



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA**

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

T E S I S

**PLANTEAMIENTO DE REEMPLAZO DE TUBERÍAS DE DESCARGA
DE COMBUSTIBLE DE ACERO AL CARBONO, POR TUBERÍAS DE
SISTEMA MIXTO CONFORMADO DE FIBRA DE VIDRIO, ACERO Y
CONCRETO EN CONSORCIO TERMINALES**

**PRESENTADA POR
BACHILLER YERIL FRED VELÁSQUEZ RAMOS
BACHILLER LEONCIO NILTON SÁNCHEZ CÁRDENAS**

**ASESOR:
ING. VIGIL WUILBER MAMANI CORI**

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO**

MOQUEGUA - PERÚ

2021

CONTENIDO

	Pág.
PORTADA	
Página de jurado	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Contenido	iv
CONTENIDO DE TABLAS	xi
CONTENIDO DE FIGURAS	xv
CONTENIDO DE ECUACIONES	xvii
CONTENIDO DE APÉNDICES	xx
RESUMEN.....	xxii
ABSTRACT	xxiii
INTRODUCCIÓN	xxiv

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la realidad del problema	1
1.2 Definición del problema.....	1
1.2.1 Problema general.....	1
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Objetivos de la investigación	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Justificación.....	3

1.5 Alcances y limitaciones.....	3
1.6 Variables.....	3
1.6.1 Identificación de variables.....	3
1.6.1.1 Variable dependiente.....	3
1.6.1.2 Variable independiente.....	3
1.6.2 Operacionalización de variables.....	4
1.7 Hipótesis de la investigación.....	4
1.7.1 Hipótesis general.....	4
1.7.2 Hipótesis específicas.....	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación.....	6
2.2 Normas y códigos aplicables al proyecto.....	6
2.2.1 Nacional.....	7
2.2.2 Internacional.....	7
2.3 Bases teóricas.....	8
2.3.1 Especificaciones técnicas.....	8
2.3.2 Tuberías.....	8
2.3.3 Tubería de acero envolvente exterior de 14"(350 mm).....	8
2.3.3.1 Tubería de fibra de vidrio de 12".....	8
2.3.3.2 Lechada de cemento espacio anular.....	8
2.3.4 Tubería de acero envolvente exterior 8"(200 mm).....	9
2.3.4.1 Tubería de fibra de vidrio 6"(150 mm).....	9

2.3.4.2 Lechada de cemento espacio anular	9
2.3.4.3 Instalaciones de seguridad para prevenir fallas de elementos componentes	9
2.3.5 Sistema SCADA	10
2.3.6 Características de los hidrocarburos.....	11
2.3.7 Condiciones ambientales y meteorológicas del sitio para diseño del sistema mixto de tuberías.....	11
2.3.8 Parámetros y consideraciones de diseño	13
2.3.8.1 Diseño de los ductos submarinos	13

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1 Tipo de la investigación	14
3.2 Diseño de la investigación	14
3.3 Población y muestra	14
3.4 Descripción de instrumentos para recolección de datos	15
3.4.1 Técnicas.....	15
3.4.2 Instrumentos.....	15
3.4.3 Procesamiento de datos	16
3.4.4 Análisis de datos.....	16

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISEÑO

4.1 Ductos a ser reemplazados	17
4.2 Nuevas facilidades	18

4.2.1 Reemplazo tubería descarga combustible 12”(300mm)	18
4.2.2 Reemplazo tubería limpieza 6”(150mm)	22
4.3 Disciplina mecánica y tuberías	25
4.4 Diseño del ducto submarino.....	28
4.4.1 Estudios resistencia ducto frente cargas interna y externa.....	28
4.4.1.1 Cálculos hidráulicos	28
4.4.1.2 Cálculo espesor de tubería	35
4.4.1.3 Cálculo de integridad mecánica y estructural tubería	41
4.4.1.4 Especificaciones y espesor tubería interna FRP.....	42
4.4.1.5 Espesor y calidad de la tubería envolvente	46
4.4.1.6 Diseño de cargas longitudinales.....	51
4.4.1.7 Combinación de cargas de diseño	55
4.4.1.8 Esfuerzos debido presiones externas no ovalizadas.....	58
4.4.1.9 Esfuerzos debido presiones externas ovalizadas.....	62
4.4.1.10 Colapso propagación del pandeo (Buckles).....	66
4.4.1.11 Cálculos golpe de ariete ducto submarino	69
4.4.1.12 Análisis hidrodinámica frente a fuerzas de corriente	74
4.4.1.13 Estabilidad hidrodinámica ducto fondo marino	79
4.4.1.14 Análisis formación de vórtices tramos suspendidos	86
4.4.1.15 Análisis estructural ducto tramos suspendidos.....	87
4.4.1.16 Control de propagación de fracturas dúctiles.....	89
4.4.1.17 Verificación radios mínimos de giro para tubería.	92
4.4.1.18 Flotación para el sistema mixto de tuberías	95
4.5 Disciplina civil	99

4.5.1 Datos del sitio.....	100
4.5.2 Combinaciones de carga	102
4.5.3 Estructura de acero para soporte tuberías sistema mixto	102
4.5.3.1 Diseño de elementos a compresión	103
4.5.3.2 Diseño de elementos por esfuerzo cortante.....	106
4.5.3.3 Diseño de elementos esfuerzo flexión.....	107
4.5.3.4 Diseño de conexiones.....	108
4.5.3.5 Diseño de plancha base	108
4.5.3.6 Diseño resistencia de momentos	110
4.5.3.7 Pernos de anclaje plancha base	112
4.6 Soldadura de soporte en plancha base.....	113
4.6.1 Cálculo del soporte metálico sistema tuberías mixtas	116
4.6.2 Cálculo de cargas actuantes en el soporte metálico	117
4.6.3 Cálculo de la columna tipo W para el soporte tuberías.....	118
4.6.4 Cálculo de plancha base de la columna del soporte.....	122
4.6.5 Cálculo de pernos de anclaje.....	126
4.6.6 Cálculo soldadura entre columna, soporte y plancha base.....	127
4.7 Concreto armado.	128
4.7.1 Cálculo soporte marino por deslizamiento y volteo.....	129
4.7.2 Procedimiento cementación anular spool sistema mixto.. ..	130
4.8 Disciplina electricidad.....	130
4.8.1 Diseño de sistema protección catódica corriente impresa.....	130
4.8.2 Criterios adoptados para el diseño del sistema	132
4.8.3 Densidad de corriente.....	132

4.8.4 Área a proteger.....	133
4.8.5 Resistividad adoptada.....	136
4.8.6 Cálculo de la corriente requerida	137
4.8.7 Resistencia del sistema.....	137
4.8.7.1 Cálculo del número de ánodos	137
4.8.7.2 Cálculo de masa neta de ánodo de chatarra	139
4.8.7.3 Resistencia del ánodo de chatarra	140
4.8.7.4 Resistencia de cama de ánodos	140
4.8.7.5 Resistencia de cables y resistencia del recubrimiento.....	141
4.8.7.6 Dimensionamiento del rectificador	142
4.8.7.7 Cálculo del sistema de puesta a tierra	143
4.9 Disciplina instrumentación	144
4.9.1 Diseño conceptual sistema SCADA.....	145
4.9.2 Conformación del sistema SCADA	145
4.9.2.1 Componentes del sistema SCADA	145
4.9.2.2 Adquisición señales del proceso analógicas y digitales	146
4.9.2.3 Sistema de comunicación SCADA	146
4.9.3 Sistema detección de fugas (LDS) por el método de ondas acústicas de presión negativa	147
4.9.4 Filosofía de control	148
4.10 Procedimientos pruebas al sistema de tuberías mixto	150
4.10.1 Prueba neumática a tubería spool de acero al carbono	150
4.10.2 Prueba hidrostática a tubería spool de fibra de vidrio de 6"x 12" y al spool de sistema mixto 6"x 8"y 12" x 14"	153

CAPÍTULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Presentación de resultados	160
5.1.1 Análisis de costos	160
5.1.1.1 Precios unitarios tuberías de acero al carbono del sistema simple existente	160
5.1.1.2 Precios unitarios tuberías de sistema mixto	162
5.2 Discusión de resultados.....	163

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones	164
6.2 Recomendaciones.....	166
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	167
APÉNDICES.....	169
MATRÍZ DE CONSISTENCIA.....	208

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido de tablas	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variable dependiente.....	4
Tabla 2. Operacionalización de variable independiente.....	4
Tabla 3. Condiciones meteorológicas prevaecientes en el sitio	12
Tabla 4. Cálculos hidráulicos tubería de combustible, 300 mm de diámetro petróleo industrial 500, 100 psi y 3500 bbl/h	31
Tabla 5. Cálculos hidráulicos tubería de combustible, 300 mm de diámetro diésel B5 S50, 100 psi y 3500 bbl/h	32
Tabla 6. Cálculos hidráulicos de limpieza flushing, 300 mm de diámetro agua dulce, 45 psi y 1200 bbl/h.....	34
Tabla 7. Cálculo espesor pared tubería acero al carbono de 14"	37
Tabla 8. Cálculo de espesor de pared de tubería acero al carbono de 8"	38
Tabla 9. Cálculo de espesor de pared de tubería fibra de vidrio de 12"	40
Tabla 10. Cálculo de espesor de pared de tubería fibra de vidrio de 6"	41
Tabla 11. Especificaciones y espesores de la tubería interna FRP de 12"	44
Tabla 12. Especificaciones y espesores de la tubería interna FRP de 6"	45
Tabla 13. Espesor de tubería envolvente de acero (carcasa) sistema de tuberías mixto 14"	49
Tabla 14. Espesor de tubería envolvente de acero (carcasa) sistema de tuberías mixto 8"	50
Tabla 15. Diseño de cargas longitudinales-sistema tuberías mixto 12"x14"	57
Tabla 16. Diseño de cargas longitudinales-sistema tuberías mixto 6"x8"	54
Tabla 17. Combinación de cargas diseño-sistema tuberías mixto de 12"x14"	56

Tabla 18. Combinación de cargas diseño-sistema tuberías mixto de 6"x8"	57
Tabla 19. Verificación de colapso debido a presiones externas para tuberías no ovalizadas-sistema mixto de 12"x14"	60
Tabla 20. Verificación de colapso debido a presiones externas para tuberías no ovalizadas-sistema mixto de 6"x8"	60
Tabla 21. Verificación de colapso debido a presiones externas para tuberías ovalizadas-sistema mixto de 12"x14"	64
Tabla 22. Verificación de colapso debido a presiones externas para tuberías ovalizadas-sistema mixto de 6"x8"	65
Tabla 23. Verificación de colapso debido a propagación del pandeo-sistema mixto de 12"x14"	67
Tabla 24. Verificación de colapso debido a propagación del pandeo-sistema mixto de 6"x8"	68
Tabla 25. Cálculos de golpe de ariete en tubería de fibra de vidrio de 12"	71
Tabla 26. Cálculos de golpe de ariete en tubería de fibra de vidrio de 6"	73
Tabla 27. Estabilidad hidrodinámica frente a fuerzas originadas por corrientes marinas permanentes-sistema mixto de 12"x14"	76
Tabla 28. Estabilidad hidrodinámica frente a fuerzas originadas por corrientes marinas permanentes-sistema mixto de 6"x8"	78
Tabla 29. Estabilidad hidrodinámica del ducto frente a olas de gran tamaño sistema mixto de 12"x 14"	83
Tabla 30. Estabilidad hidrodinámica del ducto frente a olas de gran tamaño sistema mixto de 6"x 8"	85

Tabla 31. Análisis estructural del ducto en tramos suspendidos en sistema mixto de 12"x14"	88
Tabla 32. Análisis estructural del ducto en tramos suspendidos en sistema mixto de 6"x8"	89
Tabla 33. Control de propagación de fracturas dúctiles para sistema mixto de 12"x14" y 6"x8"	91
Tabla 34. Verificación de radios de giro para la tubería de acero al carbono de 14" y de FRP de 12"	94
Tabla 35. Verificación de radios de giro para la tubería de acero al carbono de 8" y de FRP de 6"	95
Tabla 36. Cálculo de flotabilidad de la tubería del sistema mixto de 6"x 8"	97
Tabla 37. Cálculo de flotabilidad de la tubería del sistema mixto de 12"x 14"	98
Tabla 38. Reemplazo de tuberías de acero al carbono por un sistema mixto en Consorcio Terminales.	99
Tabla 39. Requerimientos mínimos y estándares de materiales.	103
Tabla 40. Relación ancho-espesor para elementos sometidos a compresión.	105
Tabla 41. Distancia mínima al borde en pernos de anclaje	113
Tabla 42. Tamaño mínimo de soldadura de filete	114
Tabla 43. Densidades de corrientes requeridas para protección catódica de acero desnudo en ambiente marino en diversas zonas geográficas	133
Tabla 44. Factor de deterioro del revestimiento para tuberías submarinas	134
Tabla 45. Factor de deterioro del revestimiento para tuberías en tierra	139
Tabla 46. Mediciones de resistividad según método de cuatro puntas de Wenner	136

Tabla 47. Características electroquímicas típicas de ánodos138

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido de figuras	Pág.
Figura 1. Sistema mixto de tuberías	13
Figura 2. Ubicación del proyecto	15
Figura 3. Procedimiento de cementación en la zona on-shore	19
Figura 4. Procedimiento de cementación en la zona off-shore	20
Figura 5. Sistema mixto de tuberías tamaño 12"x14"	20
Figura 6. Sistema mixto de tuberías tamaño 6"x 8"	23
Figura 7. Composición sistema mixto de tuberías	28
Figura 8. Corriente marina alrededor de una tubería.....	74
Figura 9. Velocidad y aceleración máximas del flujo de agua	80
Figura 10. Fuerzas hidrodinámicas sobre ductos submarinos con frente de olas paralelas al tendido	81
Figura 11. Valores para determinar factor de longitud efectiva.	104
Figura 12. Plancha base.....	109
Figura 13. Plancha base resistente a momentos de columna.	110
Figura 14. Detalle típico soporte metálico de tubería mixta.	116
Figura 15. Sección de perfil de columna del soporte metálico.	119
Figura 16. Cálculo del módulo plástico con respecto al eje “y”	121
Figura 17. Vista en planta de la plancha base	123
Figura 18. Ubicación de la fuerza de compresión y tensión sobre la plancha	124
Figura 19. Momentos a la derecha del centro del patín	125
Figura 20. Ubicación de fuerza de tensión para soldadura de filete entre columna y plancha.....	128

Figura 21. Base de concreto del soporte marino.....	129
Figura 22. Diagrama esquemático del sistema de protección catódica por corriente impresa	131
Figura 23. Medición resistividad método 4 puntas wenner	136
Figura 24. Arquitectura preliminar SCADA	145
Figura 25. Detección de fugas por onda de presión negativa	148
Figura 26. Instalación del LDS por ondas acústicas de presión negativa, detección de fugas por onda de presión negativa	149
Figura 27. Esquema de inyección de aire en varillones de acero al carbono	153
Figura 28. Junta en tubería FRP espiga–campana	156
Figura 29. Grapas para junta a presión unión de tuberías FRP	156
Figura 30. Costos de tuberías y accesorios 12”Ø y 6”Ø	161
Figura 31. Costos de pintura e inspección	161
Figura 32. Costos de tuberías y accesorios 14”Ø y 8”Ø	162
Figura 33. Costos recubrimiento 3LPE y cementación.....	162
Figura 34. Costos tuberías de fibra de vidrio 12”Ø y 6”Ø.....	163

ÍNDICE DE ECUACIONES

Contenido de ecuaciones	Pág.
Ecuación 1. Pérdida de carga por fricción.	29
Ecuación 2. Número Reynolds.....	29
Ecuación 3. Factor de fricción para flujo laminar..	30
Ecuación 4. Factor de fricción para flujo turbulento.....	30
Ecuación 5, 6. Cálculo de espesor mínimo de tubería de acero al carbono	35
Ecuación 7, 8. Cálculo de espesor mínimo de pared para tubería de fibra de vidrio	35
Ecuación 9,10. Verificación del espesor y presión de la pared de tubería de fibra de vidrio	42
Ecuación 11-16. Verificación del espesor y presión de la carcasa de la tubería de acero al carbono	46
Ecuación 17-20. Tensión efectiva en la tubería	51
Ecuación 21. Diferencial de presión y cargas longitudinales	55
Ecuación 22-25. Presiones externas para tuberías no ovalizadas.	58
Ecuación 26-30. Presiones externas para tuberías ovalizadas.	62
Ecuación 31-32. Presiones de colapso por pandeo.	66
Ecuación 33. Velocidad de propagación de la onda de presión.	69
Ecuación 34. Tiempo de propagación de la onda.....	69
Ecuación 35. Sobrepresión causada por el golpe de ariete.	69
Ecuación 36. Fuerza de arrastre	74
Ecuación 37. Fuerza de levantamiento.....	74
Ecuación 38. Peso unitario mínimo del ducto	75

Ecuación 39. Periodo para la teoría de Airy onda lineal	79
Ecuación 40. Velocidad máxima del agua en el fondo marino	79
Ecuación 41. Aceleración máxima del agua en el fondo marino	79
Ecuación 42. Fuerza horizontal máxima sobre la tubería	80
Ecuación 43. Fuerza vertical máxima sobre la tubería	80
Ecuación 44. Coeficientes de formas para acciones verticales y horizontales	81
Ecuación 45. Mínimo valor de energía absorbido	90
Ecuación 46. Esfuerzo de diseño circunferencial	90
Ecuación 47. Radio de giro de tuberías de acero	92
Ecuación 48. Radio de giro de tuberías de FRP	92
Ecuación 49. Diferencia de esfuerzos axiales	92
Ecuación 50. Esfuerzo axial aplicado debido a presiones internas.....	92
Ecuación 51. Fuerza boyante	96
Ecuación 52. Cortante sísmico horizontal	100
Ecuación 53. Vvelocidad de diseño del viento	101
Ecuación 54. Presión o succión del viento	101
Ecuación 55. Pandeo elástico fórmula de Euler	103
Ecuación 56. Relación esbeltez en fórmula de Euler	103
Ecuación 57. Resistencia nominal a la compresión	105
Ecuación 58-59. Esfuerzo de pandeo crítico elástico.....	106
Ecuación 60. Esfuerzo cortante nominal.....	106
Ecuación 61-63. Coeficiente de cortante del alma.....	106
Ecuación 64. Momento nominal de la sección.....	107
Ecuación 65. Momento plástico.....	108

Ecuación 66. Momento de fluencia.....	108
Ecuación 67. Resistencia nominal de contacto del concreto.....	109
Ecuación 68. Momento a la derecha del centro del ala.....	110
Ecuación 69. Reacción última sobre la plancha base.....	111
Ecuación 70. Fuerza de tracción en la plancha.	111
Ecuación 71. Área del perno de anclaje requerido.....	111
Ecuación 72. Resistencia nominal a la tracción	112
Ecuación 73. Resistencia nominal al corte	112
Ecuación 74. Resistencia nominal de la soldadura al corte	113
Ecuación 75. Factor de ruptura revestimiento (coating break)	133
Ecuación 76. Cálculo de corriente requerida	137
Ecuación 77. Descarga máxima por ánodo	138
Ecuación 78. Masa neta de ánodo de chatarra	139
Ecuación 79. Resistencia del ánodo de chatarra	140
Ecuación 80. Resistencia de la cama de ánodos	141
Ecuación 81. Factor de corrección por interferencia	141
Ecuación 82. Resistencia total del sistema	142
Ecuación 83. Voltaje para dimensionamiento del rectificador	143

ÍNDICE DE APÉNDICES

Contenido de apéndices	Pág.
Apéndice A. Características hidrocarburo petróleo industrial 500 y diésel B5 S50	169
Apéndice B. Especificaciones tubería fibra de vidrio	171
Apéndice C. Especificaciones del fabricante tuberías de acero al carbono API 5L Gr42	182
Apéndice D. Norma ASME B31.4-2019.....	184
Apéndice E. Norma API 1111-2005.....	188
Apéndice F. Norma API 5L-2018	191
Apéndice G. Registro de calidad prueba neumática.....	195
Apéndice H. Registro de calidad de prueba hidrostática en tubería spool de fibra de vidrio de 12"x 6"	196
Apéndice I. Registro de calidad de prueba hidrostática en tubería spool del sistema mixto de 12"x 14" y 6"x8".....	197
Apéndice J. Registro de calidad de vaciado de cementación en espacio anular en tubería spool del sistema mixto de 12"x 14" y 6"x 8"	198
Apéndice K. Plano típico en planta de un sistema mixto de tuberías on-shore y off-shore.....	199
Apéndice L. Planos isométricos típicos de un sistema mixto de tuberías on- shore y off-shore.	200
Apéndice M. Diagrama de conexión actual con sistema de abastecimiento de altamar y descarga en planta.	206

Apéndice N. Diagrama de conexión propuesto con sistema mixto en abastecimiento de altamar y descarga en planta.	207
---	-----

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consiste en el planteamiento de reemplazo de tuberías de descarga de combustible de acero al carbono, por tuberías de sistema mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto en Consorcio Terminales. El cual tiene como objetivo instalar un nuevo sistema de tubería con el método experimental aplicado y los objetivos logrados fue demostrar que si es factible poder ejecutar el proyecto de tesis con la aplicación de nuestro proyecto objetivos demostrados en nuestras conclusiones y recomendaciones planteadas.

Palabras claves: Sistemas, Tuberías y Combustibles

ABSTRACT

The present research work consists of the proposal to replace carbon steel fuel discharge pipes with mixed system pipes made up of fiberglass, steel and concrete in Consorcio Terminales. The objective of which is to install a new piping system with the experimental method applied and the objectives achieved were to demonstrate that it is feasible to execute the thesis project with the application of our project, objectives demonstrated in our conclusions and recommendations.

Keywords: Systems, Pipes and Fuels

INTRODUCCIÓN

La presente investigación consiste en el reemplazo de tuberías de descarga de combustible Petróleo Industrial 500 y Diésel B5 S50 de acero al carbono por tuberías de sistema mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto en Consorcio Terminales. Así mejorar el proceso de operación que a la vez se debe manifestarse económicamente favorable.

No podemos dejar de mencionar que constantemente se realizan intervenciones para sustituir tuberías de acero al carbono lo que se estaría reflejando es la antigüedad del sistema de tuberías.

Por esta razón proponemos el reemplazo del sistema de tuberías de acero al carbono por el que se denomina sistema mixto, buscando modernizar y mejorar el sistema de acuerdo a la nueva técnica y normas vigentes.

En el capítulo I se realiza el planteamiento general, se describe el actual proceso de cómo se procede a descargar el combustible en Consorcio Terminales, los problemas que se presentan; posterior se muestra la formulación del problema, objetivos, la justificación que nos motiva realizar nuestra investigación, los alcances que se tendrá, limitaciones de nuestro proyecto, las variables se analizan independiente y dependiente identificando su dimensión, indicador, instrumento-ítems o las actividades de investigación, tales según corresponda y nuestras hipótesis.

En el capítulo II con el marco teórico, se muestran los antecedentes, que nos sirvieron como base para ejecutar la aplicación metodológica, también plasmamos las bases teóricas, normas nacionales e internacionales, así como los tipos y características de tuberías que conformarán el sistema mixto que conseguirá

mejoras en los procesos de descarga de combustible en el mar, las consideraciones técnicas y de seguridad que se deben tener en cuenta en este planteamiento de reemplazo de tuberías de descarga de combustibles de acero al carbono por un sistema de tuberías mixta consistente en fibra de vidrio, acero y concreto.

En el capítulo III método, se muestra el tipo de la investigación, el diseño de la investigación, se identifica la población y la muestra de estudio. Por último, las técnicas e instrumentos para la recolección de datos, su procesamiento y su posterior análisis.

En el capítulo IV análisis y diseño características de los ductos a ser reemplazados, las nuevas facilidades que será la instalación de los ductos, proceso con detalles de instalación, análisis por disciplinas de acuerdo y diseño de acuerdo a normas mediante un procedimiento de cálculos.

En el capítulo V análisis e interpretación de resultados se realizó el análisis de costos mediante hojas de cálculo Excel describiendo los materiales y costos unitarios de cada sistema de tuberías de acero al carbono como el sistema mixto para finalmente realizar una comparación de costos y la discusión de resultados.

