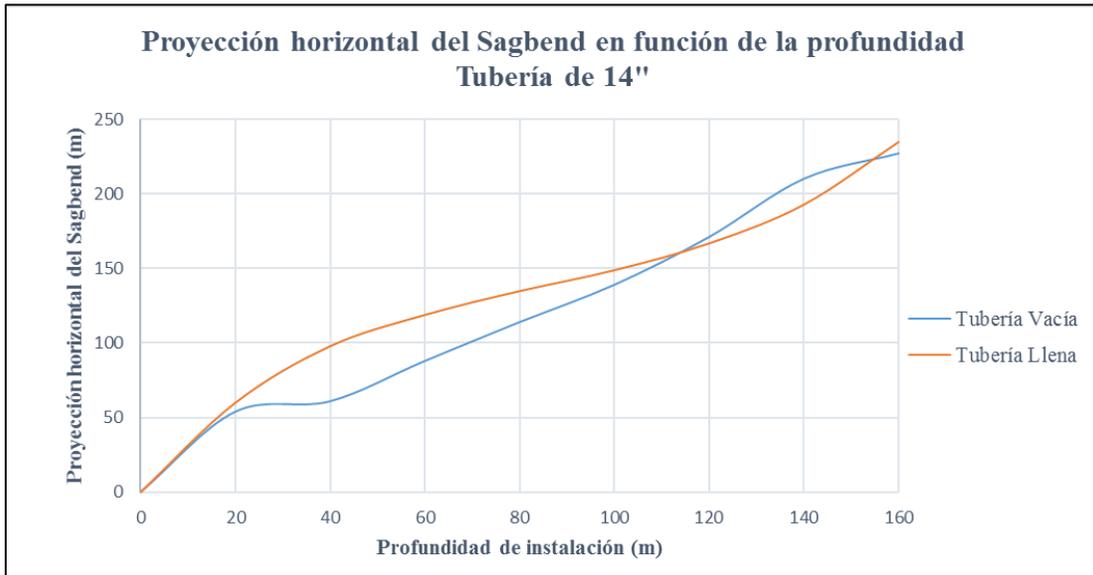
**Figura 61.** Proyección horizontal del stinger en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



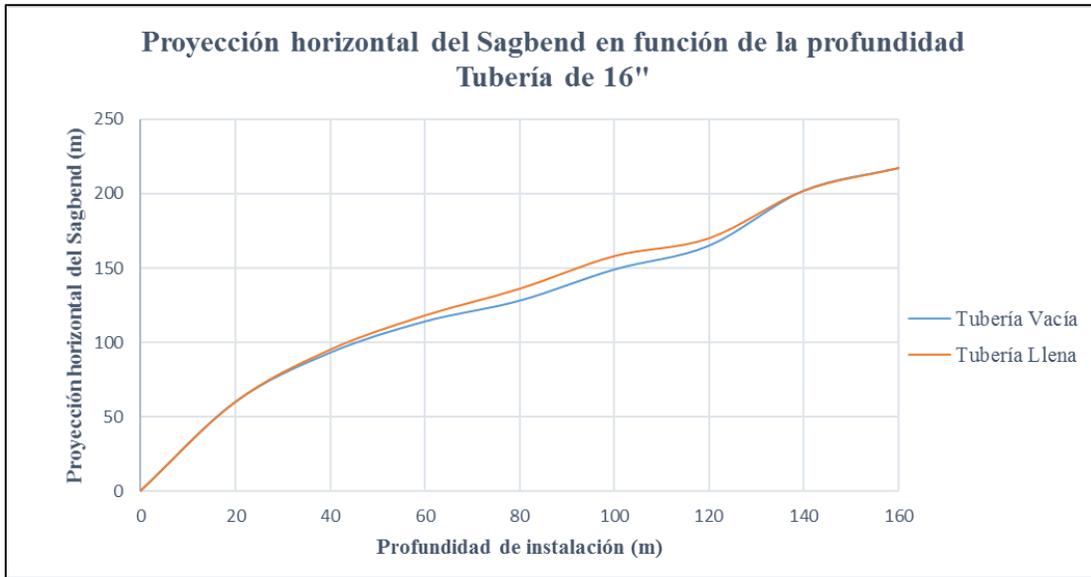
**Figura 62.** Proyección horizontal del stinger en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