En el capítulo VI conclusiones y recomendaciones, dirigidas a la empresa a fin de que se pueda tomar como base nuestra investigación y debemos de finalizar con los objetivos planteados y demostrando que nuestro proyecto es viable para ser aplicado con fines de mejorar el sistema de transporte o descarga de combustibles Petróleo Industrial 500 y Diésel B5 S50 aportando las mejoras también al área de operaciones en las empresa que se dediquen a la comercialización o transporte de combustibles negros y blancos, proyecto que

definitivamente lo hemos desarrollado de manea experimental aplicativa con el fin de poder conseguir el objetivo planteado en empresas privadas y públicas que tiene este tipo de operaciones de transporte y comercialización de combustibles.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.- Descripción de la realidad del problema

Consortio Terminales cuenta con un sistema de descarga de combustible mediante tuberías de acero al carbono, situación que obliga a ejecutar reposiciones constantes ocasionadas por la antigüedad de las mismas ya que vienen operando desde el año 1950.

Por lo tanto, existe la necesidad de reemplazar el sistema de tuberías existente por tuberías de sistema mixto, adicionalmente que hoy en día se plantea nuevas exigencias y requerimientos. Por estas razones se propone la implementación con mejoras al sistema, con los requerimientos técnicos y normas vigentes.

1.2.- Definición del problema

1.2.1.- Problema general

¿Cómo reemplazar tuberías de acero al carbono por tuberías de sistema mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto para la descarga de combustible en Consorcio Terminales?

1.2.2.- Problemas específicos

¿Es posible reemplazar las tuberías de acero al carbono en Consorcio Terminales?

¿Se puede utilizar tuberías de sistema mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto para la descarga de combustible en Consorcio Terminales?

¿Cuál es la diferencia de costos al realizar el reemplazo de tuberías de acero al carbono por las tuberías de sistema mixto en Consorcio Terminales?

1.3.- Objetivos de la investigación

1.3.1.- Objetivo general

Reemplazar tuberías de acero al carbono por tuberías de sistema mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto para la descarga de combustible en Consorcio Terminales.

1.3.2.- Objetivos específicos

Reemplazar las tuberías de acero al carbono en Consorcio Terminales.

Instalar tuberías de sistema mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto para la descarga de combustible en Consorcio Terminales.

Realizar la comparación de costos con las tuberías de sistema mixto en Consorcio Terminales.

1.4.- Justificación

El reemplazo de tuberías de acero al carbono por tuberías de sistema mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto para la descarga de combustible, se haría por los constantes servicios de reposición debido al deterioro de las tuberías de acero al carbono, que se originan por la antigüedad de tiempo operando, así mismo modernizar las líneas submarinas y garantizar la descarga de combustible de los buques tanqueros.

1.5.- Alcances y limitaciones

Esta investigación se propone con el objetivo de reemplazar las tuberías de acero al carbono por tuberías de sistema mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto para la descarga de combustible en Consorcio Terminales. Para esto se ha considerado los continuos servicios de reposición en las tuberías de acero al carbono por la antigüedad con la que vienen operando.

Este planteamiento está dirigido para ser aplicado desde el punto de conexión de la tubería submarina con dirección al buque tanquero, desde donde se procede a realizar la descarga del combustible.

1.6.- Variables

1.6.1.- Identificación de variables

1.6.1.1.- Variable independiente (V.I.).

- Reemplazo de tuberías

1.6.1.2.- Variable dependiente (V.D.).

- Descarga de combustible

1.6.2.- Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalidad de la variable independiente

Variable	Definición	Dimensión	Indicadores	Instrumento o Ítem
				Manuales
Reemplazo de tuberías	Aliviar una carga del fluido de un lugar a otro	Flujo hidráulico	Caudal Presión Temperatura	Normas API Datos técnicos fabricante

Fuente: Propia

Tabla 2

Operacionalidad de la variable independiente

Variable	Definición	Dimensión	Indicadores	Actividades de Investigación Instrumento o Ítem
Descarga de combustible	Conjunto de componentes conectados uno a continuación de otro y que comparten un mismo caudal.	Distribución general	Distribución del área	Evaluación técnica y de seguridad.
		Accesorios	Tipo de Combustible	Hoja MSDS
			Tecnología	Selección de la tecnología adecuada en cada etapa y proceso.
		Inversión	Precios unitarios	Evaluación económica

Fuente: Propia

1.7.- Hipótesis de la investigación

1.7.1.- Hipótesis general

Realizar el reemplazo de tuberías de acero al carbono por un sistema de tuberías mixto para la descarga de combustible en Consorcio Terminales, es el más indicado.

1.7.2 . - Hipótesis específicas

- El reemplazo de tuberías de acero al carbono en Consorcio Terminales es de necesidad realizarlo.
- Instalar tuberías de sistema mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto para la descarga de combustible son las más convenientes.
- El reemplazo de tuberías de acero al carbono por tuberías de sistema mixto es menos costoso.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- Antecedentes de la investigación

Los materiales de tuberías que se utilizan para en un sistema de descarga de combustible son por lo general de acero y también no metálicos, entre los materiales no metálicos están los plásticos, asbesto, cemento y fibra de vidrio que se utilizan para líneas de flujo.

Según Eslinger (1999) en su publicación expresa que “las ventajas relevantes de la tubería no metálica son su resistencia a la corrosión y el alivio de los problemas ocasionados por depósitos de parafina y carbonato de calcio en el interior”. Frecuentemente el costo total de estos tipos o sistemas de tubería es competitivo en comparación con las tuberías de acero al carbono, donde las presiones de operación y las temperaturas se permiten, mientras la parafina y la corrosión representan serios problemas.

2.2.- Normas y códigos aplicables al proyecto

Las actividades a ejecutarse seguirán las normas, códigos y prácticas nacionales e internacionales en cada disciplina:

2.2.1.- Nacional

- **Leyes o decretos**
 - DS-081-2007-EM, reglamento de transporte de hidrocarburos por ductos.
 - DS-026-94-EM, reglamento de seguridad para el transporte de hidrocarburos.
 - RNC, reglamento nacional de construcciones.
- **Normas técnicas**
 - NTP E.090, norma técnica E.090 estructuras metálicas.
 - NTP E.050 norma técnica E.060 concreto armado.
 - CEP código de electricidad del Perú 2015.

2.2.2.- Internacional

- **Normas API**
 - API Spec 5L Especificación de Tubería.
 - API RP 1111 Diseño, construcción, operación y mantenimiento de tuberías de hidrocarburos costa afuera (diseño de estado limitado).
- **Normas ASME**
 - ASME B 31.4 Sistemas de tuberías de transporte de líquidos y lodos.
- **Documentos de referencia, manuales y literatura técnica**
 - Proposed General Specification for Wavistrong Filament Wound Epoxy Pipe System de (Future Pipe Industries B.V.2004).

2.3.- Bases teóricas

2.3.1.- Especificaciones técnicas

Todas las tuberías, accesorios y válvulas se someterán a los requisitos del código ANSI/ASME B31.4 “Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids”.

2.3.2.- Tuberías

Las tuberías a instalar es el sistema de tuberías mixto el cual está compuesto por una tubería interna no metálica, una tubería externa de acero al carbono y un espacio anular relleno por una lechada de cemento.

2.3.3.- Tubería de acero envolvente exterior de 14" (350 mm) diámetro.

Ducto fabricado con tubería de acero al carbono de 14" (350 mm) de diámetro nominal, de 0,375" de espesor, especificación API 5L PSL2 Gr X42, como carcasa envolvente del sistema mixto, recubierta exteriormente con sistema tricapa de polietileno de alta densidad de 2,2 mm de espesor y 610 m de longitud.

2.3.3.1.- Tubería de fibra de vidrio 12" (300mm) diámetro.

Tubería de resina epóxica reforzado con fibra de vidrio FRP, de diámetro interior 12" (300mm), de espesor 4,6 mm y 610 m de longitud, la cual conduce los productos que se descargan y garantiza la adecuada protección contra la corrosión interior.

2.3.3.2.- Lechada de cemento espacio anular.

Lechada de cemento con resistencia mínima de 15 kg/cm² entre la tubería de acero y la tubería de polietileno reforzado con fibra de vidrio FRP.

2.3.4.- Tubería de acero envolvente exterior de 8" (200 mm) diámetro

Ducto fabricado con tubería de acero al carbono de 8" (200 mm) de diámetro nominal, de 0,277" de espesor, especificación API 5L PSL2 Gr X42, como carcasa envolvente del sistema mixto, recubierta con sistema tricapa de polietileno de alta densidad de 2,2 mm de espesor y 610 metros de longitud.

2.3.4.1.- Tubería de Fibra de Vidrio 6" (150 mm) diámetro.

Tubería de resina epóxica reforzado con fibra de vidrio FRP, de diámetro interior 6" (150 mm), de espesor 3,2 mm y 610 m de longitud, la cual conduce el agua para la limpieza de la tubería de transporte de combustible y garantiza la adecuada protección contra la corrosión interior.

2.3.4.2.- Lechada de cemento espacio anular.

Lechada de cemento con resistencia mínima de 15 kg/cm² entre la tubería de acero y la tubería de polietileno reforzado con fibra de vidrio FRP.

2.3.4.3.- Instalaciones de seguridad para prevenir fallas de elementos componentes.

El sistema contará con instalaciones para prevenir y cuando menos atenuar las fallas de sus elementos componentes, provocados por factores externos. Los factores externos que pueden crear situaciones de riesgo, son la corrosión de las tuberías, desplazamiento indeseado y exagerado del buque tanque por la ocurrencia de una actividad climatológica y/o marítimas imprevistas, que podría poner en riesgo el sistema de amarras del buque y de las mangueras por la presencia de esfuerzos axiales excesivos, que sobrepasen los límites de resistencia

de las mismas. Para prevenir las consecuencias de estas situaciones de riesgo, se dispondrá de los siguientes elementos de seguridad:

- Protección externa en el 100% de la tubería envolvente o carcasa de acero del sistema mixto, con recubrimiento contra la corrosión 3LPE polietileno tricapa.
- Para prevenir las fallas por corrosión externa por desgastes o pérdidas del material de la envolvente o carcasa del ducto submarino, se contará con un sistema de protección catódica por corriente impresa.
- Pruebas hidrostáticas periódicas de acuerdo a la normatividad vigente.
- Internamente no se producirá corrosión del ducto submarino, puesto que una tubería no metálica (fibra de vidrio) es introducida dentro de la envolvente de acero existente y se le adiciona lechada de cemento para rellenar el espacio anular, obteniéndose como resultado un sistema con inexistencia de corrosión galvánica indefinidamente, proveyendo una expectativa de vida ilimitada del sistema.
- Se dispondrá de un sistema de detección de fugas de los ductos submarinos.

2.3.5.- Sistema SCADA

La tecnología contempla facilidades como la que sugerimos la instalación de un sistema SCADA el cual permitirá que un evento de fuga sea detectado, inmediatamente y se activará la alarma que, a través de dicho sistema, será comunicado al operador y este advertirá a la tripulación del buque para que procedan a parar el bombeo.

2.3.6.- Características de los hidrocarburos y volúmenes a transportar

Los hidrocarburos a descargar por la tubería de 12" (300 mm) son del tipo combustibles blancos y negros diésel B5 S50 y petróleo industrial 500, respectivamente.

Por la tubería de limpieza o flushing de 6" (150 mm) se transportará agua dulce, la cual se utiliza para la limpieza de la línea principal de 12" (300 mm) antes mencionada, después de una recepción de petróleo industrial 500 o antes de una recepción de diésel B5 S50.

Los flujos a transportar por la tubería de combustible de 12" (300 mm) son 3 500,00 bbl/h de petróleo industrial 500 y 5 000,00 bbl/h de diésel B5 S50, mientras que el flujo de transporte a través de la tubería de limpieza es de un caudal de 1 200 ,00 bbl/h de agua.

2.3.7.- Condiciones ambientales y meteorológicas del sitio para diseño del sistema mixto de tuberías

Para el diseño se considera las que se encuentran en la zona del mar en la costa del Pacífico, en la Provincia de Ilo playa El Diablo del Departamento de Moquegua, es decir las que se manifiestan en el área asignada para reemplazar las tuberías de acero al carbono por un sistema mixto de tuberías y son las que mostramos en la tabla 3.

Tabla 3*Condiciones meteorológicas prevalecientes en el sitio.*

Variable	Parámetros	Unidad	Valor
Áreas	Marina		
Cercanías de la unidad de la playa el diablo.	Marina	ppm de gas	1,0
Elevación, sobre el nivel del mar		m (1,000 m.s.n.m. para efectos de diseño)	21
Temperatura aire ambiente (bulbo seco)	Máxima en verano	°C	32,2
	Media	°C	20,0
	Mínima en invierno	°C	10,0
Temperatura aire ambiente (bulbo húmedo):	Máxima en verano	°C	31,4
	Media	°C	18,1
	Mínima en invierno	°C	7,2
Humedad relativa del aire	Máxima promedio	%	93
	Media	%	84
	Mínima promedio	%	66
Temperatura punto de rocío del aire	Máxima en verano	°C	23,3
	Media	°C	17,2
	Mínima en invierno	°C	10,6
Presión barométrica	Normal	kPa	101,325
	Media	kPa	101,080
Precipitación anual promedio		mm/año (promedio)	0
Condiciones del viento	Exposición UBC	C	C
	Factor de importancia del viento (I w)		1,0
	Velocidad máxima	m/s	18,3
	Velocidad de diseño	m/s	33,5
Considerando la temperatura media y valores de humedad, se presentan a continuación los valores de composición del aire:	Oxígeno	%v	20,5
	Nitrógeno	%v	77,5
	Agua	%v	2,0
El medio ambiente es costero, polvo y exposición de agua de mar dispersa es alta			
Fuente: SENAMHI, 2018			

2.3.8.- Parámetros y consideraciones de diseño

2.3.8.1.- Diseño de los ductos submarinos.

El presente diseño para este proyecto, en ningún caso podrá tener alguna exigencia menor a la establecida en la Norma ASME B 31.4.

En la figura 2, mostramos la tubería de sistema mixto que para este proyecto está diseñado bajo el nivel de riesgo I, en el mismo se considera que la tubería interna no metálica de resina epóxica reforzado con fibra de vidrio está diseñada para manejar la presión de operación del sistema sin tener que depender de la tubería exterior de acero existente para contener la presión. La tubería metálica exterior se utiliza principalmente como conducto para el revestimiento y para proveer soporte estructural y protección contra impactos. La lechada de cemento de relleno asegura al revestimiento en su lugar, previniendo daños por movimiento debido a los golpes de ariete y a la dilatación térmica.

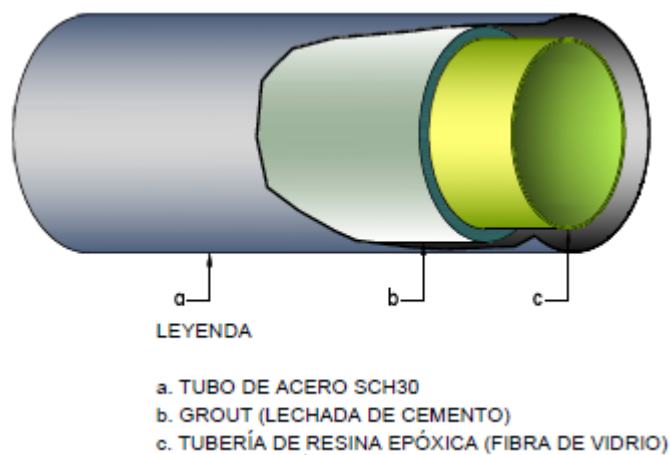


Figura 1. Sistema mixto de tuberías de paredes múltiples

Fuente: Propia

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1.- Tipo de investigación

El tipo de investigación es tecnológica, porque propone transformar el conocimiento puro en conocimiento útil.

3.2.- Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es aplicado, porque tiene como objetivo resolver un problema o planteamiento específico.

3.3.- Población y muestra

La población y muestra se conforma por el sistema de tuberías para la descarga de combustible en Consorcio Terminales porque es un estudio de caso único.

Las dos tuberías a reemplazar, se encuentran en la zona del mar y forman parte del sistema.



Zona de despacho y tanques. / Dispatch and tanks area.

CONSORCIO TERMINALES

Ilo Terminal General Characteristics

System: Buoyage Mooring

Location

Latitude : 17° - 38.237' South
Longitude : 71° - 20.705' West

Access : Direct by Mariano Lino Urquieta and Costanera, avenues without restrictions. Ilo - Moquegua department.

Limits

North : CEP San Luis College.
South : Uncultivated lands.
East : Mariano Lino Urquieta Avenue
West : Costanera-Pacific Ocean Avenue

Características Generales Terminal Ilo

Sistema: Multiboyas de Amarre

Ubicación

Latitude : 17° - 38.237' Sur
Longitude : 71° - 20.705' Oeste

Accesos : Directo por la Avenida Mariano Lino Urquieta y Avenida Costanera. En ambos accesos sin restricciones. Ilo - Departamento de Moquegua

Límites :

Por el Norte : Colegio CEP San Luis.
Por el Sur : Terrenos baldíos.
Por el Oriente : Avenida Mariano Lino Urquieta.
Por el Occidente: Avenida Costanera - Océano Pacífico

Figura 2. Ubicación del proyecto

Fuente: PetroPerú, 2018

Departamento: Moquegua

Provincia: Ilo

Ubicación: Av. Mariano Lino Urquieta y Av. Costanera s/n

3.4.- Descripción de instrumentos para recolección de datos

3.4.1.- Técnicas

- La documental con lo que se realizará la recopilación de evidencias.

3.4.2.- Instrumentos

- Las normativas vigentes del Organismo Supervisor de Hidrocarburos.
- Manuales de fabricación para la correcta selección de equipos y accesorios que intervienen en el diseño.

- Software de aplicación Excel.

3.4.3.- Procesamiento de datos

Para procesar los datos del nuevo diseño utilizamos el software Excel para los cálculos de diseño, costos y presupuestos de las tuberías y materiales involucrados en el sistema planteado.

3.4.4.- Análisis de datos

Los resultados del diseño, costos y presupuestos obtenidos y analizados de las tuberías, se presentó utilizando cuadros en hojas de cálculo Excel.

La Comparación de costos y presupuestos de los sistemas de tuberías se realizó entre el sistema antiguo y el sistema mixto.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISEÑO

4.1.- Ductos a ser reemplazados

Los ductos submarinos existentes a ser reemplazados por otros nuevos comprenden:

- Tubería de acero al carbono API SPEC 5L Gr. X B, 12" Ø (300mm) schedule 30 (espesor 0,33"), PSL 2, extremos biselados, sin costura, recubrimiento con pintura exterior epóxica de alto contenido de sólidos para ambientes marinos con espesor de revestimiento de 15 mils, longitud de la junta 12 m (40 ft).

- Tubería de acero al carbono API SPEC 5L Gr. X B, 6" Ø, (150 mm), schedule 30 (espesor = 0,25 pulg), PSL 2, extremos biselados, sin costura, recubrimiento con pintura exterior epóxica de alto contenido de sólidos para ambientes marinos con espesor de revestimiento de 15 mils, longitud de la junta 12 m (40 ft).

Ambas líneas a ser remplazadas tienen una longitud de 610 metros cada una desde su terminación en el lecho marino hasta la caja de concreto ubicada en tierra. Estas tuberías van juntas y paralelas en todo su recorrido.

4.2.- Nuevas facilidades

Los nuevos ductos a instalar son las tuberías de sistema mixto, en este proyecto se considera que la tubería interna no metálica (FRP) está diseñada para manejar la presión de operación del sistema sin tener que depender de la tubería exterior de acero existente para contener la presión. La tubería envolvente exterior se utiliza principalmente como conducto para el revestimiento y para proveer soporte estructural y protección contra impactos. La lechada de cemento de relleno asegura al revestimiento en su lugar, previniendo daños por movimiento relativos en el revestimiento o presión de vacío.

4.2.1.- Reemplazo tubería descarga de combustible 12" (300 mm), sistema mixto

- Tubería interna: Tubería de fibra de vidrio Wavistrong, 12" (300 mm) tipo EST 16, conexión espiga-campana TB/TS, presión nominal 16 bar (232,06 psi), velocidad erosiva entre 3 y 12 pies/s, aunque incluso pudieran trabajar hasta 15 pies/s, rugosidad absoluta 0,00021" (0,00533 mm), de 4,6 mm de espesor de pared, con un peso de 11 kg/m, de 610 m (2 001,3 pies) de longitud, aproximadamente, entre el punto terminal del arreglo de tuberías submarino y la caja de conexiones en la LAM "línea de alta marea".
- Tubería envolvente: Tubería de acero API 5L Gr X 42, diámetro 14" (350 mm) SCH 30, espesor de pared 0,375" PSL2, con un peso de 54,57 lb/pies (81,21 kg/m), con recubrimiento externo tricapa 3LPE de 2,2 mm de espesor como mínimo, según Norma DIN 3060. La longitud del ducto es de 610 m (2 001,3 pies) al igual que el ducto de fibra de vidrio.

- Espacio anular: Entre la tubería de fibra y la de acero será relleno con una lechada de cemento Portland tipo V, ASTM C-150 local. La densidad de la mezcla debe encontrarse en el rango de 10 a 14 lb/gal. Esta mezcla debe ser ensayada mediante el cono de fluidez ASTM C-939 “standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete - flow cone method”, debe dar un rango entre 15 a 26 segundos. La resistencia de la cementación de este espacio será 15 kg/cm² como mínimo ensayado según ASTM C-942. En la figura 3 y figura 4 se muestra el procedimiento gráfico de cementación.

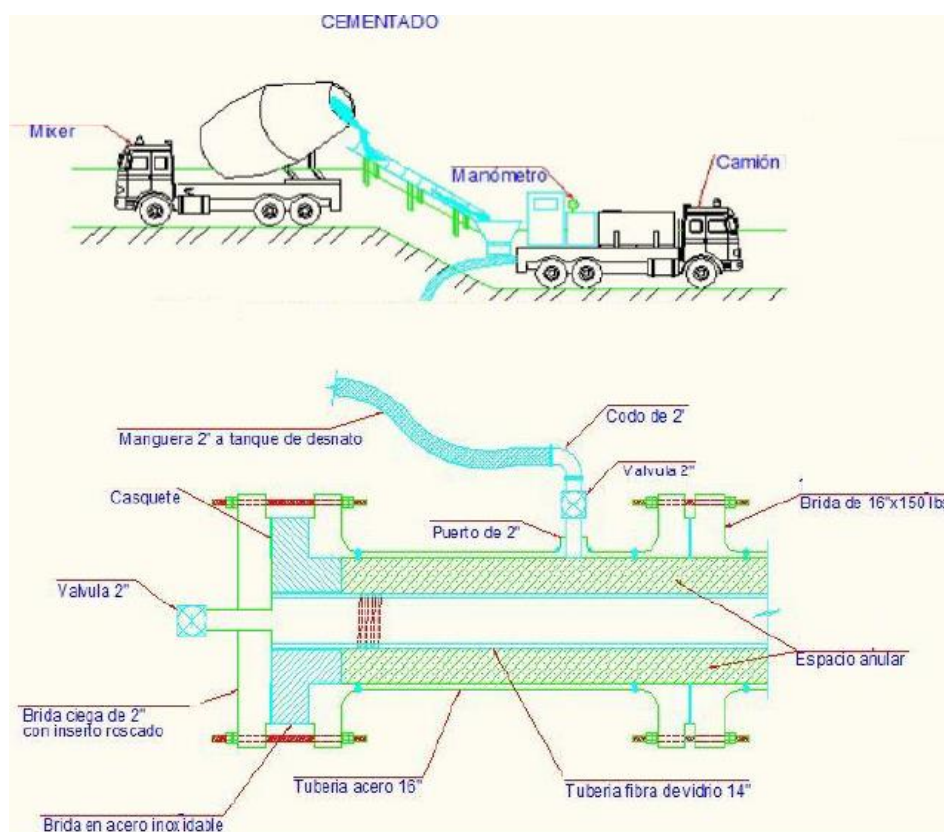


Figura 3. Procedimiento de cementación en la zona on-shore imagen referencial

Fuente: Propia

Nota: On-shore, se debe entender mar afuera.



Figura 4. Procedimiento de cementación en la zona off-shore imagen referencial

Fuente: Propia

Nota: Off-shore, se debe entender mar adentro.

En la figura 5 mostramos el esquema con las dimensiones de las tuberías diámetro y el espesor.

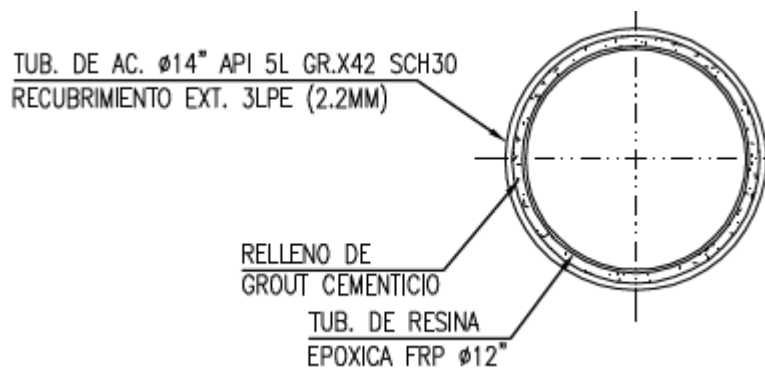


Figura 5. Sistema de tuberías de paredes múltiples , tamaño 12”x 14”

Fuente: Propia

- La presión máxima de suministro en descarga de bombas desde el buque será de 100 psi. La máxima presión de operación MPO es de 140 psi y la máxima presión permisible de operación es 165 psi.

- Altura máxima desde la descarga de la bomba del buque, hasta la mayor profundidad de la tubería sobre el arreglo de tuberías submarino en el fondo del mar 32 m.
- Máxima profundidad del ducto submarino 20 m incluyendo variaciones de altura por mareas y olas.
- Todas las tuberías serán diseñadas y probadas para operar, a condiciones iguales, a los límites de diseño de los equipos, a los cuales se conecten. Para el cálculo de la presión de diseño seguiremos estas guías.

Si $P_{\text{máxima de operación (MOP)}} \leq 300 \text{ psi} \leq P_{\text{diseño}} = P_{\text{máxima de operación}} + 25 \text{ psi}$

Si $P_{\text{máxima de operación (MOP)}} > 300 \text{ psi} > P_{\text{diseño}} \Rightarrow 1,1 P_{\text{máxima de operación}}$

- Se dejarán facilidades para la instalación de instrumentos de medición, de acuerdo a los requerimientos, preferiblemente en las tuberías de acero al carbono.
- Se considera la instalación de trampas bidireccionales de lanzado y recepción de Polly Pig, para la limpieza o inspección de la tubería. Dispondrán de todas las conexiones requeridas para su operación en forma segura y sin afectar el ambiente.
- Los accesorios de la tubería de acero al carbono cumplirán con la Norma ANSI B16.5 “pipe flanges and flanged fittings”.
- El uso de bridas en la tubería deberá estar limitado a las conexiones con las válvulas.

- La temperatura máxima de diseño de los equipos e instalaciones será 50 °F por encima de la temperatura máxima de operación, siendo esta última la temperatura más alta que se alcance en el proceso, incluyendo casos de operaciones especiales.
- La temperatura mínima de diseño de los equipos e instalaciones será la temperatura mínima de operación, siendo esta última, la menor temperatura que se alcance en el proceso, incluyendo casos de operaciones especiales.
- La tubería será sometida a una prueba hidrostática, cuya presión será 1,25 veces la presión de diseño de la tubería.
- La tubería y accesorios de la tubería de fibra de vidrio cumplirán con lo indicado en el manual “Proposed General Specification for Wavistrong Filament Wound Epoxy Pipe System de Future Pipe Industries B.V”.

4.2.2.- Reemplazo tubería de limpieza 6" (150 mm), sistema mixto

- Denominación: Sistema de tuberías mixto de paredes múltiples.
- Tubería interna: Tubería de fibra de vidrio Wavistrong, 6" (150 mm) tipo EST 16, conexión espiga-campana TB/TS, presión nominal 16 bar (232,06 psi), velocidad erosiva entre 3 y 12 pies/s, aunque incluso pudieran trabajar hasta 15 pies/s, rugosidad absoluta 0,00021". (0,00533 mm), de 3,2 mm de espesor de pared, con un peso 4 kg/m, de 610 m (2 001,3 pies) de longitud, aproximadamente, entre el punto terminal del arreglo de tuberías submarino y la caja de conexiones en la LAM.
- Tubería envolvente: Tubería de acero API 5L Gr X 42, diámetro 8" (200 mm) SCH 30, espesor de pared 0,277". PSL2, con un peso de 24,70 lb/pies

(36,76 kg/m), con recubrimiento externo tricapa de polietileno (3 LPE) de 2,2 mm de espesor como mínimo, según Norma DIN 3060. La longitud del ducto es de 610 m (2 001,3 pies) al igual que el ducto de fibra de vidrio.

En la figura 6, mostramos el esquema con las dimensiones de las tuberías diámetro y el espesor.

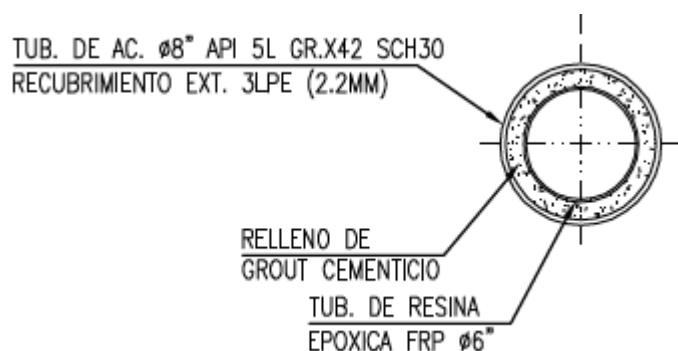


Figura 6. Sistema de tuberías de paredes múltiples tamaño 6"x 8"

Fuente: Propia

- La presión de suministro para el lavado de descarga de bombas es de 45 psi.
- Elevación de las bombas de limpieza "flushing" sobre el nivel del mar 12 m.
- Todas las tuberías serán diseñadas y probadas para operar, a condiciones iguales, a los límites de diseño de los equipos, a los cuales se conecten. Para el cálculo de la presión de diseño seguiremos la guía.

Si $P_{\text{máxima de operación (MOP)}} \leq 300 \text{ psi} \Rightarrow P_{\text{diseño}} = P_{\text{máxima de operación}} + 25 \text{ psi}$

Si $P_{\text{máxima de operación (MOP)}} > 300 \text{ psi} \Rightarrow P_{\text{diseño}} = 1,1 P_{\text{máxima de operación}}$

- Se dejarán facilidades para la instalación de instrumentos de medición, de acuerdo a los requerimientos de la disciplina instrumentación, preferiblemente en las tuberías de acero al carbono.

- La trampa de Polly Pig, dispondrá de todas las conexiones requeridas para su operación en forma segura.
- Los accesorios de la tubería de acero al carbono cumplirán con la Norma ANSI “pipe flanges and flanged fittings”.
- Las tuberías y conexiones de instrumentación que requieran ser bridadas deben estar construidas con acero al carbono, similar a la tubería a la que estará conectada y un diámetro mínimo de 2”.
- El uso de bridas en la tubería deberá estar limitado a las conexiones con las válvulas.
- La temperatura máxima de diseño de los equipos e instalaciones será 50 °F por encima de la temperatura máxima de operación, siendo esta última la temperatura más alta que se alcance en el proceso, incluyendo casos de operaciones especiales.
- La temperatura mínima de diseño de los equipos e instalaciones será la temperatura mínima de operación, siendo esta última, la menor temperatura que se alcance en el proceso, incluyendo casos de operaciones especiales.
- La tubería será sometida a una prueba hidrostática, cuya presión será 1,25 veces la presión de diseño de la tubería.
- La tubería y accesorios de la tubería de fibra de vidrio cumplirán con lo indicado en el manual “Proposed General Specification for Wavistrong Filament Wound Epoxy Pipe System de Future Pipe Industries B.V”.

4.3.- Disciplina mecánica y tuberías

Las normas, códigos, parámetros y criterios, que aplican para la disciplina mecánica y tuberías, se considerarán para el diseño del reemplazo de las tuberías existentes por un sistema mixto.

- Los accesorios de la tubería de acero al carbono cumplirán con la Norma ANSI B16.5 “pipe flanges and flanged fittings”.
- Las tuberías y conexiones de instrumentación que requieran ser bridadas deben estar construidas con acero al carbono, similar a la tubería a la que estará conectada y un diámetro mínimo de 2" (50 mm).
- Todas las tuberías serán diseñadas y probadas para operar, a condiciones iguales, a los límites de diseño de los equipos, a los cuales se conecten. Para el cálculo de la presión de diseño se presenta la siguiente guía.

Si $P_{\text{máxima de operación (MOP)}} \leq 300 \text{ psi} \Rightarrow P_{\text{diseño}} = P_{\text{máxima de operación}} + 25 \text{ psi}$

Si $P_{\text{máxima de operación (MOP)}} > 300 \text{ psi} \Rightarrow P_{\text{diseño}} = 1,1 P_{\text{máxima de operación}}$

- La temperatura máxima de diseño de los equipos e instalaciones será 50 °F por encima de la temperatura máxima de operación, siendo esta última la temperatura más alta que se alcance en el proceso, incluyendo casos de operaciones especiales.
- La temperatura mínima de diseño de los equipos e instalaciones será la temperatura mínima de operación, siendo esta última, la menor temperatura que se alcance en el proceso, incluyendo casos de operaciones especiales.
- Todas las tuberías serán sometidas a una prueba hidrostática, cuya presión será 1,25 veces la presión de diseño de la tubería. Se realizará la prueba hidrostática a la junta soldada de unión de las tuberías de fibra de vidrio y una prueba neumática a la junta soldada de las tuberías de acero.

- La tubería y accesorios de la tubería de fibra de vidrio cumplirán con lo indicado en el manual “Proposed General Specification for Wavistrong Filament Wound Epoxy Pipe System de Future Pipe Industries B.V”.
- El efecto de las temperaturas máximas y mínimas del agua que rodea a la tubería será considerado en el diseño del sistema de tuberías a instalar.
- Para el análisis de integridad de la tubería a instalar considerarán, de acuerdo a lo indicado en los códigos ASME B 31.4 “pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids” apéndice D, API SP 5L API specification 5L apéndice E, API RP 1111 “design, construction, operation, and maintenance of offshore hydrocarbon pipelines limit state design” apéndice F y DNV-RP—109 recommended practice on-bottom stability design of submarine pipelines, los siguientes aspectos:
 - Espesor y calidad de la tubería envolvente.
 - Espesor y calidad de la tubería interna (fibra de vidrio).
 - Cargas longitudinales.
 - Combinación de cargas.
 - Esfuerzo de colapso debido a presiones externas en tubería no ovalizadas.
 - Esfuerzo de colapso debido a presiones externas en tubería ovalizadas.
 - Colapso debido a la propagación del pandeo (buckles).
 - Cálculo del golpe de ariete en el sistema de tubería a instalar.
 - Análisis de estabilidad hidrodinámica de la tubería frente a fuerzas originadas por corrientes marinas permanentes.

- Análisis de estabilidad hidrodinámica de la tubería en fondo marino, debido a la incidencia de olas.
 - Efecto sobre la tubería debido a estar colocadas entre apoyos.
 - Efecto por la formación de vórtices en tramos suspendidos de la tubería submarina.
 - Propagación de fracturas dúctiles en la tubería.
 - Verificación de radios mínimos de giro para la tubería interior y su envolvente.
 - Cálculo de flotabilidad de tuberías y verificación.
 - Cálculo de soportes de tuberías on-shore y off-shore.
- Datos de diseño de los componentes multicapas en la figura 7 se muestra la tubería mixta, la cual está compuesta por una tubería interna no metálica, una tubería externa de acero al carbono y un espacio anular relleno por una lechada de cemento. En el apéndice B y apéndice C se encuentran las características de la tubería de fibra de vidrio Wavistrong EST 16 y de acero al carbono API 5L Gr. X-42 respectivamente.

Este sistema mixto estará diseñado bajo el nivel de riesgo I en el mismo se considera que tubería interna no metálica “liner” está diseñada para manejar la presión de operación del sistema sin tener que depender de la tubería exterior de acero existente para contener la presión. La tubería metálica exterior se utiliza principalmente como conducto para el revestimiento y para proveer soporte estructural y protección contra impactos. La lechada de cemento de relleno asegura al revestimiento en su lugar, previniendo daños

por movimiento en el revestimiento debido a los golpes de ariete y a la dilatación térmica.

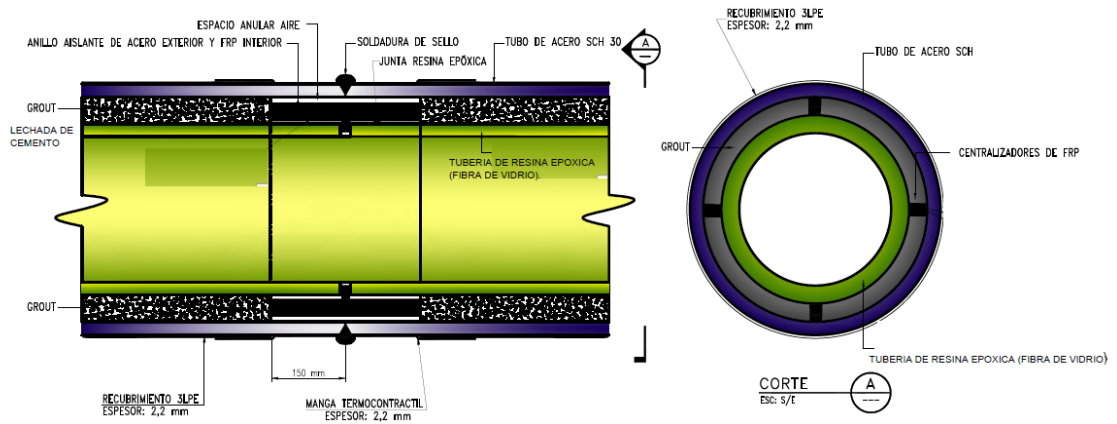


Figura 7. Composición sistema tubería mixta

Fuente: Propia.

4.4.- Diseño del ducto submarinos

4.4.1.- Estudios de la resistencia de ducto frente a sollicitaciones de carga internas y externas

4.4.1.1.- Cálculos hidráulicos.

El cálculo hidráulico de las tuberías se realizará mediante la aplicación de la ecuación general de conservación de la energía para fluidos. El procedimiento a utilizar consistirá en seleccionar un diámetro arbitrario y con los valores de flujo establecidos por la capacidad de transferencia de las bombas de los buques tanques, se determinarán las pérdidas y la velocidad del fluido. El diámetro de la tubería seleccionada cumplirá con la máxima caída de presión y velocidad permitida.

Con los datos de diseño, se calculan las pérdidas de carga por fricción entre el producto y la tubería, las pérdidas de carga por accesorios válvulas,

fittings, etc. y se considera la altura hidráulica a vencer. Para determinar la pérdida de carga o pérdida de presión interna por fricción se emplea la siguiente fórmula Darcy-Weisbach para líquidos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - hp = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad h = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 1}]$$

Donde:

f = Factor de fricción (adimensional)

h = Pérdida de carga por fricción (pies)

L= Longitud de la tubería (pies)

v = Velocidad de flujo (pies/s)

g = Aceleración de la gravedad en el lugar (pies/s²)

D = Diámetro interno de la tubería (pies)

P₁ /γ y P₂ /γ = Cabeza de presión en la sección 1 y 2 respectivamente (pies)

Z₁ y Z₂ = Cabeza de elevación en la sección 1 y 2 respectivamente (pies)

V₁²/2g y V₂²/2g = Cabeza de velocidad en la sección 1 y 2 respectivamente (pies)

El factor de fricción es hallado a partir de fórmulas experimentales, como por ejemplo el método de Churchill, en función de la variable adimensional.

Número de Reynolds para líquidos:

$$R = \frac{7742 \cdot V \cdot D}{K} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 2}]$$

Donde:

f= Factor de fricción para flujo laminar

R = Número Reynolds

V = Velocidad (pies/s)

D = Diámetro interior de la tubería (pulg)

K= Viscosidad cinemática del producto (cSt)

Para determinar el factor de fricción (ecuaciones de Moody) dentro de la zona de flujo laminar, para valores del número de Reynolds por debajo de 2000, el valor de f puede encontrarse con la ecuación 3.

$$f = 64 / R \dots \dots \dots [Ecuación 3]$$

Por encima del número de Reynolds de 4 000, el flujo se conoce como turbulento y el cálculo de fricción se da con la siguiente ecuación 4, que fue desarrollada por “P.K. Swamee y A.K. Jain”.

$$f = \frac{0,25}{[\text{Log} (\frac{1}{3,7(e/D)} + \frac{5,74}{R^{0,9}})]^2} \dots \dots \dots [Ecuación 4]$$

Para las pérdidas en accesorios y fittings, se determinan longitudes equivalentes de tubería que producen la misma pérdida del accesorio dado por fabricantes a partir de experimentación. La altura hidráulica a vencer es la diferencia de cotas que existe entre el punto de descarga y el punto de llegada de la tubería.

Resultados: De acuerdo a los cálculos hidráulicos realizados utilizando la ecuación 1 al 4, la tubería de fibra de vidrio de 300 mm de diámetro interno puede manejar los caudales de 3 500 bbl/h de petróleo industrial 500 y 5 000 bbl/h de diésel B5 S50, con una presión de descarga de la bomba del buque de 100 psi, sin exceder la máxima caída de presión y velocidad permisible de 3 psi/100 pies y 15 pies/s, respectivamente. Adicionalmente, la presión es suficiente para vencer la columna hidrostática del sistema para llegar a los tanques de almacenamiento de fluidos, tal como se observa los cálculos en la tabla 4 y tabla 5.

Tabla 4

Cálculos hidráulicos tubería transporte de combustible, 300 mm diámetro, petróleo industrial 500, 100 psi y 3 500 bbl/h.

Tramo	Manguera	Tramo Sistema Mixto	Tramo Sistema Mixto	Tramo Sistema Mixto	Tubería Acero al Carbono.	Tubería Acero al Carbono.
Desde	Descarga Bomba Buq.	Inicio Tubería Submarina	Final Tramo Submarino	Final Tramo 1	Caja de Válvula 1	Caja de Válvula 2
Hasta	Fondo Plet.	Final Tramo Submarino	Playa Tramo 1	Caja de Válvula 1	Caja de Válvula 2	TK Petroleo #1
Tipo de Tubería	Manguera	Sistema Mixto 12"x14"	Sistema Mixto 12"x14"	Sistema Mixto 12"x14"	Acero al Carbono 14".	Acero al Carbono 14".
Servicio	Petróleo Industrial 500	Petróleo Industrial 500	Petróleo Industrial 500	Petróleo Industrial 500	Petróleo Industrial 500	Petróleo Industrial 500
Fase (L o G)	L	L	L	L	L	L
Temperatura, °F	90,0	88,5	88,5	88,5	88,5	88,5
Presión fijada, psi	100,00	138,39	60,18	54,01	34,47	13,78
Presion fijada entrada o salida	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada
Presion calculada, psi	138,39	60,18	54,01	34,47	13,78	16,38
CARACTERISTICAS DE LA LINEA						
Diámetro interno, pulg	11,850	11,811	11,811	11,811	13,250	13,250
Longitud del Tramo, pie	210,00	1722,53	213,26	83,99	505,71	976,50
Elevación Diferencial (salida-entrada), pies	-105	65,617	0	39,37	26,247	-48
Rugosidad Absoluta, pie	0,000031	0,000018	0,000018	0,000018	0,00015	0,000150
Rugosidad relativa, e ^D	0,00003	0,00002	0,00002	0,00002	0,00014	0,00014
ACCESORIOS (L/D)						
Válvula de	8	1		1	1	1
Válvula Check	135	1				
Codo estandar	30	2	2	2	2	1
Codo estandar	16					1
PROPIEDADES LIQUIDO						
Flujo másico, lb/h	1 2144,34	1 2144,34	1 2144,34	1 2144,34	1 2144,34	1 2144,34
Densidad, lb/pie ³	61,80	61,80	61,80	61,80	61,80	61,80
Viscosidad, cP (cst)	850,5	850,5	850,5	850,5	850,5	850,5
CÁLCULOS PARA LIQUIDO						
Flujo de Líquido, GPM	2450,00	2450,00	2450,00	2450,00	2450,00	2450,00
Velocidad, pie/s	7,14	7,19	7,19	7,19	5,71	5,71
Número de Reynolds	770,64	773,18	773,18	773,18	689,21	689,21
Factor de Fricción de Moody	0,0830	0,0828	0,0828	0,0828	0,0929	0,0929
Perdida de carga por fricción, h (pie)	14,17	118,20	14,63	5,76	19,53	37,71
Perdida de caída de Presión (psi)ΔP	6,08	50,73	6,28	2,47	8,38	16,18
D ^P Calc., psi/100pie	2,90	2,94	2,94	2,94	1,66	1,66
D ^P Total Tramo, psi	-38,39	78,21	6,17	19,54	20,69	-2,60
CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO						
Máxima Velocidad, pie/s	15	15	15	15	15	15
Máxima D ^P , psi/100pie	3	3	3	3	3	3
Criterio Verificado	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Fuente: Propia

Tabla 5

Cálculos hidráulicos tubería de transporte de combustible, 300 mm de diámetro, diesel B5, 100 psi y 5, 000 bbl/h

Tramo	Manguera	Tramo Sistema Mixto	Tramo Sistema Mixto	Tramo Sistema Mixto	Tubería Acero al Carbono.	Tubería Acero al Carbono.
Desde	Descarga Bomba Buq.	Inicio Tubería Submarina	Final Tramo Submarino	Final Tramo 1	Caja de Válvula 1	Caja de Válvula 2
Hasta	Fondo Plet.	Final Tramo Submarino	Playa Tramo 1	Caja de Válvula 1	Caja de Válvula 2	TK Diesel #2
Tipo de Tubería	Manguera	Sistema Mixto 12"x14"	Sistema Mixto 12"x14"	Sistema Mixto 12"x14"	Acero al Carbono 14"	Acero al Carbono 14"
Servicio	Diesel B5 S50	Diesel B5 S50	Diesel B5 S50	Diesel B5 S50	Diesel B5 S50	Diesel B5 S50
Fase (L o G)	L	L	L	L	L	L
Temperatura, °F	90,0	88,5	88,5	88,5	88,5	88,5
Presión fijada, psi	100,00	136,39	94,81	92,76	76,75	63,55
Presion fijada entrada o salida	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada
Presion calculada, psi	136,39	94,81	92,76	76,75	63,55	72,66
CARACTERISTICAS DE LA LINEA						
Diámetro interno, pulg	11,850	11,811	11,811	11,811	13,250	13,250
Longitud del Tramo, pie	210,00	1,722,53	213,26	83,99	505,71	1389,00
Elevación Diferencial (salida-entrada), pies	-105	65,617	0	39,37	26,247	-48
Rugosidad Absoluta, pie	0,000031	0,000018	0,000018	0,000018	0,00015	0,00015
Rugosidad relativa, e ^D	0,00003	0,00002	0,00002	0,00002	0,00014	0,00014
ACCESORIOS (L/D)						
Válvula de	8	1		1	1	1
Válvula Check	135	1				
Codo estandar de	30	2	2	2	2	5
Codo estandar de	16					1
PROPIEDADES LIQUIDO						
Flujo másico, lb/h	1 5242,40	1 5242,40	1 5242,40	1 5242,40	1 5242,40	1 5242,40
Densidad, lb/pie ³	54,29	54,29	54,29	54,29	54,29	54,29
Viscosidad, cP	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10
CÁLCULOS PARA LIQUIDO						
Flujo de Líquido, GPM	3500	3500	3500	3500	3500	3500
Velocidad, pie/s	10,21	10,27	10,27	10,27	8,16	8,16
Número de Reynolds	228372,68	229126,77	229126,77	229126,77	204242,74	204242,74
Factor de Fricción de Moody	0,0161	0,0144	0,0144	0,0144	0,0230	0,0230
Perdida de carga por fricción, h (pie)	5,62	41,90	5,19	2,04	9,86	27,08
Perdida de caída de Presión (psi)ΔP	2,12	15,80	1,96	0,77	3,72	10,21
D ^P Calc., psi /100pie	1,01	0,92	0,92	0,92	0,74	0,74
D ^P Total Tramo, psi	-36,39	41,58	2,05	16,01	13,20	-9,11
CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO						
Máxima Velocidad, pie/s	15	15	15	15	15	15
Máxima D ^P , psi /100pie	3	3	3	3	3	3
Criterio Verificado	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Fuente: Propia

Para el caso de la tubería de “flushing” esta tubería tendrá capacidad para manejar los 1 200 bbl/h de agua a una presión de descarga de la bomba de “flushing” de 45 psi, sin exceder la máxima caída de presión y velocidad permisibles de 3 psi/100 pie y 15 pies/s, respectivamente. Adicionalmente, la presión es suficiente para vencer la columna hidrostática del sistema y desplazar combustible remanente en la tubería de 300 mm y llegar al punto más alejado del sistema, tal como se observa el cálculo en la tabla 6.