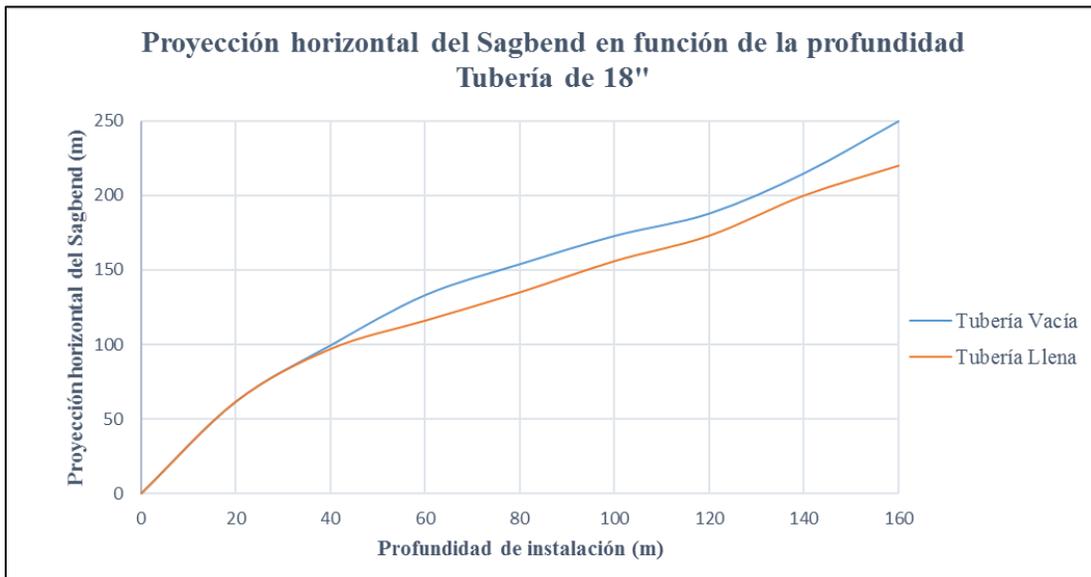
**Figura 63.** Proyección horizontal del sagbend en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 64.** Proyección horizontal del sagbend en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.