Tabla 6

Cálculos hidráulicos tubería de limpieza o flushing, 300 mm de diámetro, agua dulce de 45 psi y

1 200 bbl/h

Tramo	Tramo de Combustible	Tramo de Combustible	Tramo de Combustible	Tubería Acero al Carbono.
Desde	Inicio Tubería Submarina	Final Tramo Submarino	Final Tramo 1	Caja de Válvula 1
Hasta	Final Tramo Submarino	Playa Tramo 1	Caja de Válvula 1	Caja de Válvula 2
Tipo de Tubería	Sistema Mixto 12"x14"	Sistema Mixto 12"x14"	Sistema Mixto 12"x14"	Acero al Carbono 14".
Servicio	Agua Dulce	Agua Dulce	Agua Dulce	Agua Dulce
Fase (L o G)	L	L	L	L
Temperatura, °F	90,0	90,0	90,0	90,0
Presión fijada, psi	49,48	19,93	19,79	19,79
Presion fijada entrada o salida	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada
Presion calculada, psi	19,93	19,79	2,66	8,20
CARACTERISTICAS DE LA LINEA				
Diámetro interno, pulg	11,811	11,811	11,811	13,250
Longitud del Tramo, pie	1722,53	213,26	83,99	505,71
Elevación Diferencial (salida-entrada), pies	65,617	0	39,37	26,247
Rugosidad Absoluta, pie	0,000018	0,000018	0,000018	0,00015
e^D	0,00002	0,00002	0,00002	0,00014
ACCESORIOS (L/D)				
Válvula de Compuerta	8		1	1
Válvula Check	135			
Codo estandar de 90°	30	2	2	2
Codo estandar de 45°	16			
PROPIEDADES LIQUIDO				
Flujo másico, lb/h	420 420	420 420	420 420	420 420
Densidad, lb/pie ³	62,4	62,4	62,4	62,4
Viscosidad, cP	1,1	1,1	1,1	1,1
CÁLCULOS PARA LIQUIDO				
Flujo de Líquido, GPM	840,0	840,0	840,0	840,0
Velocidad, pie/s	2,47	2,47	2,47	1,96
Número de Reynolds	204964,31	204964,31	204964,31	182704,41
Factor de Fricción de Moody	0,0144	0,0147	0,0147	0,0232
Perdida de carga por fricción, h (pie)	2,41	0,30	0,12	0,57
Perdida de caída de Presión (psi)ΔP	1,05	0,13	0,05	0,25
D^P Calc., psi /100pie	0,06	0,06	0,06	0,05
D^P Total Tramo, psi	29,55	0,14	17,13	11,59
CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO				
Máxima Velocidad, pie/s	15	15	15	15
Máxima D^P , psi/100pie	3	3	3	3
Criterio Verificado	SI	SI	SI	SI

Fuente: Propia

4.4.1.2.- Cálculo de espesor de tubería.

El cálculo de espesor mínimo de tubería de acero al carbono requerido, considerando solo la presión interna de diseño y el tipo de tubería, se hará de acuerdo a lo indicado en la sección 404.1.2 del Código ASME/B31.4 “pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids”, usando las siguientes fórmulas:

$$t_n = t + A \dots\dots\dots [\text{Ecuación 5}]$$

$$t = \frac{P_i \times D}{2 \times S} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 6}]$$

Donde:

t_n = Espesor de pared nominal, (pulg).

t = Espesor de pared por condiciones de diseño, (pulg).

A = Tolerancia por corrosión, (pulg).

P_i = Presión interna de diseño, (psi).

D = Diámetro Externo de tubería, (pulg).

S = Esfuerzo de fluencia permisible, (psi)

El cálculo del espesor mínimo de pared calculado para la tubería de fibra de vidrio se realizará tomando en cuenta la presión interna de la tubería, de acuerdo a lo indicado en el “Engineering Guide – Filament Wound Epoxy Pipeline Systems” series ES/EW/CS “future pipe industries”, usando la siguiente fórmula:

$$T_w = T_E + T_L + T_C \dots\dots\dots [\text{Ecuación 7}]$$

$$T_E = PN \times \frac{ID}{(2 \times SH - PN)} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 8}]$$

Donde:

TW = Espesor de requerido, (mm)

TL = Espesor de la fibra de vidrio, (mm)

TC = Espesor de la capa superior, (mm)

TE = Mínimo espesor de pared reforzado, (mm)

ID = Diámetro interno, (mm)

SH = Esfuerzo hidrostático (N/mm³), tomado de la tabla II-f del "Engineering Guide – Filament Wound Epoxy Pipeline Systems".

PN = Presión nominal (MPa).

Los cálculos se considerarán individualmente para cada tipo de tubería que conforma la tubería mixta, es decir para la tubería API 5L Gr X-42 y para la tubería de fibra de vidrio Wavistrong TB/TS EST 16.

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 5 al 8 y asumiendo solo el uso de tubería de acero al carbono con una presión máxima de operación de 165 psi, se tiene que para una tubería de acero al carbono API 5L Gr B de 14" de diámetro nominal, el espesor de pared nominal calculado es de 0,0382", y para un diámetro nominal de 8" es de 0,0235".

El espesor nominal a usar en ambos diámetros es el correspondiente a un SCH 30, es decir, 0,277" para la tubería de 8" de diámetro y de 0,375" para la tubería de 14". Según esta condición, la tubería de 14" SCH 30 puede soportar una presión interna de 1 620 psi y la de 8" SCH 30 una presión interna de 1 942,34 psi ver los resultados que hemos aplicado en la tabla 7 y tabla 8.

Tabla 7

Cálculo de espesor de pared de tubería acero al carbono de 14 pulg

CALCULO DE ESPESOR DE PARED DE TUBERIA ACERO AL CARBONO -14 PULG.		
Norma Aplicable:		ANSI/ASME B31.4 Sistema de Transporte de Tuberías para Líquidos y lechadas.
DATOS DEL DUCTO		
SERVICIO TUBERÍA DE TRANSPORTE - CARCASA		
MATERIAL DEL DUCTO		API 5L PSL2 Gr. X42
DIAMETRO NOMINAL DEL DUCTO		14 pulg
DIAMETRO EXTERIOR DEL DUCTO		14 pulg
DIÁMETRO INTERNO		13.25 pulg
ESPESOR NOMINAL DEL DUCTO		0.375 pulg
SCHEDULE DEL DUCTO		30 sch
SMYS, ESFUERZO DE FLUENCIA PERMISIBLE (S) - API 5L		42,000 psi
ESFUERZO ÚLTIMO POR TENSIÓN (U)- API 5L		60,000 psi
DATOS DE DISEÑO		
MARGEN DE CORROSIÓN CONSIDERADO	A	0.0625 pulg
DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA	D	14 pulg
PESO ESPECIFICO DE AGUA DE MAR	Pemar	1,025 kg/m ³
DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE PETROLEO INDUSTRIAL 500		990 kg/m ³
DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE DIESEL B5 S50		870 kg/m ³
PROFUNDIDAD MÁXIMA EL DUCTO, ΔH	ΔH	20 m
MÁXIMA ALTURA DE LA CUBIERTA DEL BUQUE VS NIVEL DE MAR		12 m
ALTURA MÁX. DE BOMBA DEL BUQUE VS. NIVEL MÍN. DEL DUCTO		32 m
DATOS DE PROCESOS		
PRESIÓN MAXIMA DE DESCARGA DEL BUQUE		100 psi
PRESIÓN MAXIMA DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA		140 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN, MPO (DESCARGA DE BUQUE +25 PSIG)		165 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (MPO *1,25)		206.25 psi
CÁLCULO DE ESPESOR DE PARED DE TUBERÍA SEGÚN NORMAS ANSI/ASME B31.4		
$t_n \geq t + A \quad t = \frac{P_i \cdot D}{2 \cdot S} \quad S = 0.72 \cdot E \cdot (SMYS) \quad \geq$		
Donde:		
t _n = Espesor de pared nominal en pulgadas		0.375 pulg
t = Espesor de pared calculado por condiciones de diseño en pulg		0.0382 pulg
A= Sumatoria de tolerancia por corrosión, roscado y ranurados en pulg		0.0625 pulg
P _i = Presión interna de diseño en psi		165 psi
D = Diámetro exterior de tubería en pulg		14 pulg
S = Valor de tensión admisible aplicable en psi		30,240.00 psi
0.72= Factor de diseño basado en espesor de la pared		0.72
E= Factor de Junta soldada. 1 para tubería sin costurra API 5L.		1
$t_n \geq t + A$		0.101 pulg
Se utilizará tubería de acero al carbono API 5L Gr. X42 de schedule 30. Asumiendo que la presión es solo soportada por la tubería , la presión de diseño para esta tubería de espesor 0.375 pulg es de:		
$P_i = \frac{2 \cdot S \cdot t}{D}$		1,620.00 psi
RESULTADO		
La tubería seleccionada de acero al carbono API 5L Gr. X42 es capaz de soportar una presión interna de 1,620.00 psi, cumpliendo ampliamente con las condiciones de operación del sistema de transporte de combustible		

Fuente: Propia

Tabla 8

Cálculo de espesor de pared de tubería acero al carbono de 8 pulg

CALCULO DE ESPESOR DE PARED DE TUBERIA ACERO AL CARBONO -8 PULG.

Norma Aplicable: **ANSI/ASME B31.4 Sistema de Transporte de Tuberías para Líquidos y lechadas.**

DATOS DEL DUCTO

SERVICIO TUBERÍA DE TRANSPORTE - CARCASA

MATERIAL DEL DUCTO	API 5L PSL2 Gr. X42
DIAMETRO NOMINAL DEL DUCTO	8 pulg
DIAMETRO EXTERIOR DEL DUCTO	8.625 pulg
DIÁMETRO INTERNO	8.071 pulg
ESPESOR NOMINAL DEL DUCTO	0.277 pulg
SCHEDULE DEL DUCTO	30 sch
SMYS, ESFUERZO DE FLUENCIA PERMISIBLE (S) - API 5L	42,000 psi
ESFUERZO ÚLTIMO POR TENSION (U)- API 5L	60,000 psi

DATOS DE DISEÑO

MARGEN DE CORROSIÓN CONSIDERADO	A	0.0625 pulg
DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA	D	8.625 pulg
PESO ESPECIFICO DE AGUA DE MAR	Pemar	1,025 kg/m ³
DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE PETROLEO INDUSTRIAL 500		990 kg/m ³
DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE DIESEL B5 S50		870 kg/m ³
PROFUNDIDAD MÁXIMA EL DUCTO, ΔH	ΔH	20 m
MÁXIMA ALTURA DE LA CUBIERTA DEL BUQUE VS NIVEL DE MAR		12 m
ALTURA MÁX. DE BOMBA DEL BUQUE VS. NIVEL MÍN. DEL DUCTO		32 m

DATOS DE PROCESOS

PRESIÓN MAXIMA DE DESCARGA DEL BUQUE	100 psi
PRESIÓN MAXIMA DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA	140 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN, MPO (DESCARGA DE BUQUE +25 PSIG)	165.00 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (MPO *1,25)	206.25 psi

CÁLCULO DE ESPESOR DE PARED DE TUBERÍA SEGÚN NORMAS ANSI/ASME B31.4

$$t_n \geq t + A \quad t = \frac{P_i \cdot D}{2 \cdot S} \quad S = 0.72 \cdot E \cdot (SMYS)$$

Donde:

tn = Espesor de pared nominal en pulgadas	0.277 pulg
t = Espesor de pared calculado por condiciones de diseño en pulg	0.0235 pulg
A= Sumatoria de tolerancia por corrosión, roscado y ranurados en pulg	0.0625 pulg
Pi = Presión interna de diseño en psi	165 psi
D = Diámetro exterior de tubería en pulg	8.625 pulg
S = Valor de tensión admisible aplicable en psi	30,240.00 psi
0.72= Factor de diseño basado en espesor de la pared	0.72
E= Factor de Junta soldada. 1 para tubería sin costurra API 5L.	1
$t_n \geq t + A$	0.086 pulg

Se utilizará tubería de acero al carbono API 5L Gr. X42 de schedule 30. Asumiendo que la presión es solo soportada por la tubería , la presión de diseño para esta tubería de espesor 0.277 pulg es de:

$$P_i = \frac{2 \cdot S \cdot t}{D} \quad 1,942.37 \text{ psi}$$

RESULTADO

La tubería seleccionada de acero al carbono API 5L Gr. X42 es capaz de soportar una presión interna de 1,942.37 psi, cumpliendo ampliamente con las condiciones de operación del sistema de transporte de combustible

Fuente: Propia

Para el caso de la tubería interna de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio tipo Wavistrong TB/TS EST 16 bar, tenemos que para un diámetro de 12" (300 mm) el espesor de pared reforzado calculado es de 3,54 mm, escogiendo el espesor comercialmente disponible de 3,8 mm para una tubería de 12" (300mm), para la tubería interna de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio de 6" (150 mm) el espesor de pared reforzado calculado es de 2,17, escogiendo el espesor comercialmente disponible de 2,4 mm para una tubería de 6" (150 mm). Las tuberías de resina reforzada con fibra de vidrio de 12" (300 mm) y 6" (150 mm) soportan una presión máxima de 16 bar (232,06 psi) la cual es mayor a 206,25 psi, que es la presión de la prueba hidrostática, cumpliendo con la presión máxima de operación del proceso que es de 165 psi ver los cálculos que hemos aplicado en la tabla 9 y tabla 10.

Tabla 9

Cálculo de espesor de pared de tubería fibra de vidrio de 12 pulg

CÁLCULO DE ESPESOR DE LA TUBERÍA INTERNA (LINNER)				
RESINA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO - 12 PULG				
Recomendación Aplicable	Future Pipe Industries - Guía de Ingeniería Wavistrong - Tuberías de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio.			
DUCTO:	TUBERÍA DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE - TUBERÍA INTERNA			
MATERIAL DEL DUCTO	RESINA EPOXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO 300 mm (12") EST 16			
ANGULO DE LA FIBRA (TUBERÍA EST 16)		55 °		
DIAMETRO EXTERIOR DEL DUCTO,	OD	309.2 mm	12.17 pulg	
DIÁMETRO INTERNO DEL DUCTO,	ID	300 mm	11.81 pulg	
ESFUERZO HIDROSTÁTICO (HYDROSTATIC DESIGN STRESS, HDS)	SH	63 Mpa	9,137.39 psi	Tabla II-f.
PESO DE LA TUBERÍA, Kg/m		11.0 Kg/m		
ESPESOR DE LA PARED, mm		3.8 mm	Tabla II-b1 " Pipe data for series EST de la guía de ingeniería Wavistrong	
DATOS DE DISEÑO				
PESO ESPECIFICO DE AGUA DE MAR	Pemar	1,025 kg/m ³		
DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE PETROLEO INDUSTRIAL 500		990 kg/m ³		
DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE DIESEL B5 S50		870 kg/m ³		
PROFUNDIDAD MÁXIMA EL DUCTO, ΔH	ΔH	20 m		
MÁXIMA ALTURA DE LA CUBIERTA DEL BUQUE VS NIVEL DE MAR		12 m		
ALTURA MÁX. DE BOMBA DEL BUQUE VS. NIVEL MÍN. DEL DUCTO		32 m		
DATOS DE PROCESO				
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA DEL BUQUE		100 psi	0.69 Mpa	
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA		140 psi	0.97 Mpa	
PRESION MÁXIMA DE OPERACIÓN. MPO (DESCARGA DEL BUQUE +25 PSIG)		165 psi	1.14 Mpa	
PRESIÓN MÁXIMA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (MPO*1,25)		206.25 psi	1.42 Mpa	
CÁLCULO DE ESPESOR DE PARED PARA TUBERÍA DE FIBRA DE VIDRIO WAVISTRONG EST 16				
$T_E = ID / ((2 * S_H) / P_N) - I$		$T_w = T_E + T_L + T_C$		
TE= Mínimo espesor de pared reforzado en mm		2.74 mm		
PN= Presión nominal en Mpa		1.14 Mpa		
ID= Diámetro interno de tubería en mm.		300 mm		
SH= Esfuerzo Circunferencial de diseño en Mpa.		63.00 Mpa	Tabla II-f.	
TW= Espesor de pared de tubería total en mm.		3.54 mm		
TL= Espesor de refuerzo interno en mm.		0.50 mm	Mínimos valores de la guía	
TC= Espesor de refuerzo externo en mm.		0.30 mm	de ingeniería Wavistrong	
RESULTADO				
El mínimo espesor de pared reforzado necesario para la tubería de fibra de vidrio es de 3.54 mm. Según la tabla II.b.1 "Pipe data for series EST " de la Guía de Ingeniería Wavistrong , el espesor inmediatamente superior a 3.54 mm es de 3.8 mm para una tubería de 300 mm(12 pulg) TB/TS 16 bar. Esta tubería soporta una presión de hasta 16 bar (232.06 psi), la cual es mayor a la presión de prueba hidrostática de 206.25 psi, cumpliendo satisfactoriamente con las condiciones de operación del proceso.				

Fuente: Propia

Tabla 10*Cálculo de espesor de pared de tubería fibra de vidrio de 6 pulg*

CÁLCULO DE ESPESOR DE LA TUBERÍA INTERNA (LINNER)			
RESINA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO - 6 PULG			
Recomendación Aplicable	Future Pipe Industries - Guía de Ingeniería Wavistrong - Tuberías de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio.		
DUCTO:		TUBERÍA DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE - TUBERÍA INTERNA	
MATERIAL DEL DUCTO	RESINA EPOXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO 150 mm (6") EST 16		
ANGULO DE LA FIBRA (TUBERÍA EST 16)		55 °	
DIAMETRO EXTERIOR DEL DUCTO,	OD	156.4 mm	6.16 pulg
DIÁMETRO INTERNO DEL DUCTO,	ID	150 mm	5.91 pulg
ESFUERZO HIDROSTÁTICO (HYDROSTATIC DESIGN STRESS, HDS)	SH	63 Mpa	9,137.39 psi Tabla II-f.
PESO DE LA TUBERÍA, Kg/m		4.0 Kg/m	
ESPESOR DE LA PARED, mm		2.4 mm	Tabla II-b1 " Pipe data for series EST de la guía de ingeniería Wavistrong
DATOS DE DISEÑO			
PESO ESPECIFICO DE AGUA DE MAR	Pemar	1,025 kg/m ³	
DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE PETROLEO INDUSTRIAL 500		990 kg/m ³	
DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE DIESEL B5 S50		870 kg/m ³	
PROFUNDIDAD MÁXIMA EL DUCTO, ΔH	ΔH	20 m	
MÁXIMA ALTURA DE LA CUBIERTA DEL BUQUE VS NIVEL DE MAR		12 m	
ALTURA MÁX. DE BOMBA DEL BUQUE VS. NIVEL MÍN. DEL DUCTO		32 m	
DATOS DE PROCESO			
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA DEL BUQUE		100 psi	0.69 Mpa
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA		140 psi	0.97 Mpa
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN. MPO (DESCARGA DEL BUQUE +25 PSIG)		165 psi	1.14 Mpa
PRESIÓN MÁXIMA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (MPO*1.25)		206.25 psi	1.42 Mpa
CÁLCULO DE ESPESOR DE PARED PARA TUBERÍA DE FIBRA DE VIDRIO WAVISTRONG EST 16			
$T_E = ID / ((2 * S_H) / P_N) - 1$		$T_W = T_E + T_L + T_C$	
TE= Mínimo espesor de pared reforzado en mm		1.37 mm	
PN= Presión nominal en Mpa		1.14 Mpa	
ID= Diámetro interno de tubería en mm.		150 mm	
SH= Esfuerzo Circunferencial de diseño en Mpa.		63.00 Mpa	Tabla II-f.
TW= Espesor de pared de tubería total en mm.		2.17 mm	
TL= Espesor de refuerzo interno en mm.		0.50 mm	Mínimos valores de la guía de ingeniería Wavistrong
TC= Espesor de refuerzo externo en mm.		0.30 mm	
RESULTADO			
El mínimo espesor de pared reforzado necesario para la tubería de fibra de vidrio es de 2.17 mm. Según la tabla II.b.1 "Pipe data for series EST " de la Guía de Ingeniería Wavistrong , el espesor inmediatamente superior a 2.17 mm es de 2.4 mm para una tubería de 150 mm(6 pulg) TB/TS 16 bar. Esta tubería soporta una presión de hasta 16 bar (232.06 psi), la cual es mayor a la presión de prueba hidrostática de 206.25 psi, cumpliendo satisfactoriamente con las condiciones de operación del proceso.			

Fuente: Propia

4.4.1.3.- Cálculos de integridad mecánica y estructural de tuberías.

Para comprobar la resistencia del sistema de tubería, se realizarán cálculos que incluyen: La calidad y espesor de las tuberías de resina reforzada con fibra de vidrio o FRP, la calidad y espesor de la carcasa de acero, efecto de las cargas

longitudinales, efecto de combinación de cargas, esfuerzos de colapso por presiones externas y por pandeo, efecto de golpe de ariete, estabilidad hidrodinámica del ducto por corrientes marinas y olas de gran tamaño, análisis estructural del ducto en tramos suspendidos y control de propagación de fracturas dúctiles.

4.4.1.4.- Especificaciones y espesores de la tubería interna FRP.

El ducto interno que transportará hidrocarburos, está constituido por una tubería Wavistrong TB/TS serie EST 16 fabricada por “future pipe industries” FPI con resina (plástico) reforzada con fibra de vidrio o FRP (por sus siglas en inglés) y que es parte del sistema de tubería mixto. El espesor y la presión del ducto vienen dados por las siguientes relaciones.

$$TE = ID / (((2 * SH)/PN) - 1) \dots\dots\dots [Ecuación 9]$$

$$PN = 2 * SH / (ID / TE + 1) \dots\dots\dots [Ecuación10]$$

Dónde:

TC = Espesor de la tubería por corrosión, (pulg) para tuberías de fibra de vidrio = 0

TE = Espesor de la tubería, (pulg)

TE – TC = Espesor de diseño de la tubería, (pulg)

ID = Diámetro interno de la tubería, (pulg)

SH = Esfuerzo hidrostático de diseño, (psi)

PN = Presión nominal, (psi)

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 9 y la ecuación 10. Para el caso de la tubería de transporte de combustible la cual será de 300 mm (12") de diámetro nominal, la presión nominal es de 16 bar (232 psi), la cual es mayor que la máxima presión de operación MPO de 165 psi.

Para el caso de la tubería de limpieza "flushing" de 150 mm (6") de diámetro nominal, la presión nominal es de 16 bar (232 psi), la cual es mayor que la máxima presión de operación MPO de 165 psi.

Los ductos de resina reforzados con fibra de vidrio o FRP por si solos, son capaces de resistir la máxima presión de operación, sin considerar los demás elementos, anillo de mortero de cemento y carcasa o envolvente de acero del sistema de tubería mixto. La presión hidrostática para ambos diámetros de tuberías será 206 psi ver cálculos que hemos aplicado en la tabla 11 y tabla 12 para cada espesor respectivamente.

Tabla 11*Especificaciones y espesores de la tubería interna FRP de 12 pulg*

ESPECIFICACIONES Y ESPESOR DE LA TUBERÍA INTERNA FRP 12"				
Recomendación Aplicable	Future Pipe Industries - Guía de Ingeniería Wavistrong - Tuberías de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio.			
DUCTO:	TUBERÍA DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE - TUBERÍA INTERNA			
MATERIAL DEL DUCTO	RESINA EPOXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO 300 mm (12") EST 16			
ANGULO DE LA FIBRA (TUBERÍA EST 16)			55 °	
DIAMETRO EXTERIOR DEL DUCTO,	OD	309.2 mm		12.17 pulg
DIÁMETRO INTERNO DEL DUCTO,	ID	300.00 mm		11.81 pulg
ESFUERZO HIDROSTÁTICO (HYDROSTATIC DESIGN STRESS, HDS)	SH (Tabla II-f)	63 N/mm ²		9,137.39 psi
PESO DE LA TUBERÍA, Kg/m		11.0 Kg/m		
DATOS DE PROCESO				
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA DEL BUQUE		100 psi		
PRESIÓN DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA		140 psi		
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN. MPO (DESCARGA DEL BUQUE +25 PSIG)		165 psi		
PRESIÓN MÁXIMA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (MPO*1,25)		206.25 psi		
DATOS DE DISEÑO				
$T_E = ID / ((2 * S_H) / P_N) - I$ (1)		$P_N = 2 * S_H / (ID / T_E + I)$ (2)		
MARGEN DE CORROSIÓN CONSIDERADO	T_c	0 mm		0.00 pulg
ESPEOR DE TUBERIA CALCULADO (1)	T_E	3.42 mm		0.135 pulg
ESPEOR DE DISEÑO T _d	T_E - T_c	3.42 mm		0.135 pulg
PARA EL DIAMETRO DE TUBERIA ESCOGIDO, SEGÚN EL CATALOGO PARA TUBERIAS DE FIBRA DE VIDRIO, SE TIENE QUE:				
TN =	3.8 mm	PN =	16.00 Bar	
	0.15 pulg		232.00 psi	
			1,599,584.32 N/m²	
			1.60 Mpa	
COMPARACIÓN				
Presiones en el Interior del Ducto				
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA DE BUQUES:				100.00 psi
PRESIÓN DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA				140 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (PRESIÓN DE DESCARGA + 25 PSI):				165 psi
PRESIÓN DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (125% MPO):				206 psi
Esfuerzo de Compresión del Mortero de Cemento				
CEMENTO DE PORTLAND TIPO V, RELLENO DEL ESPACIO ANULAR (15 Kg/cm ²):				213.30 psi
Presión de Diseño de la Tubería de Acero Envolvente (Ver cálculo en las tabla # 15 de la tub.14"):				1,379.00 psi
Conclusión:				
LA TUBERÍA DE RESINA DE FIBRA DE VIDRIO (FIBER REINFORCED PLASTIC, FRP) ES CAPAZ DE SOPORTAR LA PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN Y LA PRESIÓN DE PRUEBA HIDROSTÁTICA				

Fuente: Propia

Tabla 12

Especificaciones y espesores de la tubería interna FRP de 6 pulg

ESPECIFICACIONES Y ESPESOR DE LA TUBERÍA INTERNA FRP 6"				
Recomendación	Future Pipe Industries - Guía de Ingeniería Wavistrong -			
Aplicable	Tuberías de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio.			
DUCTO: TUBERÍA DE LIMPIEZA (FLUSHING) - TUBERÍA INTERNA				
MATERIAL DEL DUCTO	RESINA EPOXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO 150 mm (6") EST 16			
ANGULO DE LA FIBRA (TUBERÍA EST 16)			55 °	
DIAMETRO EXTERIOR DEL DUCTO,	OD	156.4 mm		6.16 pulg
DIÁMETRO INTERNO DEL DUCTO,	ID	150 mm		5.91 pulg
ESFUERZO HIDROSTÁTICO (HYDROSTATIC DESIGN STRESS, HDS)	SH (Tabla II-f)	63 N/mm ²		9,137.39 psi
PESO DE LA TUBERÍA, Kg/m		4.0 Kg/m		
DATOS DE PROCESO				
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA DEL BUQUE		100 psi		
PRESIÓN DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA		140 psi		
PRESION MÁXIMA DE OPERACIÓN. MPO (DESCARGA DEL BUQUE +25 PSIG)		165 psi		
PRESIÓN MÁXIMA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (MPO*1,25)		206.25 psi		
DATOS DE DISEÑO				
$T_E = ID / ((2 * S_H) / P_N) - I$ (1)		$P_N = 2 * S_H / (ID / T_E + I)$ (2)		
MARGEN DE CORROSIÓN CONSIDERADO	T_c	0 mm		0.00 pulg
ESPESOR DE TUBERIA CALCULADO (1)	T_E	1.71 mm		0.067 pulg
ESPESOR DE DISEÑO T _d	T_E - T_c	1.71 mm		0.067 pulg
PARA EL DIAMETRO DE TUBERIA ESCOGIDO, SEGÚN EL CATALOGO PARA TUBERIAS DE FIBRA DE VIDRIO, SE TIENE QUE:				
TN =	2.4 mm		PN =	16.00 Bar
	0.09 pulg			232.00 psi
				1,599,584.32 N/m ²
				1.60 Mpa
COMPARACIÓN				
Presiones en el Interior del Ducto				
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA DE BUQUES:				100.00 psi
PRESIÓN DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA				140.00 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (PRESIÓN DE DESCARGA + 25 PSI):				165.00 psi
PRESIÓN DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (125% MPO):				206.25 psi
Esfuerzo de Compresión del Mortero de Cemento				
CEMENTO DE PORTLAND TIPO V, RELLENO DEL ESPACIO ANULAR (15 Kg/cm ²):				213.30 psi
Presión de Diseño de la Tubería de Acero Envolvente (Ver cálculo en las tabla # 16 de la tub.8"):				1,533.00 psi
Conclusión:				
LA TUBERÍA DE RESINA DE FIBRA DE VIDRIO (FIBER REINFORCED PLASTIC, FRP) ES CAPAZ DE SOPORTAR LA PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN Y LA PRESIÓN DE PRUEBA HIDROSTÁTICA				

Fuente: Propia

4.4.1.5.- Espesor y calidad de la tubería envolvente.

La tubería envolvente del sistema multicapas a utilizar, es de acero al carbono. De acuerdo al DS 081-2007-EM, el acero para tuberías en aplicaciones submarinas debe especificarse como tubería API 5L PSL 2.

De las recomendaciones de la Norma API 1111, “design, construction, operation and maintenance off-shore hydrocarbon pipelines”, la presión de prueba, la presión de diseño del ducto y la sobrepresión incidental, incluyendo las acciones de presiones internas y externas de diseño viene dada por la expresión.

$$P_i = 2 \cdot S \cdot (t/d) \cdot f_d \cdot f_c \cdot f_t + P_o \dots\dots\dots [Ecuación 11]$$

Donde:

P_i = Presión interna de diseño, (psi)

S = Mínimo esfuerzo de fluencia especificado (specified minimum yield strength SMYS) de la tubería, de acuerdo a su especificación de fabricación, (psi)

t = Espesor de la tubería, (pulg)

d = Diámetro exterior de la tubería, (pulg)

f_d = Factor de diseño

- a) Para tuberías que transportan líquidos y gases 0,72.
- b) Para tuberías en plataformas costa afuera y verticales 0,60.
- c) Para tuberías que transportan gases en plataformas costa afuera y verticales 0,50.

f_c = Factor de junta longitudinal = 1,0

f_t = Factor por temperatura = 1,0 (ASME B 31.4)

P_o = Presión externa, (psi)

Con esta fórmula se determina la presión interna mínima de diseño para la tubería seleccionada, sometida a los esfuerzos de las presiones internas y externas.

De la misma Norma API RP1111 y con los datos de las tuberías, se determinan las presiones de ruptura, de prueba hidrostática, de diseño de la tubería y de sobrepresiones fortuitas para el ducto submarino.

La presión mínima de ruptura “Pb” de la tubería viene dada por:

$$P_b = 0,45 * (S+U) * L_n (D/D_i) \text{ para } D/t > 15 \dots\dots\dots[\text{Ecuación 12}]$$

$$P_b = 0,90 * (S+U) * t / (D-t) \text{ para } D/t < 15 \dots\dots\dots[\text{Ecuación 13}]$$

La presión de prueba hidrostática “Pt” viene dada por:

$$P_t = f_d * f_e * f_t * P_b \dots\dots\dots[\text{Ecuación 14}]$$

La Presión de Diseño “Pd” se determina con la relación:

$$P_d \leq 0,80 * P_t \dots\dots\dots[\text{Ecuación 15}]$$

Y la sobrepresión fortuita “Pa” se calcula con la siguiente expresión:

$$P_a \leq 0,90 * P_t \dots\dots\dots[\text{Ecuación 16}]$$

Donde:

Pb = Presión mínima de ruptura, (psi)

S = Esfuerzo de fluencia mínimo especificado, (psi)

U = Esfuerzo mínimo de tensión especificado, (psi)

D = Diámetro externo de la tubería, (pulg)

Di = Diámetro interno de la tubería, (pulg)

t = Espesor de la pared de la tubería, (pulg)

Pt = Presión de prueba hidrostática, (psi)

fd = Factor de diseño

fe = Factor de junta

ft = Factor de temperatura

Pd = Presión de diseño, (psi)

Pa = Sobrepresión fortuita, (psi)

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 11 al 16. La carcasa o envolvente de la tubería de transporte de combustible sistema mixto, está conformado por tuberías soldadas de 350 mm (14") de diámetro nominal, con un espesor de 9,5 mm (0,375") y un esfuerzo de fluencia SMYS de 42 000 psi, que corresponde a un material API 5L PSL2 Gr X42, mientras que el ducto de fibra interior tiene 300 mm (12") de diámetro nominal y 4.6 mm (0,181") de espesor. De acuerdo a los cálculos, el acero envolvente, por si solo es capaz de soportar la presión de diseño de 1 379,16 psi con un factor de seguridad de 6,7 siendo su máxima presión de operación MPO establecida de 165 psi y la presión de prueba de 206 psi ver cálculos que hemos aplicado en tabla 13.

Para el caso de la tubería de limpieza "flushing", el ducto envolvente es de 200 mm (8") de diámetro y 7,0 mm (0,277") de espesor, mientras que el ducto interno de fibra de vidrio es de 150 mm (6") de diámetro y de 3.2 mm (0,13") de espesor. Esta tubería, por si sola, es capaz de soportar la presión de 1 533,27 psi con un factor de seguridad de 7,43, siendo su máxima presión de operación MPO establecida de 165 psi y la presión de prueba de 206 psi ver cálculos en tabla 14.

En ambos casos, los ductos externos de acero por si solos son capaces de soportar los esfuerzos actuantes, sin la contribución de los demás elementos que forman el sistema de tubería mixto.

Tabla 13

Espesor de la tubería envolvente de acero (carcasa) de sistema de tuberías mixto 14 pulg

ESPECIFICACIÓN Y ESPESOR DE LA TUBERÍA ENVOLVENTE DE ACERO (CARCASA) DEL SISTEMA DE TUBERÍAS MIXTO 8 PULG		
Norma Aplicable: API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE		
DATOS DEL DUCTO		
SERVICIO TUBERÍA DE LIMPIEZA (FLUSHING) - CARCASA		
MATERIAL DEL DUCTO		API 5L PSL2 Gr. X42
DIAMETRO NOMINAL DEL DUCTO		8 pulg
DIÁMETRO INTERNO		8.071 pulg
SCHEDULE DEL DUCTO		30 sch
SMYS SPECIFIED MINIMUM YIELD STRENGTH (S) - API 5L		42,000 psi
SPECIFIED MINIMUM ULTIMATE TENSILE STRENGTH (U) - API 5L		60,000 psi
DATOS DE DISEÑO		
MARGEN DE CORROSIÓN CONSIDERADO	t_c	0.0625 pulg
ESPESOR DE LA TUBERÍA	t	0.277 pulg
ESPESOR DE DISEÑO	$t_d (t-t_c)$	0.2145 pulg
DIAMETRO EXT. DE LA TUBERÍA	D	8.625 pulg
PESO ESPECIFICO DE AGUA DE MAR	P_{emar}	1025 kg/m³
PROFUNDIDAD MÁXIMA EL DUCTO, ΔH	ΔH	20 m
MÁXIMA ALTURA DE LA CUBIERTA DEL BUQUE VS NIVEL DE MAR		12 m
ALTURA MÁX. DE BOMBA DEL BUQUE VS. NIVEL MÍN. DEL DUCTO		32 m
DATOS DE PROCESOS		
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA DEL BUQUE		100 psi
PRESIÓN DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA		140 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN, MPO (DESCARGA DE BUQUE +25 PSIG)		165 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (MPO *1,25)		206.25 psi
PRESIÓN INTERNA DE DISEÑO SEGÚN API RP 1111		
$P_1 = 2 * S * (t/d) * f_d * f_e * f_t + P_o$		
Donde:		
PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA, $P_o = \rho * g * \Delta H$	P_o	29.16 psi
FACTOR DE DISEÑO	f_d	0.72 Transp. Líq/gas
FACTOR DE TEMPERATURA	f_e	1.00 ASME 31.4
FACTOR DE JUNTA LONGITUDINAL	f_t	1.00
Considerando que la presión es soportada solo por el ducto de acero, la presión de diseño es:		
	P_1 Pto Troncal	1,533.27 psi
	P_1 EN SUPERFICIE	1,504.11 psi
	FACTOR DE SEGURIDAD	7.43
La Presión de Ruptura de la Tubería viene dada por la siguiente relación		
Si $(D/t) > P_b = 0,45 * (S+U) * \ln D/D_i$		
Si $(D/t) < P_b = 0,90 * (S+U) * t / (D-t)$		
Las presiones de diseño no deberán exceder de los valores dados por las siguientes fórmulas		
$P_1 \leq f_d * f_e * f_t * P_b$		
$P_d \leq 0,80 * P_t$		
$P_a \leq 0,90 * P_t$		
Donde:		
f_d	Factor de Diseño según API RP 1111	0.90
P_b	Mínima Presión de Ruptura	
D/t	Relación Diámetro a espesor de tubería	$D/t = 31.14$
	Si $(D/t) > 15$ $P_b = 0,45 * (S+U) * \ln D/D_i$	$P_b = 3,047.19$ psi
	Si $(D/t) < 15$ $P_b = 0,90 * (S+U) * t / (D-t)$	2,341.25 psi
P_t	Presión de prueba hidrostática	$P_t \leq 2,742.47$ psi
P_d	Presión de Diseño	$P_d \leq 2,193.98$ psi
P_a	Sobrepresión Fortuita	$P_a \leq 2,468.22$ psi
COMPARACIÓN		
PRESIÓN INTERNA DE DISEÑO		1,533.27 psi CUMPLE
MÁXIMA PRESIÓN INTERNA DE TRABAJO		165.00 psi CUMPLE
PRESIÓN INTERNA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA		206.25 psi CUMPLE

Fuente: Propia

Tabla 14

Espesor de la tubería envolvente de acero (carcasa) sistema de tuberías mixto 8 pulg

ESPECIFICACIÓN Y ESPESOR DE LA TUBERÍA ENVOLVENTE DE ACERO (CARCASA) DEL SISTEMA DE TUBERÍAS MIXTO 8 PULG		
Norma Aplicable:	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE	
DATOS DEL DUCTO		
SERVICIO TUBERÍA DE LIMPIEZA (FLUSHING) - CARCASA		
MATERIAL DEL DUCTO		API 5L PSL2 Gr. X42
DIAMETRO NOMINAL DEL DUCTO		8 pulg
DIÁMETRO INTERNO		8.071 pulg
SCHEDULE DEL DUCTO		30 sch
SMYS SPECIFIED MINIMUM YIELD STRENGTH (S) - API 5L		42,000 psi
SPECIFIED MINIMUM ULTIMATE TENSILE STRENGTH (U) - API 5L		60,000 psi
DATOS DE DISEÑO		
MARGEN DE CORROSIÓN CONSIDERADO	t_c	0.0625 pulg
ESPESOR DE LA TUBERÍA	t	0.277 pulg
ESPESOR DE DISEÑO	$t_d (t-t_c)$	0.2145 pulg
DIAMETRO EXT. DE LA TUBERÍA	D	8.625 pulg
PESO ESPECIFICO DE AGUA DE MAR	Pemar	1025 kg/m ³
PROFUNDIDAD MÁXIMA EL DUCTO, ΔH	ΔH	20 m
MÁXIMA ALTURA DE LA CUBIERTA DEL BUQUE VS NIVEL DE MAR		12 m
ALTURA MÁX. DE BOMBA DEL BUQUE VS. NIVEL MÍN. DEL DUCTO		32 m
DATOS DE PROCESOS		
PRESIÓN MÁXIMA DE DESCARGA DEL BUQUE		100 psi
PRESIÓN DE DESCARGA EN CONEXIÓN SUBMARINA		140 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN, MPO (DESCARGA DE BUQUE +25 PSIG)		165 psi
PRESIÓN MÁXIMA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA (MPO *1,25)		206.25 psi
PRESIÓN INTERNA DE DISEÑO SEGÚN API RP 1111		
$P_i = 2 * S * (t/d) * f_d * f_e * f_t + P_o$		
Donde:		
PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA, $P_o = \rho * g * \Delta H$	P_o	29.16 psi
FACTOR DE DISEÑO	f_d	0.72 Transp. Líq/gas
FACTOR DE TEMPERATURA	f_e	1.00 ASME 31.4
FACTOR DE JUNTA LONGITUDINAL	f_t	1.00
Considerando que la presión es soportada solo por el ducto de acero, la presión de diseño es:		
	P_i Pto Troncal	1,533.27 psi
	P_i EN SUPERFICIE	1,504.11 psi
	FACTOR DE SEGURIDAD	7.43
La Presión de Ruptura de la Tubería viene dada por la siguiente relación		
Si $(D/t) > 1 P_b = 0,45 * (S+U) * \ln D/D_i$		
Si $(D/t) < 1 P_b = 0,90 * (S+U) * t / (D-t)$		
Las presiones de diseño no deberán exceder de los valores dados por las siguientes fórmulas		
$P_i \leq f_d * f_e * f_t * P_b$		
$P_d \leq 0,80 * P_t$		
$P_a \leq 0,90 * P_t$		
Donde:		
f_d	Factor de Diseño según API RP 1111	0.90
P_b	Mínima Presión de Ruptura	
D/t	Relación Diámetro a espesor de tubería	$D/t = 31.14$
	Si $(D/t) > 15 P_b = 0,45 * (S+U) * \ln D/D_i$	$P_b = 3,047.19$ psi
	Si $(D/t) < 15 P_b = 0,90 * (S+U) * t / (D-t)$	2,341.25 psi
P_t	Presión de prueba hidrostática	$P_t \leq 2,742.47$ psi
P_d	Presión de Diseño	$P_d \leq 2,193.98$ psi
P_a	Sobrepresión Fortuita	$P_a \leq 2,468.22$ psi
COMPARACIÓN		
PRESIÓN INTERNA DE DISEÑO		1,533.27 psi CUMPLE
MÁXIMA PRESIÓN INTERNA DE TRABAJO		165.00 psi CUMPLE
PRESIÓN INTERNA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA		206.25 psi CUMPLE

Fuente: Propia

4.4.1.6.- Diseño de cargas longitudinales.

De acuerdo a la Norma API RP 1111, la tensión efectiva en la tubería se estima mediante las siguientes relaciones:

$$T_{eff\ máx} = 0,60 * T_y \dots\dots\dots[Ecuación 17]$$

$$T_{eff} = T_a - P_i * A_i + P_o * A_o \dots\dots\dots[Ecuación 18]$$

$$T_a = \zeta_a * A \dots\dots\dots[Ecuación 19]$$

$$T_y = S * A \dots\dots\dots[Ecuación 20]$$

$$A = A_o - A_i = (\pi/4) * (D_{2o} - D_{2i})$$

Donde:

$T_{eff\ máx}$ = Tensión efectiva máxima de la tubería, (lb)

T_y = Esfuerzo de cedencia de la tubería, (lb)

T_{eff} = Tensión efectiva de la tubería, (lb)

T_a = Tensión axial del ducto, (lb)

P_i = Presión en el interior de la tubería, (psi)

A_i = Área de la sección interna de la tubería, (pulg²)

P_o = Presión hidrostática externa de la tubería, (psi)

A_o = Área de la sección externa de la tubería, (pulg²)

ζ_a = Esfuerzo axial en la pared de la tubería, (psi)

A = Área de la sección de la tubería, (pulg²)

S = Mínimo esfuerzo de fluencia especificado, (psi)

D_{2o} = Cuadrado del diámetro externo de la tubería, (pulg²)

D_{2i} = Cuadrado del diámetro interno de la tubería, (pulg²)

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 17 al 20. Para el caso de la tubería de transporte de combustible de 350 mm (14") de diámetro nominal, la tensión efectiva calculada es de 101 843,29 lb, la cual es menor a la tensión efectiva máxima admisible que es de 404 294,63 lb ver cálculos en la tabla 15.

Para el caso de la tubería de limpieza "flushing" de 200 mm (8") de diámetro nominal, la tensión efectiva calculada es de 63 820,13 lb, la cual es menor a la tensión efectiva máxima admisible que es de 150 845,35 lb ver cálculos que hemos aplicado en la tabla 16. Los ductos cumplen con las exigencias de diseño por cargas longitudinales.

Tabla 15

Diseño de cargas longitudinales-sistema de tuberías mixto 12 x 14 pulg

DISEÑO DE LA TUBERÍA POR CARGAS LONGITUDINALES - SISTEMA MIXTO 12"X 14"				
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE			
LA TENSION AXIAL EN EL DUCTO VIENE DADA POR LA RESTRICCIÓN AL MOVIMIENTO QUE EJERCE LA FUERZA DE FRICCIÓN ENTRE LA PARED EXTERNA DEL TUBO DE ACERO Y EL LECHO DUCTO A ANALIZAR:				
Ducto para el transporte de combustible Sistema Mixto de 12" x 14" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 12" y tubería externa de acero al carbono de 14")				
MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42			
Schedule	30	Espesor	0.375 pulg	SMYS 42,000.00 psi
Día. Exterior	14 pulg			
Dia. Interior	13.25 pulg			
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado		127.87 Kg/m
Peso Total del Ducto	78,001 Kg	171,602 lbs		
DATOS DE PROCESO				
Coeficiente de Fricción entre la Arena y el Acero (Máximo)				0.70
La tensión axial en el ducto se dará por la restricción al desplazamiento dada por la fuerza de fricción entre la pared y el ducto a lo largo del mismo para el caso de que se ejerzan fuerzas axiales.				
Esta Ta es el peso total de la tubería en libras por el coeficiente de fricción arena- acero máximo.				
La fuerza restrictiva al desplazamiento axial debido a la fuerza de fricción entre el ducto y el suelo marino es la misma que será la Tensión axial máxima (Ta) actuante debido a que el ducto en su punto terminal no tiene restricciones al desplazamiento				
Presión Interna de la Tubería, Pi				165.00 psi
Presión Hidrostatica Externa, Po				29.00 psi
CRITERIOS DE DISEÑO				
El Ducto esta sumergido a temperatura constante por lo que no esta sometido a esfuerzos axiales por efecto de la temperatura.				
La tensión efectiva máxima en la tubería no debe exceder del 60% de del esfuerzo de fluencia de la tubería, y se calcula con las siguientes ecuaciones:				
	$T_{effmax} = 0,6 * T_y$ $T_{eff} = T_a - P_i * A_i + P_o * A_o$ $T_a = \zeta_a * A$ $T_y = S * A$ $A = A_o - A_i = (\pi/4) * (D_o^2 - D_i^2)$			
Donde:				
Teffmax =	Tensión Efectiva Maxima en la tubería	404,294.63 lb		
Ty =	Esfuerzo de Cedencia de la tubería	673,824.38 lb		
Teff =	Tensión Efectiva en la Tubería	101,843.29 lb		
Ta =	Tensión Axial en el Ducto	120,121.08 lb		
Pi =	Presión Interior en la Tubería	165.00 lb		
Ai =	Area Interior de la Sección de la Tubería	137.82 in2		
Po =	Presión Hidrostática Externa en la Tubería	29.00 psi		
Ao =	Area Exterior de la Sección de la Tubería	153.86 in2		
ζa =	Esfuerzo Axial en la pared de la tubería	7,487.24 psi		
A =	Area de la Sección de la Tubería	16.04 in2		
S =	SMYS = Máximo Esfuerzo de Fluencia Especificado para el Material	42,000.00 psi		
Do =	Diametro Exterior del Ducto	14.00 pulg		
Di =	Diámetro Interior del Ducto	13.25 pulg		
Teff ≤ Teffmax CUMPLE				
Debido a que Teff ≤ Teffmax, la tubería podrá soportar los esfuerzos longitudinales a la que estará expuesta al mar				

Fuente: Propia

Tabla 16

Diseño de cargas longitudinales-sistema de tuberías mixto 8 x 6 pulg

DISEÑO DE LA TUBERÍA POR CARGAS LONGITUDINALES - SISTEMA MIXTO 8" x 6"				
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE			
LA TENSION AXIAL EN EL DUCTO VIENE DADA POR LA RESTRICCIÓN AL MOVIMIENTO QUE EJERCE LA FUERZA DE FRICCIÓN ENTRE LA PARED EXTERNA DEL TUBO DE ACERO Y EL LECHO MARINO				
DUCTO A ANALIZAR:				
Ducto de limpieza (flushing) Sistema Mixto de 6" x 8" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 6" y tubería externa de acero al carbono de 8")				
MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-				
Schedule	30	Espesor	0.227 pulg	SMYS 42,000.00 psi
Día. Exterior	8.625 pulg			
Día. Interior	8.171 pulg			
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado		75.34 Kg/m
Peso Total del Ducto	45,957 Kg	101,106 lbs		
DATOS DE PROCESO				
Coeficiente de Fricción entre la Arena y el Acero (Máximo)				0.70
La tensión axial en el ducto se dará por la restricción al desplazamiento dada por la fuerza de fricción entre la pared y el ducto a lo largo del mismo para el caso de que se ejerzan fuerzas axiales.				
Esta Ta es el peso total de la tubería en libras por el coeficiente de fricción arena- acero máximo.				
La fuerza restrictiva al desplazamiento axial debido a la fuerza de fricción entre el ducto y el suelo marino es la misma que será la Tensión axial máxima (Ta) actuante debido a que el ducto en su punto terminal no tiene restricciones al desplazamiento				
Presión Interna de la Tubería, Pi				165.00 psi
Presión Hidrostatica Externa, Po				29.00 psi
CRITERIOS DE DISEÑO				
El Ducto esta sumergido a temperatura constante por lo que no esta sometido a esfuerzos axiales por efecto de la temperatura.				
La tensión efectiva máxima en la tubería no debe exceder del 60% de del esfuerzo de fluencia de la tubería, y se calcula con las siguientes ecuaciones:				
	$T_{effmax} = 0,6 * T_y$ $T_{eff} = T_a - P_i * A_i + P_o * A_o$ $T_a = \zeta_a * A$ $T_y = S * A$ $A = A_o - A_i = (\pi/4) * (D_o^2 - D_i^2)$			
Donde:				
Teffmax =	Tensión Efectiva Maxima en la tubería	150,845.35 lb		
Ty =	Esfuerzo de Cedencia de la tubería	251,408.91 lb		
Teff =	Tensión Efectiva en la Tubería	63,820.13 lb		
Ta =	Tensión Axial en el Ducto	70,774.40 lb		
Pi =	Presión Interior en la Tubería	165.00 lb		
Ai =	Area Interior de la Sección de la Tubería	52.41 in2		
Po =	Presión Hidrostática Externa en la Tubería	29.00 psi		
Ao =	Area Exterior de la Sección de la Tubería	58.40 in2		
ζa =	Esfuerzo Axial en la pared de la tubería	11,823.47 psi		
A =	Area de la Sección de la Tubería	5.99 in2		
S =	SMYS = Máximo Esfuerzo de Fluencia Especificado para el Material	42,000.00 psi		
Do =	Diámetro Exterior del Ducto	8.63 pulg		
Di =	Diámetro Interior del Ducto	8.17 pulg		
Teff ≤ Teff CUMPLE				
Debido a que Teff ≤ Teffmax, la tubería podrá soportar los esfuerzos longitudinales a la que estará expuesta al mar.				