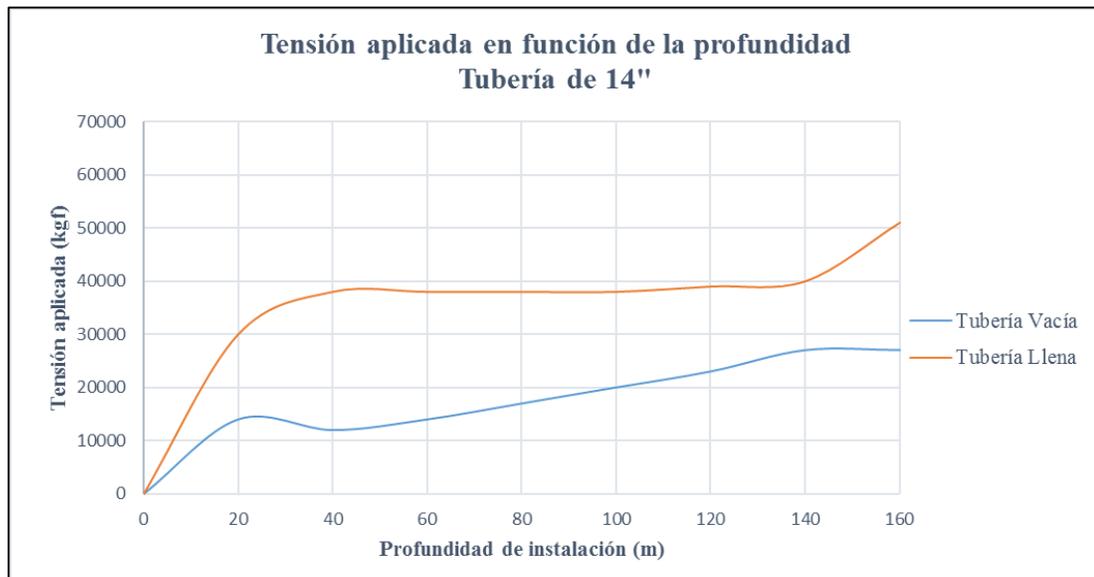


**Figura 65.** Proyección horizontal del sagbend en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.

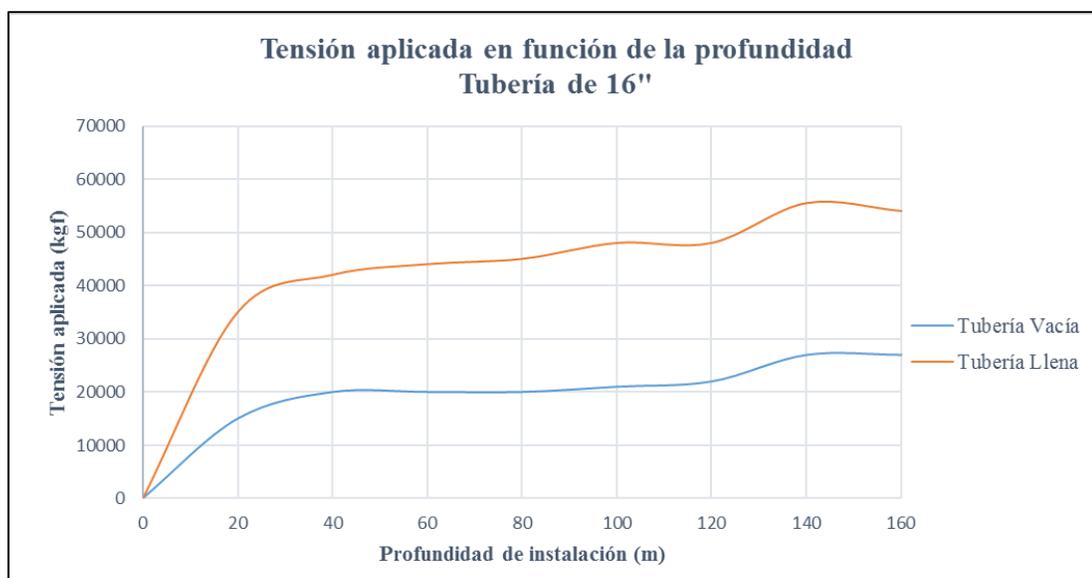
A partir de las gráficas presentadas se puede apreciar la poca diferencia entre ambas condiciones de instalación (tubería llena y tubería vacía) en cuanto a las proyecciones horizontales de la tubería tanto para el tramo soportado por el *stinger*, como para el *sagbed*, ya que la longitud viene dada por la geometría del proceso de instalación, condicionada por el radio del *stinger* y la profundidad del agua donde se está realizando la instalación, siendo además función de la rigidez flexional de la tubería que no cambia entre escenarios, por lo que el peso de la tubería no influyó en estos resultados.

Con respecto a la tensión requerida a ser aplicada a la tubería mediante los tensionadores de la barcaza, es de suma importancia establecer este valor ya que del mismo dependerá el tipo de barcaza que se emplee para realizar la instalación de la tubería, dado que de necesitarse emplear grandes tensiones será requerida una embarcación de mayor tamaño y capacidad. A partir de los resultados obtenidos se puede apreciar que esta tensión requerida aumenta en función de la profundidad, y además que para la condición de instalación de tubería llena son requeridas tensiones mayores que para la condición de tubería vacía, como se puede apreciar en las Figuras 66, 67 y 68.



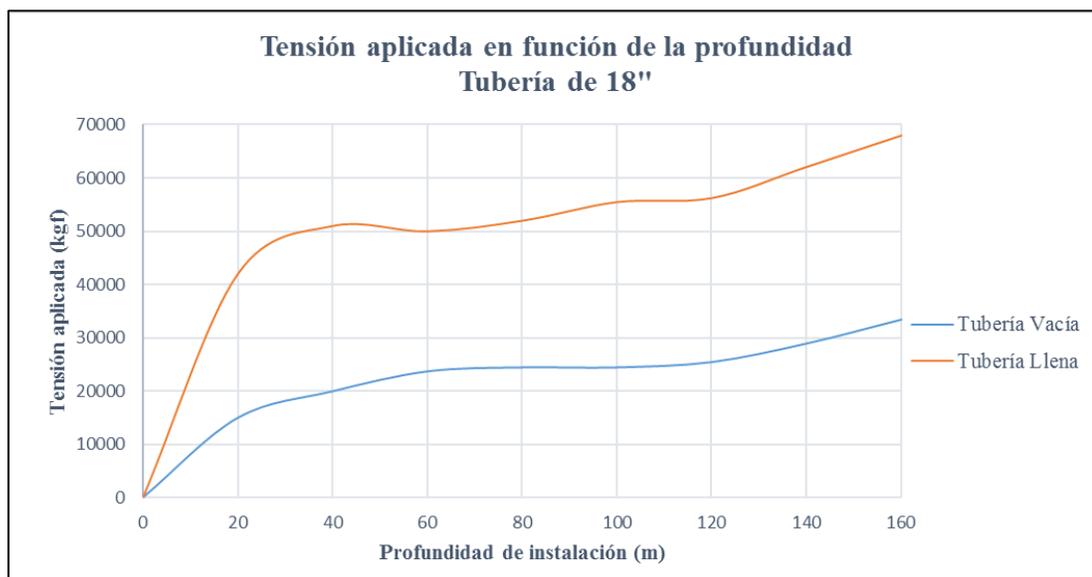
**Figura 66.** Tensión aplicada por la barcaza en función de la profundidad, Tubería de 14" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 67.** Tensión aplicada por la barcaza en función de la profundidad, Tubería de 16" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.