Fuente: Propia

4.4.1.7.- Combinación de cargas de diseño.

De acuerdo a la Norma API RP 1111, la combinación de cargas de diferencial de presión y cargas longitudinales no debe exceder los siguientes valores:

$$\left(\frac{P_i - P_o}{P_b}\right)^2 + \left(\frac{T_{eff}}{T_y}\right)^2 \leq 0,90 * \text{Cargas Operacional} \dots\dots \text{ [Ecuación 21]}$$
$$\leq 0,96 * \text{Cargas Pruebas Hidrostáticas}$$

Donde:

P_i = Presión en el interior de la tubería, (psi)

P_o = Presión hidrostática externa de la tubería, (psi)

P_b = Presión mínima de rotura, (psi)

T_{eff} = Tensión efectiva de la tubería, (lb)

T_y: Esfuerzo de cedencia de la tubería, (lb)

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 20. Para el caso de la tubería de transporte de combustible de 350 mm (14") de diámetro nominal, el factor de esfuerzos combinados de cargas de diferencia de presiones y cargas longitudinales es de 0,156 < 0,90, con lo cual cumple con ser menor a las cargas de operación y de pruebas hidrostáticas ver los cálculos que hemos aplicado en la tabla 17.

Tabla 17

Combinación de cargas de diseño-sistema de tuberías mixto de 12x 14 pulg

COMBINACIÓN DE CARGAS DE DISEÑO - SISTEMA MIXTO 12" X 14".			
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE		
DUCTO A ANALIZAR:			
Servicio:	Transporte de Combustible		
Ducto Sistema Mixto de 12" x 14" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 12" y tubería externa de acero al carbono de 14")			
MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42		
Schedule	30 Espesor	0.375 pulg	SMYS 42,000.00 psi
Diá. Exterior	14 pulg		
Diá. Interior	13.25 pulg		
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado	127.8 Kg/m
Peso Total del Ducto	77,958 Kg	171,508 lbs	
DATOS REQUERIDOS:			
PRESIÓN INTERNA DE LA TUBERÍA, Pi			125 psi
PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA, Po			29 psi
PRESION DE ROTURA, Pb			2,527.24 psi
TENSIÓN EFECTIVA DE LA TUBERÍA, Teff			101,843 lb
ESFUERZO DE CEDENCIA, Ty			673,824 lb
CONSIDERANDO SOLO EL DUCTO DE ENVOLVENTE DE ACERO, TENEMOS:			
<i>La combinación de cargas longitudinales y diferenciales de presión, no puede exceder los siguientes valores</i>			
$(((P_i - P_o) / P_b)^2 + (T_{eff} / T_y)^2)^{0.5} \leq 0,90 \text{ (Cargas Operacionales)}$ $\leq 0,96 \text{ (Cargas Pruebas Hidrostáticas)}$			
Donde:			
P _i =	Presión Interna de Trabajo		
P _o =	Presión Hidrostática Externa		
P _b =	Presión Mínima de Rotura		
T _{eff} =	Tensión Efectiva en la Tubería		
T _y =	Esfuerzo de Cedencia		
0.156 ≤ 0.90			
CONCLUSIÓN			
EL DUCTO CUMPLE CON ESTE REQUERIMIENTO, CONSIDERANDO SOLO EL DUCTO DE ACERO ENVOLVENTE DEL SISTEMA DE TUBERÍA MIXTO			

Fuente: Propia

Para el caso de la tubería de limpieza “flushing” de 200 mm (8”) de diámetro nominal, el factor de esfuerzos combinados de cargas de diferencia de presiones y cargas longitudinales es de 0,26 < 0,90, con lo cual cumple con ser

menor a las cargas de operación y de pruebas hidrostáticas ver los cálculos que hemos aplicado en tabla 18.

Tabla 18

Combinación de cargas de diseño-sistema de tuberías mixto de 6 x 8 pulg

COMBINACIÓN DE CARGAS DE DISEÑO - SISTEMA MIXTO 6" X 8"	
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE

CONSIDERANDO SOLO EL DUCTO DE ENVOLVENTE DE ACERO, TENEMOS:

DUCTO A ANALIZAR:

Servicio:	Limpieza de ductos			
Ducto Sistema 12" IT3 de 6" x 8" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 6" y tubería externa de acero al carbono de 8")				
MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42			
Schedule	30	Espesor	0.277 pulg	SMYS 42,000.00 psi
Diá. Exterior	8.75 pulg			
Dia. Interior	8.196 pulg			
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado		75.34 Kg/m
Peso Total del Ducto	45,957 Kg	101,106 lbs		

DATOS REQUERIDOS:

PRESIÓN INTERNA DE LA TUBERÍA, Pi	125 psi
PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA, Po	29 psi
PRESIÓN DE ROTURA, Pb	3,047.19 psi
TENSIÓN EFECTIVA DE LA TUBERÍA, Teff	63,820 lb
ESFUERZO DE CEDENCIA, Ty	251,409 lb

La combinación de cargas longitudinales y diferenciales de presión, no puede exceder los siguientes valores

$$(((P_i - P_o) / P_b)^2 + (T_{eff} / T_y)^2)^{0.5} \leq 0.90 \text{ (Cargas Operacionales)}$$

$$\leq 0.96 \text{ (Cargas Pruebas Hidrostáticas)}$$

Donde:

- P_i = Presión Interna de Trabajo
- P_o = Presión Hidrostática Externa
- P_b = Presión Mínima de Rotura
- T_{eff} = Tensión Efectiva en la Tubería
- T_y = Esfuerzo de Cedencia

$$0.26 \leq 0.90$$

CONCLUSIÓN

EL DUCTO CUMPLE CON ESTE REQUERIMIENTO, CONSIDERANDO SOLO EL DUCTO DE ACERO ENVOLVENTE DEL SISTEMA DE TUBERÍA MIXTO

Fuente: Propia

En conclusión, los ductos cumplen con las exigencias de diseño dadas por la norma, considerando solo el ducto de acero envolvente del sistema de mixto de tubería.

4.4.1.8.- Esfuerzos de colapso debido a presiones externas para tuberías no ovalizadas.

Durante la instalación y operación de una línea submarina, esta puede someterse a condiciones severas si la presión externa excede la presión interna, provocando el colapso de la tubería. La selección de la tubería debe prever que esta condición nunca se produzca.

Para evaluar esta condición, de acuerdo a la Norma API RP 1111, se debe cumplir:

$$(P_o - P_i) \leq f_0 * P_C \dots\dots\dots[Ecuación 22]$$

Donde:

P_o: Presión hidrostática externa de la tubería, (psi)

P_i: Presión en el interior de la tubería, (psi)

f₀ = 0,7 factor para tuberías sin costuras o tipo, (ERW)

P_C: presión de resistencia al colapso, (psi)

La presión de resistencia al colapso P_C, se estima mediante las siguientes relaciones:

$$P_C = P_y * P_e * (P_y^2 + P_e^2)^{1/2} \dots\dots\dots[Ecuación 23]$$

$$P_y = 2 * S * (t/d) \dots\dots\dots[Ecuación 24]$$

$$P_e = 2 * E * (t/d)^3 / (1-\nu^2) \dots\dots\dots[Ecuación 25]$$

Dónde:

P_C = Presión de resistencia al colapso, (psi)

P_y = Presión admisible a la fluencia, (psi)

P_e = Presión de colapso elástico, (psi)

S = Máximo esfuerzo de fluencia especificado SMYS, (psi)

t = Espesor de la tubería, (pulg)

d = Diámetro exterior de la tubería, (pulg)

E = Módulo elástico del acero, en psi (30 000 000 psi para acero)

ν = Módulo de Poison (0,30 para el acero)

$f_0 = 0,7$ para tuberías sin costura o tipo, (EWR)

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 22 al 25. Para los cálculos, se considera que las tuberías están vacías, es decir la condición cuando la presión diferencial es máxima.

Tanto en la tubería de transporte de combustible como en la tubería de limpieza, el máximo diferencial de presión es de 29 psi. Para el ducto de combustible de (350 mm) 14" de diámetro nominal, el factor ($f_0 * PC$) es 773 psi ver cálculo en la tabla 19 y para el ducto de limpieza de (200 mm) 8" de diámetro nominal, este valor es de 739 psi ver cálculo que hemos desarrollado en tabla 20.

En ambos casos se cumple que la presión externa P_o de 29 psi no supera a la presión de colapso reducida, de lo que se concluye que la tubería no colapsará.

Tabla 19

Verificación de colapso debido a presiones externas para tuberías no ovalizadas-sistema mixto de 12x 14 pulg

VERIFICACIÓN DE COLAPSO DEBIDO A PRESIONES EXTERNAS - TUBERÍAS SIN OVALIZACIÓN					
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE				
DUCTO A ANALIZAR:					
Ducto para el transporte de combustible Sistema 12" x 14" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 12" y tubería externa de acero al carbono de 14")					
MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42				
Schedule	30	Espesor	0.375 pulg	SMYS	42,000.00 psi
Diá. Exterior	14 pulg				
Diá. Interior	13.25 pulg				
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado			127.87 Kg/m
Peso Total del Ducto	78,001 Kg	171,602 lbs			
DATOS REQUERIDOS:					
MÁXIMO ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO, SMYS					42,000.00 psi
ESPESOR DE DISEÑO DE LA TUBERÍA					0.375 in
DIÁMETRO EXTERNO DE LA TUBERÍA					14.00 in
MÓDULO ELÁSTICO, "E"					30,000,000 psi
MÓDULO DE POISON, V					0.30
PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA, Po					29.00 psi
CÁLCULOS					
PRESIÓN ADMISIBLE DE FLUENCIA, Py	$Py = 2 * S * (t / d)$				2,250.00 psi
PRESIÓN DE COLAPSO ELÁSTICO, Pe	$Pe = 2 * E * (t / d)^2 / (1 - V^2)$				1,267.13 psi
PRESIÓN DE RESISTENCIA AL COLAPSO, Pc	$Pc = Py * Pe / (Py^2 + Pe^2)^{0.5}$				1,104.08 psi
SE DEBE CUMPLIR: $(Po - Pi) \leq fo * Pc$					
Donde:					
fo = 0,7 PARA TUBERÍAS SIN COSTURAS O DEL TIPO ERW					
Pi =	0 psi	Caso mas desfavorable: Tubería vacía			
Po - Pi =	29 psi				
fo * Pc =	773 psi				
LUEGO, SI:					
Po - Pi	≤	fo * Pc	CUMPLE		
29 psi	≤	773 psi			
CONCLUSIÓN					
El sistema de tuberías Mixto, formado por la tubería de acero externa o envolvente, el mortero de cemento y la tubería interna de resina reforzada con fibra de vidrio, funciona como un sistema monolítico cuyos componentes en forma conjunta, contribuyen a la resistencia estructural frente a las sollicitaciones externas de esfuerzo. Debido a que la envolvente por si sola es capaz de soportar las sollicitaciones de esfuerzos externos, se concluye que el resto de los elementos del sistema de tuberías, no reciben los esfuerzos de las sollicitudes externas.					

Fuente: Propia

Tabla 20

Verificación de colapso debido a presiones externas para tuberías no ovalizadas-sistema mixto de 6 x 8 pulg

VERIFICACIÓN DE COLAPSO DEBIDO A PRESIONES EXTERNAS - TUBERÍAS SIN OVALIZACIÓN					
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE				
DUCTO A ANALIZAR:					
Ducto de limpieza (flushing) de Sistema Mxto de 6" x 8" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 6" y tubería externa de acero al carbono de 8")					
MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42				
Schedule	30	Espesor	0.227 pulg	SMYS	42,000.00 psi
Diá. Exterior	8.625 pulg				
Diá. Interior	8.171 pulg				
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado			75.34 Kg/m
Peso Total del Ducto	45,957 Kg	101,106 lbs			
DATOS REQUERIDOS:					
MÁXIMO ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO, SMYS					42,000.00 psi
ESPESOR DE DISEÑO DE LA TUBERÍA					0.23 in
DIÁMETRO EXTERNO DE LA TUBERÍA					8.63 in
MÓDULO ELÁSTICO, "E"					30,000,000.00 psi
MÓDULO DE POISON, V					0.30
PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA, Po					29.00 psi
CALCULOS					
PRESIÓN ADMISIBLE DE FLUENCIA, Py					
	$Py = 2 * S * (t / d)$				2,210.78 psi
PRESIÓN DE COLAPSO ELÁSTICO, Pe					
	$Pe = 2 * E * (t / d)^3 / (1 - V^2)$				1,202.02 psi
PRESION DE RESISTENCIA AL COLAPSO, Pc					
	$Pc = Py * Pe / (Py^2 + Pe^2)^{0.5}$				1,056.02 psi
SE DEBE CUMPLIR: (Po - Pi) ≤ fo * Pc					
Donde:					
fo = 0,7 PARA TUBERÍAS SIN COSTURAS O DEL TIPO ERW					
	Pi =	0 psi	Caso mas desfavorable: Tubería vacía		
	Po - Pi =	29 psi			
	fo * Pc =	739 psi			
LUEGO, SI:					
	Po - Pi	≤	fo * Pc	CUMPLE	
	29 psi	≤	739 psi		
CONCLUSION					
El sistema de tuberías mixto, formado por la tubería de acero externa o envolvente, el mortero de cemento y la tubería interna de resina reforzada con fibra de vidrio, funciona como un sistema monolítico cuyos componentes en forma conjunta, contribuyen a la resistencia estructural frente a las sollicitaciones externas de esfuerzo. Debido a que la envolvente por si sola es capaz de soportar las sollicitaciones de esfuerzos externos, se concluye que el resto de los elementos del sistema de tuberías, no reciben los esfuerzos de las sollicitudes externas.					

Fuente: Propia

4.4.1.9.- Esfuerzos de colapso debido a presiones externas para tuberías ovalizadas.

La máxima ovalización admisible en la tubería submarina, ya sea por fabricación o lanzamiento, es del 2%, distribuyéndose de la siguiente manera:

- 1% Máxima ovalización por fabricación.
- 0,5% Máxima ovalización por transporte, manipulación y construcción.
- 0,5% Máxima ovalización por el lanzamiento.

La presión externa máxima admisible para un tubo circular de 2% de excentricidad, viene dado por las siguientes expresiones.

$PC = Py * Pe * (Py^2 + Pe^2)^{1/2}$ misma ecuación de tuberías sin ovalización.

$Pe = (2 * E) / (1 - y^2)$ [Ecuación 26]

$Py = (2 * t) * (SMYS) / d$ [Ecuación 27]

$f_0 = (dmáx + dmin) / (dmáx - dmin)$ [Ecuación 28]

Se debe cumplir que la presión de colapso reducida del tubo ovalizado PCRE debe ser al menos igual al 70% de la presión de colapso del tubo no ovalizado PC:

$PCRE = 0,70 * PC$ [Ecuación 29]

Con $PCRE = PEXT - PINT$ [Ecuación 30]

Donde:

PC = Presión de resistencia al colapso, (psi)

Pe = Presión de colapso elástico, (psi)

Py = Presión admisible a la fluencia, (psi)

f0 = 0,7 para tuberías sin costura o tipo, (EWR)

d = Diámetro exterior de la tubería, (pulg)

t = Espesor de la tubería, (pulg)

E = Módulo elástico del acero, en psi (30 000 000,00 psi para acero)

ν = Módulo de Poisson (0,30 para el acero)

$SMYS$ = Máximo esfuerzo de fluencia especificado, (psi)

$d_{\text{máx}}$ = Diámetro máximo de la tubería o diámetro externo, (pulg)

$d_{\text{mín}}$ = Diámetro mínimo de la tubería o diámetro interno, (pulg)

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 26 al 30). El diferencial máximo de presión externa e interna, es de 29 psi las presiones de colapso reducidas para tubo ovalizado son:
Ver cálculos que hemos desarrollado en la tabla 21, para la tubería de combustible de (350 mm) 14" de diámetro nominal 772,86 psi.

Tabla 21

Verificación de colapso debido a presiones externas para tuberías ovalizadas-sistema mixto de 12x 14 pulg

VERIFICACIÓN DE COLAPSO DEBIDO A PRESIONES EXTERNAS - TUBERÍAS CON OVALIZACIÓN					
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO , CONSTRUCCIÓN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE.				
DUCTO A ANALIZAR:					
Ducto para el transporte de combustible Sistema Mixto de 12" x 14" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 12" y tubería externa de acero al carbono de 14")					
MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-42					
Schedule	30	Espesor	0.375 pulg	SMYS	42,000 psi
Diá. Nominal	14 pulg				
Diá. Exterior	14 pulg				
Diá. Interior	13.25 pulg				
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado			127.87 Kg/m
Peso Total del Ducto	78,001 Kg		171,602 lbs		
DATOS DE PROCESO					
PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA, Po					29 psi
$P_c = P_y * P_e / (P_y^2 + P_e^2)^{0.5}$		$P_e = 2 * E / (1 - \nu^2) * (t/D)^3$		$P_y = 2 * t * (SMYS) / D$	
Donde:		$P_{CRE} = f_0 * P_c$			
PC =	Presión de Colapso				1,104.08 psi
Py =	Presión de Fluencia por colapso				2,250.00 psi
Pe =	Presión elástica por colapso				1,267.13 psi
fo =	Factor de colapso	$\begin{cases} 0.7 \text{ por tuberías sin costura o soldadas (ERW pipe)} \\ 0.6 \text{ para tuberías expandidas en frío (DSAW pipe)} \end{cases}$			0.70
t =	Espesor del tubo				0.38 pulg
Dmin =	Diámetro Interior de la tubería				13.25 pulg
D =	Diámetro Nominal de la tubería				14.00 pulg
SMYS	Esfuerzo de fluencia mínimo especificado				42,000 psi
E =	Módulo elástico				30,000,000 psi
ν =	Módulo de poisson (0.30 para el acero)				0.30
Pi =	Presión interna en la tubería (Caso mas desfavorable Pi = 0 psi)				0.00 psi
PCRE =	Presión de Colapso Reducida				772.86 psi
SE DEBE CUMPLIR:					
	$(P_o - P_i)$	≤	P_{CRE}		
	29 psi	≤	772.86 psi		

CONCLUSIÓN

La tubería externa del sistema mixto puede soportar una presión de colapso de (772.86 psi) mayor a la presión hidrostática máxima que soportará el sistema (29 psi). Por lo tanto, los demas elementos actuando en conjunto con la envolvente, soportaran sin colapsar la presión hidrostática externa a la que seran sometida.

Fuente: Propia

Ver cálculos que hemos desarrollado en la tabla 22, para la tubería de limpieza de (200 mm) 8" de diámetro nominal 891,34 psi.

Tabla 22

Verificación de colapso debido a presiones externas para tuberías ovalizadas-sistema mixto de 6 x 8 pulg

VERIFICACIÓN DE COLAPSO DEBIDO A PRESIONES EXTERNAS - TUBERÍAS CON OVALIZACIÓN					
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO , CONSTRUCCIÓN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE.				
DUCTO A ANALIZAR:					
Ducto de limpieza del Sistema Mixto de 6" x 8" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 6" y tubería externa de acero al carbono de 8")					
MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-42					
Schedule	30	Espesor	0.227 pulg	SMYS	42,000 psi
Diá. Nominal	8 pulg				
Diá. Exterior	8.625 pulg				
Diá. Interior	8.171 pulg				
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado		75.34 Kg/m	
Peso Total del Ducto	45,957 Kg	101,106 lbs			
DATOS DE PROCESO					
PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA, Po					29 psi
$P_c = P_y * P_e / (P_y^2 + P_e^2)^{0.5}$		$P_e = 2 * E / (1 - \nu^2) * (t/D)^3$		$P_y = 2 * t * (SMYS) / D$	
Donde:		$P_{CRE} = f_o * P_c$			
PC =	Presión de Colapso				1,273.35 psi
Py =	Presión de Fluencia por colapso				2,383.50 psi
Pe =	Presión elástica por colapso				1,506.32 psi
fo =	Factor de colapso	0.7 por tuberías sin costura o soldadas (ERW pipe) 0.6 para tuberías expandidas en frio (DSAW pipe)		0.7	
t =	Espesor del tubo				0.227 pulg
Dmin =	Diámetro Interior de la tubería				8.171 pulg
D =	Diámetro Nominal de la tubería				8 pulg
SMYS	Esfuerzo de fluencia mínimo especificado				42,000 psi
E =	Módulo elástico				30,000,000 psi
ν =	Módulo de poisson (0.30 para el acero)				0.30
Pi =	Presión interna en la tubería (Caso mas desfavorable Pi = 0 psi)				0 psi
PCRE =	Presión de Colapso Reducida				891.34 psi
SE DEBE CUMPLIR:					
		$(P_o - P_i) \leq P_{CRE}$			
	29 psi	\leq		891.34 psi	

CONCLUSIÓN

La tubería externa del sistema Mixto puede soportar una presión de colapso de (891.34 psi) mayor a la presión hidrostática máxima que soportará el sistema (29 psi). Por lo tanto, los demas elementos actuando en conjunto con la envolvente, soportaran sin colapsar la presión hidrostática externa a la que serán sometida.