**Figura 68.** Tensión aplicada por la barcaza en función de la profundidad, Tubería de 18" de diámetro. Proceso de instalación adaptado a condiciones reales.

**Fuente:** Propia.

En vista de que la tensión requerida a ser aplicada a la tubería durante el proceso de instalación de esta cuando se encuentra llena de agua es mucho mayor al caso en que se encuentra vacía, se puede afirmar que la capacidad de la barcaza tiene que ser mayor, por lo que se tendría

que evaluar la viabilidad para disponer de una barcaza con tensionadores y el sistema de amarre de tal capacidad.

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

La metodología y herramientas tanto de cálculo como de modelado presentadas en esta investigación pueden ser empleadas para el diseño y verificación del proceso de instalación de una tubería submarina mediante la configuración en S.

Los parámetros relevantes en el diseño y simulación del proceso de instalación de tuberías submarinas mediante la configuración en S son las características del *stinger* o aguijón (radio y longitud), la longitud del tramo libre de la tubería (tramo de tubería correspondiente a la región *sagbend*) y la tensión aplicada a la tubería a través de los tensionadores de la barcaza de ensamblaje y tendido.

Llevar a cabo la adopción de los modelos a las condiciones reales de instalación permite, a partir de la modificación de los resultados obtenidos mediante las hojas de cálculo, simular de manera suficientemente realista lo que ocurre en la realidad durante el proceso de instalación de la tubería, disminuyendo las solicitaciones en la tubería, ya que se tiene en consideración la rigidez de la misma.

Las tuberías de acero API 5L Grado X65 de 14", 16" y 18" de diámetro, con 0.5" de espesor, y revestimiento de concreto de  $f'c$  igual a 40 MPa y espesor igual a 2", poseen la capacidad de resistir las solicitaciones presentes durante el proceso de instalación, en condiciones tanto llenas de agua, como vacías y en el rango de profundidades de 20 m a 160 m bajo las condiciones ambientales y de instalación establecidas en este trabajo.

La influencia de las cargas asociadas a las condiciones ambientales en las cuales se lleva a cabo la instalación de las tuberías submarinas (oleaje y corrientes marinas), bajo lo establecido en este proyecto, son despreciables y no influyen en las solicitaciones generadas en la tubería en comparación con las cargas funcionales, es decir, peso propio de la tubería (peso de la tubería de acero, revestimiento de concreto y, en caso de que esté llena de agua, el peso del fluido).

La proyección horizontal de *stinger* y tubería requerida para llevar a cabo el proceso de instalación de la tubería submarina mediante la configuración en S en condición de tubería vacía es similar a la requerida para la condición de tubería llena, debido a que estas longitudes no dependen de las cargas aplicadas, sino de la geometría del proceso de instalación.

La tensión requerida a ser aplicada a la tubería por los tensionadores de la barcaza es mayor para la condición de instalación de tubería llena, por lo que para este caso sería requerida una barcaza con tensionadores y el sistema de amarre de mayor capacidad que para la condición de tubería vacía.

El empleo del revestimiento de concreto, el cual no solo sirve como protección para la tubería, sino que además le otorga peso a la misma (contribuyendo a su estabilidad sobre el fondo marino) genera que la opción de llevar a cabo el proceso de instalación con la tubería llena no sea la alternativa más viable, ya que en condición de tubería vacía se tiene peso suficiente como para garantizar la estabilidad y sumergencia de la tubería, además de presentar tensiones y sollicitaciones menores a la condición de tubería llena.

La parametrización del proceso de instalación de tuberías submarinas mediante la configuración en S permite identificar, a partir del diámetro de tubería y profundidad de instalación, las condiciones necesarias para llevar a cabo la instalación de manera aproximada, y la verificación de si para dichas condiciones la tubería es capaz de resistir el proceso de instalación a partir del factor de diseño, como se establece en la norma DNVGL-ST-F101.

## **CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES**

Las tuberías de acero API 5L Grado X65 de 14", 16" y 18" de diámetro, con 0.5" de espesor, y revestimiento de concreto de  $f'c$  igual a 40 MPa y espesor igual a 2", pueden ser instaladas sin inconveniente mediante el proceso de instalación de tuberías submarinas por configuración en S bajo las condiciones establecidas en este trabajo, para el rango de profundidades de 20 m a 160 m, por lo que se recomienda se evalúen profundidades mayores, para identificar el rango de profundidades hasta el cual puede ser empleado este método de instalación, ya que teóricamente posee un rango de aplicación mucho mayor.

Ampliar el rango de evaluación de diámetros y espesores de tubería, a fin de obtener mayor amplitud de resultados.

En vista de la poca influencia en las solicitaciones generadas en la tubería por parte de las cargas inducidas por las condiciones ambientales, se recomienda, en caso de que se presenten condiciones ambientales similares a las empleadas en este proyecto, no tomarlas en consideración para la simulación del proceso de instalación de la tubería, a fin de simplificar los modelos; puesto que estas condiciones poseen mayor relevancia una vez la tubería se encuentra instalada en el lecho marino.

Determinar la importancia del empleo de la condición de tubería llena en aquellos casos donde no se posea recubrimiento de concreto y sea requerido adicionar peso a la tubería para poder realizar su instalación.

Comparar el proceso de instalación mediante la configuración en S con los distintos métodos de instalación de tuberías submarinas a fin de determinar el rango de aplicación de cada método en función de los resultados obtenidos.

Evaluar el comportamiento estructural de la tubería posterior al proceso de instalación y comprobar si efectivamente se cumplen los requerimientos de los estados límites según lo estipulado en la normativa especializada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Petroleum Institute. (2002). *API Recommended Practice 2A-WSD. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*. Estados Unidos.

American Petroleum Institute. (2004). *API Specification 5L. Specification for Line Pipe*. Estados Unidos.

Andersen, J., Bryndum, M., & Christensen, C. J. (2005). *Design and Installation of Marine Pipelines*. Oxford: Blackwell Science.

Bai, Q., & Bai, Y. (2014). *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. Oxford: ELSEVIER.

Berra Kossik F, Sánchez Alfonso V. (2014) “*Análisis De Fatiga En Estructuras Fijas Costa Afuera tipo Jacket Causada Por Oleaje Marino Mediante el Programa Sacs versión 5.3*”. Trabajo especial de grado. Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela. Tutor: Ramírez L. Manuel.

Bolinaga, J. J. (1992). *Mecánica Elemental de los Fluidos*. Valencia: Morales KOPP Ediciones.

Chakrabarti, S. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*. Offshore Structure Analysis, Inc. Estados Unidos.

Coastal Engineering Research Center. (1984). *Shore Protection Manual* (Cuarta ed., Vol. 1). Vicksburg, Misisipi, EEUU: US Army Corps of Engineers.

Computer & Structures INC. (2016). *Analysis Reference Manual*. California. Estados Unidos.

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

Det Norske Veritas. (2010). *DNV-RP-C205. Environmental Conditions and Environmental Loads*. Noruega.

Det Norske Veritas. (2017). *DNVGL-ST-F101. Submarine Pipeline Systems*. Noruega.

- Herdianti J. (2013) “*Comparisons Study of S-Lay and J-Lay Methods for Pipeline Installation in Ultra Deep Water*”. Trabajo especial de maestría. Universidad de Stavanger. Noruega.
- INCOSTAS, S.A. (2017). *Interim Oceanographic Data Processing and Interpretation Report*. Para Citgo. Caracas.
- Irvine, M. (1981). *Cable Structures*. Cambridge.
- Jensen G. (2010) “*Offshore Pipelaying Dynamics*”. Trabajo especial de doctorado. Norwegian University of Science and Technology. Noruega.
- King, R. A., & Palmer, A. C. (2006). *Subsea Pipeline Engineering*. Tulsa: PennWell.
- Mousselli, A. (1981). *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. Tulsa: PennWell Books.
- NOUEL CONSULTA C.A. (2017). *Stress Analysis During Lay*. Caracas.
- Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima. (2002). *Cuadernos Soberanía Petrolera, Costa Afuera*. Venezuela.
- Van Dillewijn J, Velásquez R. (2011) “*Diseño de Tramos Libres de Tuberías Submarinas Sometidas a Fuerzas Hidrodinámicas*”. Trabajo especial de grado. Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela. Tutor: José A. Noriega.