Fuente: Propia

En conclusión, las presiones de colapso calculadas para tubería ovalizado son mayores que el diferencial máximo de presiones internas y externas a las que serán sometidas, las tuberías cumplen con esta exigencia.

4.4.1.10.- Colapso debido a la propagación del pandeo (Buckles).

Cuando la relación diámetro/espesor de la tubería es muy alta, puede ocurrir colapso de la tubería por efecto de la presión externa o por flexiones excesivas de los ductos.

De la Norma API RP 1111, se tiene la siguiente relación para calcular la presión de colapso por pandeo “buckles” de la tubería.

$$PP = 24 * S * (t/d)^{2,4} \dots\dots\dots[Ecuación 31]$$

Donde:

PP = Presión de colapso por pandeo, (psi)

S = Máximo esfuerzo de fluencia especificado, SMYS, (psi)

t = Espesor de la tubería, (pulg)

d = Diámetro exterior de la tubería, (pulg)

Para que haya pandeo, y por tanto se requiera la instalación de supresores de pandeo en la tubería, se debe cumplir que la diferencia máxima entre las presiones interna y externa sea mayor al 80% de la Presión de Colapso por Pandeo PP, es decir:

$$Po - Pi \geq fp * PP \dots\dots\dots[Ecuación 32]$$

Dónde:

Po = Máxima presión hidrostática externa, (psi)

Pi = Mínima presión interna, (psi)

fp = Factor de diseño 0,8

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 31 al 32. Considerando vacía la tubería interior FRP, el diferencial de presión máxima es de 29 psi.

Para la tubería de transporte de combustible de 350 mm (14") de diámetro nominal, el 80% de la presión de colapso por pandeo es de 135,99 psi ver los cálculos que hemos aplicado en la tabla 23.

Tabla 23

Verificación de colapso debido a la propagación del pandeo-sistema mixto de 12 x 14 pulg

VERIFICACIÓN DE COLAPSO POR PROPAGACIÓN DE PANDEOS DEBIDO A PRESIONES EXTERNAS					
Norma Aplicable	API RP 1111 - 99 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION, Y MANTENIMIENTO OF TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE				
DUCTO A ANALIZAR:					
Ducto para el transporte de combustible Sistema mixto de 12" x 14" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 12" y tubería externa de acero al carbono de 14")					
MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42				
Schedule	30	Espesor	0.375 pulg	SMYS	42,000 psi
Dia. Exterior	14 pulg				
Dia. Interior	13.25 pulg				
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado	127.87 Kg/m		
Peso Total del Ducto	78,001 Kg		171,602 lbs		
DATOS REQUERIDOS:					
Po =	PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA				29.00 psi
Pi =	PRESIÓN INTERNA MÍNIMA (PARA DUCTO VACÍO Pi = 0)				0.00 psi
fp =	FACTOR DE DISEÑO DE PROPAGACIÓN DE PANDEOS, fp				0.80
CALCULO DE PRESIÓN DE PANDEO					
$Pp = 24 * S * (t / D)^{2.4}$					
Donde;					
Pp =	Presión de Pandeo				169.99 psi
S =	SMYS (Máximo Esfuerzo de Fluencia Especificado)				42,000 psi
t =	Espesor de Diseño d				0.38 pulg
D =	Diámetro Exterior de la Tubería				14.00 pulg
Para verificar si se requieren o no elementos supresores de pandeo, se debe cumplir con la siguiente expresión:					
SI: $Po - Pi \geq fp * Pp$			SE REQUERIRÁN ELEMENTOS SUPRESORES DE PANDEO		
PARA ESTE CASO, COMO:					
29			≤		
			135.99 NO REQUIERE ELEMENTOS SUPRESORES DE PANDEO		

CONCLUSIÓN

YA QUE LA PRESIÓN EXTERNA AL TUBO DE ACERO ES MENOR QUE LA PRESIÓN REDUCIDA POR EL FACTOR DE PROPAGACIÓN DEL PANDEO, NO SE REQUERIRA INSTALAR ELEMENTOS PARA SUPRESIÓN DE PANDEOS. ADICIONALMENTE, EL MORTERO DE CEMENTO Y LA TUBERÍA FRP AUMENTARÁN AUN MAS LA RESISTENCIA Y LA TUBERÍA FRP AUMENTARÁN AUN MAS LA RESISTENCIA DEL SISTEMA AL PANDEO.

Fuente: Propia

Para la tubería de limpieza de 200 mm (8") de diámetro nominal, el 80% de la presión de colapso por pandeo es de 210 psi ver cálculos en la tabla 24.

Tabla 24

Verificación de colapso debido a la propagación del pandeo-sistema Mixto de 6 x 8 pulg

VERIFICACIÓN DE COLAPSO POR PROPAGACIÓN DE PANDEOS DEBIDO A PRESIONES EXTERNAS					
Norma Aplicable	API RP 1111 - 99 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION, Y MANTENIMIENTO OF TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE				
DUCTO A ANALIZAR:					
Ducto para limpieza (flushing) Sistema Mixto de 6" x 8" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 6" y tubería externa de acero al carbono de 8")					
MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-42					
Schedule	30	Espesor	0.277 pulg	SMYS	42,000 psi
Día. Exterior	8.625 pulg				
Dia. Interior	8.071 pulg				
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado		75.34 Kg/m	
Peso Total del Ducto	45,957 Kg	101,106 lbs			
DATOS REQUERIDOS:					
Po =	PRESIÓN HIDROSTÁTICA EXTERNA				29.00 psi
Pi =	PRESIÓN INTERNA MÍNIMA (PARA DUCTO VACÍO Pi = 0)				0.00 psi
fp =	FACTOR DE DISEÑO DE PROPAGACIÓN DE PANDEOS, fp				0.80
CALCULO DE PRESIÓN DE PANDEO					
$Pp = 24 * S * (t / D)^{2.4}$					
Donde;					
Pp =	Presión de Pandeo				262.78 psi
S =	SMYS (Máximo Esfuerzo de Fluencia Especificado)				42,000 psi
t =	Espesor de Diseño de la Tubería				0.28 pulg
D =	Diámetro Exterior de la Tubería				8.63 pulg
Para verificar si se requieren o no elementos supresores de pandeo, se debe cumplir con la siguiente expresión:					
SI: $Po - Pi \geq fp * Pp$			SE REQUERIRÁN ELEMENTOS SUPRESORES DE PANDEO		
PARA ESTE CASO, COMO:					
29			≤		
			210 NO REQUIERE ELEMENTOS SUPRESORES DE PANDEO		
CONCLUSIÓN:					
YA QUE LA PRESIÓN EXTERNA AL TUBO DE ACERO ES MENOR QUE LA PRESIÓN REDUCIDA POR EL FACTOR DE PROPAGACIÓN DEL PANDEO, NO SE REQUERIRA INSTALAR ELEMENTOS PARA SUPRESIÓN DE PANDEOS. ADICIONALMENTE, EL MORTERO DE CEMENTO Y LA TUBERÍA FRP AUMENTARÁN AUN MAS LA RESISTENCIA DEL SISTEMA AL PANDEO.					

Fuente: Propia

De acuerdo a lo anterior, no se requiere instalar supresores de pandeo a las tuberías de acero al carbono, ya que el diferencial de presión actuando sobre ella es menor que el 80% de la presión de colapso por pandeo, además que, el mortero de cemento y la tubería interna de FRP aumentan aún más la resistencia al pandeo del sistema de tubería mixto de tuberías.

4.4.1.11.- Cálculos golpe de ariete en el ducto submarino.

Es esta sección se estudia el efecto del golpe de ariete del líquido por efecto del cierre rápido de una válvula. Las válvulas instaladas en el sistema de tubería existente para el transporte de combustible son del tipo compuerta manual, sin embargo, podrían cerrarse en un tiempo de 40 segundos. El cálculo consiste en determinar la velocidad de propagación de la onda de presión, el tiempo que la onda tarda en llegar a la válvula que se cierra y la sobre presión por el cierre repentino.

La velocidad de propagación de la onda de presión se puede estimar con la fórmula de Allievi:

$$C = 9\,900 / (48,3 + ((\lambda * D) / e)^{1/2}) \dots\dots\dots[\text{Ecuación 33}]$$

Donde:

C = Velocidad de la onda de presión, (m/s)

λ = Variable (0,5)

D = Diámetro interior de la tubería, (mm)

e = Espesor de la tubería, (mm)

El tiempo de propagación de la onda se calcula mediante la relación:

$$TP = 2 * L / C \dots\dots\dots[\text{Ecuación 34}]$$

Donde

L= Longitud de la tubería (m)

La sobrepresión causada por el golpe de ariete viene dada por:

$$\Delta H = (2 * L * v) / (g * T) \dots\dots\dots[\text{Ecuación 35}]$$

Donde:

ΔH = Sobrepresión por golpe de ariete, metros de columna de agua (m.c.a.)

L = longitud de la tubería, (m)

v = Velocidad del fluido, (m/s)

g = Aceleración de la gravedad, (9,8 m/s²)

T_p = Tiempo de propagación de la onda, (s)

T = Tiempo de cierre, (s)

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 33 al 35 ver cálculo en la tabla 25, para la tubería de transporte de combustible de FRP de 300 mm (12") de diámetro nominal:
 - La sobrepresión por golpe de ariete es de 13,81 psi.
 - La máxima presión de operación del ducto es de 165 psi.
 - Luego la presión instantánea resultante del golpe de ariete será de 178,81 psi.

Por lo tanto, la presión resultante del golpe de ariete es menor a la presión de prueba hidrostática del ducto de 206,25 psi, la tubería podrá soportar un incidente de este tipo sin sufrir daños.

Tabla 25

Cálculos de golpe de ariete en tubería de fibra de vidrio de 12 pulg

CÁLCULOS DE GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍA FRP 12"			
DUCTO A ANALIZAR:			
MATERIAL	RESINA EPOXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO 300 mm (12") EST 16		
Ψ	ANGULO DE LA FIBRA (TUBERÍA EST 16)	55 °	
OD	DIAMETRO EXTERIOR DEL DUCTO,	309.2 mm	12.17 pulg
Di	DIÁMETRO INTERNO DEL DUCTO,	300 mm	11.81 pulg
SH	ESFUERZO HIDROSTÁTICO (HYDROSTATIC DESIGN STRESS, HDS)	63 N/mm ²	9,137.39 psi
MOP	PRESIÓN DE OPERACIÓN	165 psi	1.14 Mpa
W	PESO DE LA TUBERÍA	11.0 Kg/m	
WEG WAVISTRONG ENGINEERING GUIDE			
DATOS REQUERIDOS:			
	MOP -Presión Máxima de Operación		165.00 psi
	PH = Presión de Prueba Hidrostática		206.25 psi
	L = Longitud Total del Ducto		610.00 m
	Q = Flujo Maximo. El máximo flujo a despachar es de 5000 bbl/h y corresponde al Diesel B5 S50	5000 bbl/h	0.2208 m ³ /s
CALCULOS			
CELERIDAD DE LA ONDA (FÓRMULA DE ALLIEVI)			
$c = 9.900 / (48,3 + (\lambda * D / e)^{0,5})$			
Donde:			
c	Celeridad o velocidad de la onda de presión		1,424.27 m/s
λ	Variable = 0,5		0.50
D	Diametro interior de la tubería		0.30 m
e	Para efectos de calculo se considera la tubería de acero en mm		9.53 mm
TIEMPO DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA, Tp			
SE CONSIDERA QUE SE CIERRA UNA VÁLVULA EN LA COSTA Y LA ONDA VIAJA DESDE EL AMARRADERO MULTIBOYAS HASTA LA VÁLVULA QUE SE CIERRA UBICADA EN LA CAJA DE VALVULAS EN LA PLAYA			
$Tp = 2 * L / C$			
Donde:			
Tp	Tiempo de Propagacion de la onda		0.86 s
SOBREPRESION POR GOLPE DE ARIETE			
$\Delta H = 2 * L * V / (g * T)$			
Donde:			
ΔH	Sobrepresión por Golpe de Ariete	13.81 psi	9.72 m
L	Longitud del Ducto		610.00 m
V	Velocidad del Fluido		3.12 m/s
T	Tiempo de Cierre		40.00 s
g	Aceleración de la gravedad		9.80 m/s ²
PARA EL CALCULO SE HA ASUMIDO UN TIEMPO APROX. DE CIERRE DE LA VÁLVULA EN LA PLAYA DE T = 40 SEG.			
T= 40 SEG.Y UNA ACELERACION DE LA GRAVEDAD g = 9,8 m/sg ²			
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN			165.00 psi
SOBREPRESIÓN POR GOLPE DE ARIETE (CIERRE INSTANTÁNEO DE LA VÁLVULA)			13.815 psi
PRESIÓN TOTAL INSTANTÁNEA SOBRE LA TUBERÍA POR GOLPE DE ARIETE (MOP + SOBREPRE.)			178.81 psi
PRESIÓN MÁXIMA INSTANTÁNEA (PRESIÓN DE PRUEBA HIDROSTÁTICA)			206.25 psi
CONCLUSIÓN:			
YA QUE LA PRESIÓN MÁXIMA INSTANTÁNEA EJERCIDA POR EL GOLPE DE ARIETE (178.81 PSI) ES MENOR QUE LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA DE LA TUBERÍA (206.25 PSI), EL GOLPE DE ARIETE POR CIERRE REPENTINO DE UNA VÁLVULA DEL SISTEMA SERA SOPORTADO POR LA TUBERÍA SIN CAUSAR DAÑOS EN ELLA.			

Fuente: Propia

Ver cálculo que hemos desarrollado en la tabla 26, para la tubería de limpieza de FRP de 150 mm (6") de diámetro nominal:

- La sobrepresión por golpe de ariete es de 13,26 psi.
- La presión máxima de operación del ducto es de 165 psi.
- Luego la presión instantánea resultante del golpe de ariete será de 178,26 psi.

Por lo tanto, la presión resultante del golpe de ariete es menor a la presión de prueba hidrostática del ducto de 206 psi, la tubería podrá soportar un incidente de este tipo sin sufrir daños.

Tabla 26

Cálculos de golpe de ariete en tubería de fibra de vidrio de 6 pulg

CÁLCULOS DE GOLPE DE ARIETE TUBERÍA DE FRP 6"		
DUCTO A ANALIZAR:		
MATERIAL	RESINA EPOXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO 150 mm (6") EST 16	
Ψ	ANGULO DE LA FIBRA (TUBERÍA EST 16)	55 °
OD	DIAMETRO EXTERIOR DEL DUCTO,	156.4 mm 6.16 pulg
Di	DIÁMETRO INTERNO DEL DUCTO,	150 mm 5.91 pulg
SH	ESFUERZO HIDROSTÁTICO (HYDROSTATIC DESIGN STRESS, HDS)	63 N/mm2 9137.39 psi
MOP	PRESIÓN DE OPERACIÓN.	165 psi 1.138 Mpa
W	PESO DE LA TUBERÍA	4.0 Kg/m
WEG	WAVISTRONG ENGINEERING GUIDE	
DATOS REQUERIDOS:		
MOP	Presión Máxima de Operación	165.00 psi
PH	Presión de Prueba Hidrostática	206.25 psi
L	Longitud Total del Ducto	610.00 m
Q	Flujo Maximo. El máximo flujo para limpieza (flushing) es de 1200 bbl/h.	1200 bbl/h 0.05 m ³ /s
CÁLCULOS		
CELERIDAD DE LA ONDA (FÓRMULA DE ALLIEVI)		
$C = 9.900 / (48,3 + (\lambda * D / e))^{0,5}$		
Donde:		
C	Celeridad o velocidad de la onda de presión	1,424.34 m/s
λ	Variable = 0,5	0.50
D	Diametro interior de la tubería	0.15 m
e	Para efectos de calculo se considera la tubería de acero y e=mm	7.04 mm
TIEMPO DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA, Tp		
SE CONSIDERA QUE SE CIERRA UNA VÁLVULA EN LA COSTA Y LA ONDA VIAJA DESDE EL AMARRADERO MULTIBOYAS HASTA LA VÁLVULA QUE SE CIERRA UBICADA EN LA CAJA DE VALVULAS EN LA PLAYA		
$Tp = 2 * L / c$		
Donde:		
Tp	Tiempo de Propagacion de la onda	0.86 s
SOBREPRESIÓN POR GOLPE DE ARIETE		
$\Delta H = 2 * L * V / (g * T)$		
Donde:		
ΔH	Sobrepresión por Golpe de Ariete	13.26 psi 9.33 m
L	Longitud del Ducto	610.00 m
V	Velocidad del Fluido	3.00 m/s
T	Tiempo de Cierre	40.00 s
g	Aceleración de la gravedad	9.80 m/s ²
PARA EL CALCULO SE HA ASUMIDO UN TIEMPO APROX. DE CIERRE DE LA VÁLVULA EN LA PLAYA DE T = 40 SEG.		
Y UNA ACELERACION DE LA GRAVEDAD g = 9,8 m/sg ²		
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN		165.00 psi
SOBREPRESIÓN POR GOLPE DE ARIETE (CIERRE INSTANTÁNEO DE LA VÁLVULA)		13.26 psi
PRESIÓN TOTAL INSTANTÁNEA SOBRE LA TUBERÍA POR GOLPE DE ARIETE (MOP + SOBREPRE.)		178.26 psi
PRESIÓN MÁXIMA INSTANTÁNEA (PRESIÓN DE PRUEBA HIDROSTÁTICA)		206.25 psi
CONCLUSIÓN:		
YA QUE LA PRESIÓN MÁXIMA INSTANTÁNEA EJERCIDA POR EL GOLPE DE ARIETE (178.26 PSI) ES MENOR QUE LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA DE LA TUBERÍA (206.25 PSI), EL GOLPE DE ARIETE POR CIERRE REPENTINO DE UNA VÁLVULA DEL SISTEMA SERA SOPORTADO POR LA TUBERÍA SIN CAUSAR DAÑOS EN ELLA.		

Fuente: Propia

4.4.1.12.- Análisis de estabilidad hidrodinámica frente a fuerzas originadas por corrientes marinas permanentes.

Las corrientes marinas permanentes ejercen una fuerza constante en el sentido normal al ducto. Dependiendo de su dirección e intensidad, esta fuerza puede originar el arrastre y el levantamiento del ducto submarino.

Las fuerzas originadas por las corrientes ejercen una fuerza de empuje contra el ducto en sentido lateral. La intensidad de la fuerza depende del área expuesta del ducto (diámetro externo que enfrenta a las corrientes).

La fuerza opuesta al arrastre es la fuerza de fricción resistente entre el ducto y el suelo marino en condiciones de operación y la fuerza resistente al levantamiento es el peso propio del ducto sumergido en condiciones de operación.

El API RP 1111 y la Norma DNV-RP-F109: “on-bottom stability design of submarine pipelines”, establecen las formulaciones y los requisitos que se deben cumplir para considerar que un ducto submarino es estable ante las corrientes marinas permanentes figura 8.

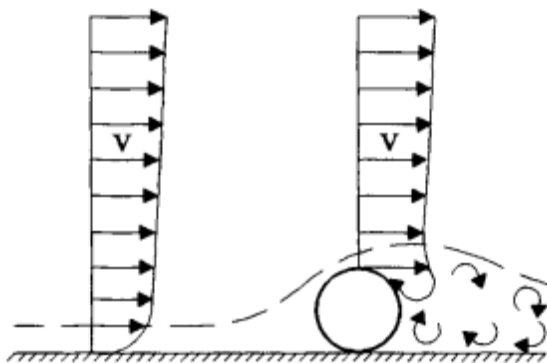


Figura 8. Corriente marina alrededor de una tubería

Fuente: Grace, 1978

$$F_D = (1/2) * \rho * C_D * D * V^2 \quad \dots\dots\dots[\text{Ecuación 36}]$$

$$F_L = (1/2) * \rho * C_L * D * V^2 \quad \dots\dots\dots[\text{Ecuación 37}]$$

Donde:

FD = Fuerza de arrastre, (N/m)

ρ = Densidad del agua de mar, (kgm/m³)

CD = Coeficiente de dragado 0,7 a 1,3

V = Velocidad de la corriente en dirección normal al ducto, (m/s)

D = Diámetro exterior del ducto, (m)

FL = Fuerza de levantamiento, (N/m)

CL = Coeficiente de levante 0,7 a 1,5

El peso unitario mínimo del ducto deberá ser:

$$W = FL + (FD / \mu) \dots\dots\dots [Ecuación 38]$$

Donde:

W = Peso unitario del ducto, (kg/m)

μ = Coeficiente de fricción (0,5 a 0,7 para arenas)

- Resultados: De acuerdo a los cálculos realizados utilizando la ecuación 36 al 38. Se han considerado los mayores coeficientes de levante y arrastre, para el ducto del sistema mixto de 12" x 14" de diámetro nominal 350 mm (14"), tendido sobre el lecho marino, requiere un peso mínimo sumergido de 8,82 kg/m incluyendo el hidrocarburo más ligero en su interior (diésel B5 S50); como el peso del ducto del sistema mixto submarino sumergido (peso de tubería de acero 350 mm (14") SCH 30 más peso del grout de cemento más peso de la tubería de fibra de vidrio de 300 mm (12") de diámetro) es de 127,87 kg/m, se considera estable frente a las fuerzas de corrientes permanentes en el lecho marino ver cálculos que hemos realizado en la tabla 27.

Tabla 27

Estabilidad hidrodinámica frente a fuerzas originadas por corrientes marinas permanentes- sistema mixto de 12 x 14 pulg

ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA FRENTE A FUERZAS ORIGINADAS POR CORRIENTES SUBMARINAS PERMANENTES			
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION, Y MANTENIMIENTO OF TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE		
DUCTO A ANALIZAR:			
Ducto para el transporte de combustible del sistema 12" x 14" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 12" y tubería externa de acero al carbono de 14")			
MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-42			
Schedule	30	Espesor	0.375 pulg
Diá. Exterior	14 pulg		0.3556 m
Diá. Interior	13.25 pulg		0.33655 m
Longitud de Tubería	610 m		Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado 127.80 Kg/m
Densidad del mar (ρ)	1025 kg/m ³		
Coefficiente de arrastre (CD)	1.3		
Coefficiente de levante (CL)	1.5		
Velocidad de corriente submarina máxima en el fondo(1)			0.375 m/seg 0.73 Nudos
Coefficiente de Fricción tubo arena (μ)			0.7
Peso del fluido interno en el ducto (hidrocarburo Diesel B5 S50)			48.49 Kg/m
Peso tubería de Acero	54.570 lb/pie	81.21 Kg/m	
(1) La velocidad de corriente máxima fue de 0,2 m/seg. Se consideró para el diseño 0,375 m/seg			
DETERMINACION DEL PESO DEL SISTEMA MIXTO DE TUBERÍAS			
Peso específico de la lechada			2,400.00 Kg/m3
Area interna del ducto de acero			0.089 m2 137.89 pulg ²
Diámetro Exterior del ducto de fibra FPI			309.20 mm 12.17 pulg
Area anular entre el ducto de fibra y la camisa de acero			0.014 m2 21.50 pulg ²
Volumen de grout por metro lineal			0.014 m3/m 21.50 pulg ³ /pulg
PESO DEL GROUT			33.29 Kg/m
PESO DEL DUCTO DE FIBRA			11.00 Kg/m 7.39 lb/pie
DETERMINACION DEL PESO DEL RECUBRIMIENTO EXTERNO			
Espesor de la película de recubrimiento			2.20 mm 0.09 pulg
Densidad del recubrimiento			960.00 Kg/m3 7.95 lb/gal
Diámetro medio del ducto recubierto			0.358 m 14.09 pulg
Volumen de película de recubrimiento por metro lineal de ducto			0.002 m3/m 14.09 pulg ³ /pulg
PESO DEL RECUBRIMIENTO TRICAPA POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD			2.37 Kg/m
PESO TOTAL DEL SISTEMA MIXTO DE TUBERIAS			127.87 Kg/m
Empuje del agua de mar sobre el ducto sumergido			103.06 Kg/m
DIFERENCIA ENTRE LA FUERZA DE EMPUJE Y EL PESO DEL SISTEMA MIXTO			-24.81 Kg/m
EL DUCTO NO FLOTA			
ESTABILIDAD DEL DUCTO DE SISTEMA MIXTO EN EL LECHO MARINO			
Fuerza de arrastre $FD = (1/2) * \rho * CD * D * v^2$			33.52 N/m 3.42 Kg/m
Fuerza de levantamiento $FL = (1/2) * \rho * CL * D * v^2$			38.68 N/m 3.94 Kg/m
Peso mínimo del tubo sumergido $W = FL + (FD / \mu)$			8.82 Kg/m
Peso del ducto sumergido lleno de hidrocarburo liviano			73.30 Kg/m
EL DUCTO ES ESTABLE ANTE LAS CORRIENTES PERMANENTES			

Fuente: Propia

Para el caso del ducto del sistema mixto de 6" x 8" para limpieza "flushing" con diámetro nominal de 200 mm (8"), tendido sobre el lecho marino, el peso mínimo sumergido es de 5,46 kg/m incluyendo el hidrocarburo más ligero en su interior (diésel B5 S50); como el peso del ducto del sistema mixto submarino sumergido (peso de tubería de acero 200 mm (8") SCH 30 más peso del grout de cemento más peso de la tubería de fibra de vidrio de 150 mm (6") de diámetro) es de 75,34 kg/m, se considera estable frente a las corrientes submarinas permanentes ver cálculos que hemos realizado en la tabla 28.

En adición, se debe tener en cuenta que el ducto se enterrará en el lecho marino ganando estabilidad.

Tabla 28

Estabilidad hidrodinámica frente a fuerzas originadas por corrientes marinas permanentes- sistema mixto de 6 x 8 pulg

ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA FRENTE A FUERZAS ORIGINADAS POR CORRIENTES SUBMARINAS PERMANENTES			
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION, Y MANTENIMIENTO OF TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE		
DUCTO A ANALIZAR:			
Ducto para limpieza (flushing) Sistema Mixto de 6" x 8" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 6" y tubería externa de acero al carbono de 8")			
MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-42			
Schedule	30	Espesor	0.277 pulg
			SMYS 42,000.00 psi
Diá. Exterior	8.625 pulg		0.2191 m
Diá. Interior	8.071 pulg		0.2050 m
Longitud de Tubería	610 m		Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado 75.34 Kg/m
Densidad del agua de mar (ρ)	1025 kg/m ³		
Coefficiente de arrastre (CD)	1.3		
Coefficiente de levante (CL)	1.5		
Velocidad de corriente submarina máxima en el fondo(1)			0.375 m/seg 0.73 Nudos
Coefficiente de Fricción tubo arena (μ)			0.7
Peso del fluido interno en el ducto (Diesel B5 S50)			27.07 Kg/m
Peso tubería de Acero	24.700 lb/pie	36.76 Kg/m	
(1) La velocidad de corriente máxima fue de 0,2 m/seg. Se consideró para el diseño 0,375 m/seg			
DETERMINACION DEL PESO DEL SISTEMA MIXTO DE TUBERÍAS			
Peso específico de la lechada		2,400.00 Kg/m ³	7.00 lb/gal
Area interna del ducto de acero		0.033 m ²	51.16 pulg ²
Diametro exterior del ducto de fibra FPI		156.40 mm	6.16 pulg
Diametro interior del ducto de fibra FPI		150.00 mm	5.91 pulg
Area anular entre el ducto de fibra y la camisa de acero		0.014 m ²	21.38 pulg ²
Volumen de grout por metro lineal		0.014 m ³ /m	21.38 pulg ³ /pulg
PESO DEL GROUT			33.11 Kg/m
PESO DEL DUCTO DE FIBRA		4.00 Kg/m	2.69 lb/pie
DETERMINACION DEL PESO DEL RECUBRIMIENTO EXTERNO			
Espesor de la película de recubrimiento		2.20 mm	0.09 pulg
Densidad del recubrimiento		960.00 Kg/m ³	7.95 lb/gal
Díametro medio del ducto recubierto		0.221 m	8.71 pulg
Volumen de película de recubrimiento por metro lineal de ducto		0.002 m ³ /m	8.71 pulg ³ /pulg
PESO DEL RECUBRIMIENTO TRICAPA POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD			1.47 Kg/m
PESO TOTAL DEL SISTEMA MIXTO			75.34 Kg/m
Empuje del agua de mar sobre el ducto sumergido			39.42 Kg/m
DIFERENCIA ENTRE LA FUERZA DE EMPUJE Y EL PESO DEL SISTEMA MIXTO			-35.92 Kg/m
EL DUCTO NO FLOTA			
ESTABILIDAD DEL DUCTO DEL SISTEMA MIXTO EN EL LECHO MARINO			
Fuerza de arrastre	$FD = (1/2) * \rho * CD * D * V^2$	20.73 N/m	2.11 Kg/m
Fuerza de levantamiento	$FL = (1/2) * \rho * CL * D * V^2$	23.92 N/m	2.44 Kg/m
Peso mínimo del tubo sumergido	$W = FL + (FD / \mu)$		5.46 Kg/m
Peso del ducto sumergido lleno de hidrocarburo liviano			62.99 Kg/m
EL DUCTO ES ESTABLE ANTE LAS CORRIENTES PERMANENTES			

Fuente: Propia

4.4.1.13.- Estabilidad hidrodinámica del ducto en el fondo marino debido a la incidencia de las olas.

Las olas producen fuerzas ascensionales sobre las líneas submarinas que deben ser contrarrestadas por su peso total en el lecho marino.

Los cálculos se realizan para una vida útil de 100 años con olas de altura máxima y normal. Se ha establecido la altura máxima de olas en 1,8 metros estando el ducto tendido sobre el fondo marino y se sabe que con el transcurrir del tiempo, este se enterrará por sí solo ganando estabilidad.

De acuerdo con la teoría de Airy (o de la onda lineal), el movimiento del agua sobre el fondo marino alcanza su máxima velocidad bajo la cresta de la ola y su valor viene determinado por su altura (H1/3), período (T) y profundidad (H).

Con los valores del período “T” y la profundidad, se calcula el parámetro:

$$T * (g / H)^{0.5} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 39}]$$

Con este, se determinan los coeficientes de velocidad (GV) y aceleración (Ga) del agua ver figura 9, de acuerdo al procedimiento expuesto en la obra de Robert A. Grace.

$$u_{\text{máx}} = GV * (H1/3) / T \dots\dots\dots[\text{Ecuación 40}]$$

$$a_{\text{máx}} = GA * H1/3 / T^2 \dots\dots\dots[\text{Ecuación 41}]$$

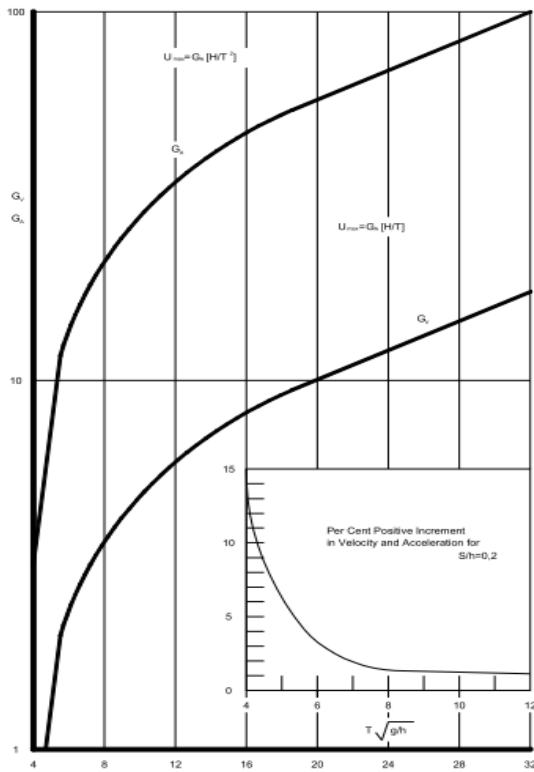


Figura 9. Velocidad y aceleración máximas del flujo de agua

Fuente: Grace, 1978

Próximo al fondo marino. (teoría de AIRY)

Las fuerzas vertical y horizontal máximas que caben considerar sobre la conducción, inducidas por el oleaje, tienen las expresiones siguientes:

$$FH \text{ máx} = C_{\text{máx}} * \rho/2 * D * L * \beta_1 * u_{2\text{máx}} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 42}]$$

$$FV \text{ máx} = K_{\text{máx}} * \rho/2 * D * L * \beta_1 * u_{2\text{máx}} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 43}]$$

Dónde:

FH máx = Fuerza horizontal máxima sobre la tubería, (N)

C_{máx} = Coeficiente de forma para acciones horizontales (figura 9)

P = Densidad del agua de mar, (kg/m³)

D = Diámetro exterior de la tubería, (m)

L = Longitud de la tubería, (m)

β_1 = Factor de corrección

$u_{2\text{m}\acute{a}\text{x}}$ = Velocidad máxima del agua en el fondo marino inducida por el oleaje, considerando velocidades sub-superficiales de mayor intensidad a las del fondo, (m/s)

FV máx = Fuerza vertical máxima sobre la tubería, (N)

$K_{\text{m}\acute{a}\text{x}}$ = Coeficiente de forma para acciones verticales, (figura 10)

Hay que indicar que tanto la fuerza horizontal como la vertical obtenidas por las expresiones anteriores corresponden a valores máximos sobre los que no es necesario tomar ningún margen de seguridad adicional.

Para determinar los coeficientes C_{max} y K_{max} , hay que recurrir a la figura 9, tomado igualmente de la obra de Robert A. Grace, mediante el factor:

$$\Psi = u_{2\text{m}\acute{a}\text{x}} / (a_{\text{m}\acute{a}\text{x}} * D) \dots\dots\dots[\text{Ecuación 44}]$$

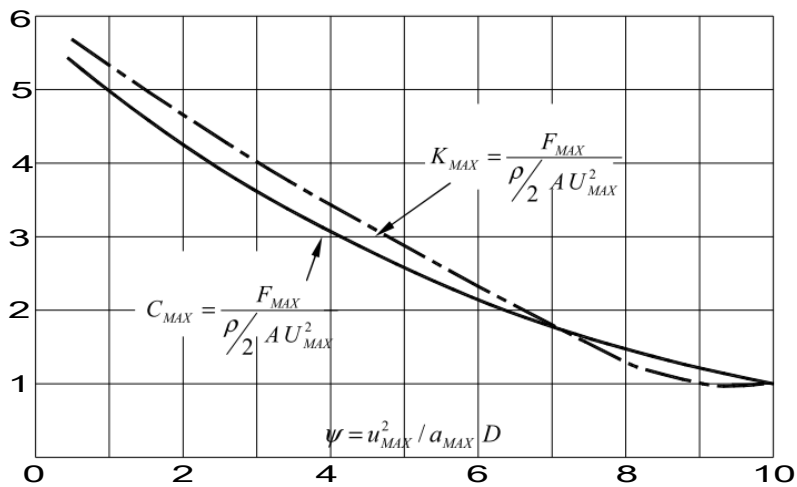


Figura 10. Fuerzas hidrodinámicas sobre ductos submarinos con frente de olas paralelas al tendido

Fuente: Grace, 1978

- Resultados: De acuerdo a los cálculos que hemos realizado plasmados en las tablas 29 y 30 utilizando la ecuación 39 al 44, los ductos submarinos, tanto el de 12" (300 mm) como el de 6" (150 mm), son inestables frente a la presencia de olas máximas en la zona, que según el Estudio Hidro-Oceanográfico realizado por HIDROVER E.I.R.L en junio de 2016 pueden llegar a los 4 metros de altura, en consecuencia, deberán ser enterrados hasta ser cubiertos la totalidad de su diámetro.

Adicionalmente, se recomienda por la presencia de grandes olas, se deberá incluir una chaqueta de protección de 18", la cual se instalará en los últimos 100 metros de tubería submarina antes de llegar a la zona de rompiente en la playa.

También es de considerar una tapada mínima inicial de 20 cm sobre los ductos del sistema mixto, esperándose que con el transcurso del tiempo se puedan terminar de enterrar aún más para que la tubería no quede a la intemperie.

Tabla 29

Estabilidad hidrodinámica ducto frente a olas de gran tamaño-sistema mixto de 12 x 14 pulg.

ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA DEL DUCTO FRENTE A OLAS DE GRAN TAMAÑO	
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION, Y MANTENIMIENTO OF TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE

DUCTO A ANALIZAR:
 Ducto para el transporte de combustible Sistema Mixto de 12" x 14" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 12" y tubería externa de acero al carbono de 14")

MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-42	
Periodo de la ola (T)	14.00 seg
Altura de la ola (H1/3)	4.00 m
Profundidad de agua media (h)	4.50 m
Aceleración de la gravedad (g)	9.81 m/seg
Parametro para uso gráfico (Tx(g/h) ^{1/2})	20.67
Coefficiente de velocidad (Gv)	10.00 m
Coefficiente de aceleración (Ga)	68.00 kg/m ³
μ máx (Gv x H1/3 / T)	2.86
a máx (Ga x H1/3 / T ²)	1.39
Peso específico agua de mar (ρ)	1,025.00 kg/m ³
Díametro exterior del ducto (D)	14.00 pulg
	0.356 m

Según Robert A. Grace:
 FH max= Cmax x ρ / 2 x D x L x β1 x μ max²
 FV max= Kmax x ρ / 2 x D x L x β1 x μ max²
 FH max= Fuerza horizontal máxima sobre el ducto
 Cmax= Coeficiente de forma para acciones horizontales
 FV max= Fuerza vertical máxima sobre el ducto
 Kmax= Coeficiente de forma para acciones verticales
 ρ = Peso específico del agua de mar
 D=Diámetro exterior de la tubería en m.
 L= longitud de la tubería
 β1 = Factor de corrección (1.05)
 μ máx= Velocidad máxima del agua en el fondo marino inducida por oleaje expresada en (m/s)
 Los valores obtenidos son valores máximos sobre los cuales no hay que aplicar factores de seguridad

Cmáx y K máx se determinan de la Figura N° 2

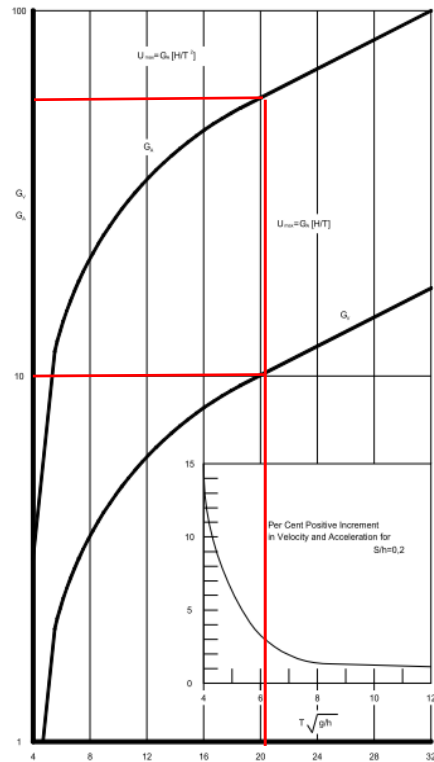


FIGURA N° 9
 Velocidad y aceleración máxima del flujo de agua próximo al fondo marino según Teoría de AIRY

ψ = (μ máx) ² / (a máx x D)	16.54
Cmáx	1.00
Kmáx	1.00
β1	1.08
FH máx	1,606.73 N/m
FV máx	1,606.73 N/m
FH máx	163.79 Kg/m
FV máx	163.79 Kg/m
FUERZAS GRAVITATORIAS	
Peso propio del ducto	127.87 Kg/m
Peso líquido interno en el ducto	48.49 Kg/m
Fuerza de empuje ascendente	103.06 Kg/m
Fuerza total (FG)	73.30 Kg/m
Coefficiente de fricción (μ)	0.70
Fza Res. al arrastre (FRA= FG x μ)	51.31 Kg/m

FRA < FH máx el ducto es inestable horizontalmente
 FG < FV máx el ducto es inestable verticalmente

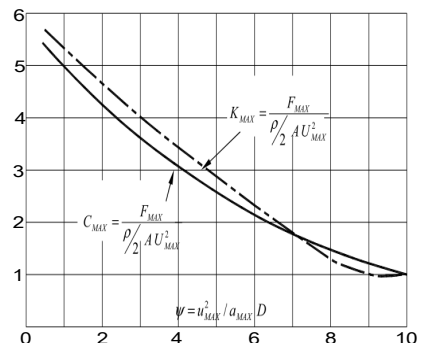


FIGURA N° 10
 Fuerzas hidrodinámicas sobre ductos submarinos con frente de olas paralelas al tendido

ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL DUCTO SEMI-ENTERRADO

FACTOR DE REDUCCION POR SUELO MARINO (NORMA DNV-RP-F109)

Considerando el ducto enterrado (ZP) un 50% de su diámetro, se tiene:

$$ZP / D = 0.500$$

$$\text{Factor por suelo permeable (RperZ)} = 0.700$$

Factor por penetración en lecho marino para efectos horizontales (Rpen Y)

$$Rpen Y = 1,0 - 1,4 \times (ZP / D) \text{ pero no menor de } 0,30 = 0.300$$

Factor por penetración en lecho marino para efectos verticales (Rpen Z)

$$Rpen z = 1,0 - 1,3 \times (ZP / D - 0,1) \text{ pero no menor de } 0,30 = 0.480$$

Factor de reducción Total para carga hidrodinámica horizontal (Rtotal Y)

$$Rtotal Y = Rpen Y = 0.300$$

Factor de reducción Total para carga hidrodinámica vertical (Rtotal z)

$$Rtotal z = RperZ \times Rpen Z = 0.336$$

FUERZA SOBRE EL DUCTO SEMI-ENTERRADO UN 50% DEL DIAMETRO

$$\text{Fuerza maxima horizontal (FMH)} = Rtotal Y \times FH = 49.14 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Fuerza maxima vertical (FMV)} = Rtotal z \times FV = 55.03 \text{ Kg/m}$$

FRA > FMH, el ducto es estable horizontalmente

FG > FMV, el ducto es estable verticalmente

En conclusión al cubrir el ducto con 20 cm de suelo marino se cumple la condición de estabilidad hidrodinámica.

Fuente: Propia

Tabla 30

Estabilidad hidrodinámica del ducto frente a olas de gran tamaño-sistema mixto de 6 x 8 pulg

ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA DEL DUCTO FRENTE A OLAS DE GRAN TAMAÑO	
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION, Y MANTENIMIENTO OF TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE
DUCTO A ANALIZAR:	
Ducto de limpieza Sistema Mixto de 6" x 8" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 6 y tubería externa de acero al carbono de 8")	

MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-42

Periodo de la ola (T)	14.00 seg
Altura de la ola (H1/3)	4.00 m
Profundidad de agua media (h)	4.50 m
Aceleración de la gravedad (g)	9.81 m/seg
Parametro para uso gráfico (Tx(g/h) ^{1/2})	20.67
Coefficiente de velocidad (Gv)	10.00 m
Coefficiente de aceleración (Ga)	68.00 kg/m ³
μ máx (Gv x H1/3 / T)	2.86
a máx (Ga x H1/3 / T ²)	1.39
Peso específico agua de mar (ρ)	1025.00 kg/m ³
Diametro exterior del ducto (D)	0.219 m

Según Robert A. Grace:

$$FH \text{ máx} = C_{\text{max}} \times \rho / 2 \times D \times L \times \beta 1 \times \mu \text{ máx}^2$$

$$FV \text{ máx} = K_{\text{max}} \times \rho / 2 \times D \times L \times \beta 1 \times \mu \text{ máx}^2$$

FH máx= Fuerza horizontal máxima sobre el ducto

Cmax= Coeficiente de forma para acciones horizontales

FV máx= Fuerza vertical máxima sobre el ducto

Kmax= Coeficiente de forma para acciones verticales

ρ = Peso específico del agua de mar

D=Diametro exterior de la tubería en m.

L= longitud de la tubería

β1 = Factor de corrección (1.05)

μ máx= Velocidad máxima del agua en el fondo marino inducida por oleaje expresada en (m/s)

Los valores obtenidos son valores máximos sobre los cuales no hay que aplicar factores de seguridad

Cmáx y K máx se determinan de la Figura N° 2

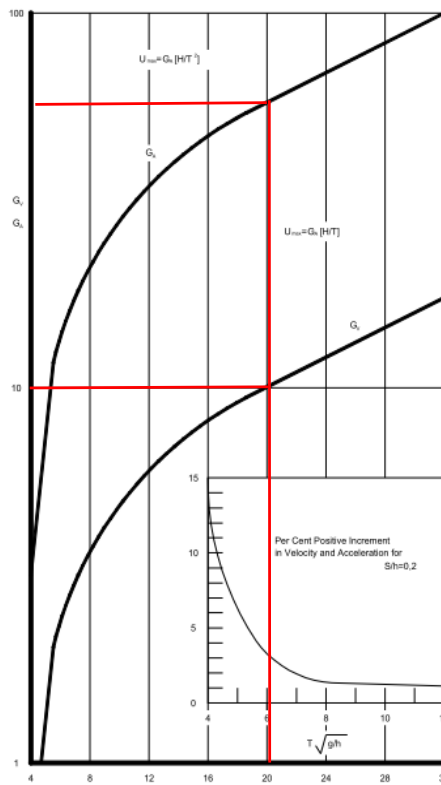


FIGURA N° 9
Velocidad y aceleración máxima del flujo de agua próximo al fondo marino según Teoría de AIRY

$\psi = (\mu \text{ máx})^2 / (a \text{ máx} \times D)$	26.86
Cmáx	1.00
Kmáx	1.00
β1	1.08

FH máx	989.52 N/m
FV máx	989.52 N/m

FH máx	100.87 Kg/m
FV máx	100.87 Kg/m

FUERZAS GRAVITATORIAS

Peso propio del ducto	75.34 Kg/m
Peso líquido interno en el ducto	24.82 Kg/m
Fuerza de empuje ascendente	60.99 Kg/m
Fuerza total (FG)	39.17 Kg/m

Coefficiente de fricción (μ)	0.70
Fza Res. al arrastre (FRA= FG x μ)	27.42 Kg/m

FRA < FH máx el ducto es inestable horizontalmente
FG < FV máx el ducto es inestable verticalmente

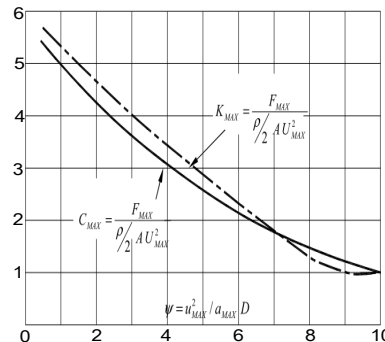


FIGURA N° 10
Fuerzas hidrodinámicas sobre ductos submarinos con frente de olas paralelas al tendido

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL DUCTO SEMI-ENTERRADO

FACTOR DE REDUCCION POR SUELO MARINO (NORMA DNV-RP-F109)

Considerando el ducto enterrado (ZP) un 50% de su diámetro, se tiene:

$$ZP / D = 0.500$$

$$\text{Factor por suelo permeable (RperZ)} = 0.700$$

Factor por penetración en lecho marino para efectos horizontales (Rpen Y)

$$Rpen Y = 1,0 - 1,4 \times (ZP / D) \text{ pero no menor de } 0,30 = 0.300$$

Factor por penetración en lecho marino para efectos verticales (Rpen Z)

$$Rpen z = 1,0 - 1,3 \times (ZP / D - 0,1) \text{ pero no menor de } 0,30 = 0.480$$

Factor de reducción Total para carga hidrodinámica horizontal (Rtotal Y)

$$Rtotal Y = Rpen Y = 0.300$$

Factor de reducción Total para carga hidrodinámica vertical (Rtotal z)

$$Rtotal z = RperZ \times Rpen Z = 0.336$$

FUERZA SOBRE EL DUCTO SEMI-ENTERRADO UN 50% DEL DIAMETRO

$$\text{Fuerza maxima horizontal (FMH)} = Rtotal Y \times FH = 30.26 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Fuerza maxima vertical (FMV)} = Rtotal z \times FV = 33.89 \text{ Kg/m}$$

FRA < FMH el ducto es inestable horizontalmente

FG > FMV, el ducto es estable verticalmente

En conclusión al cubrir el ducto con 20 cm de suelo marino se cumple la condición de estabilidad hidrodinamica.

Fuente: Propia

4.4.1.14.- Análisis de formación de vórtices en tramos suspendidos.

Cuando se forman tramos suspendidos en el tendido del ducto submarino, estos están sujetos a los flujos transversos del agua de mar debido a las corrientes y oleaje, y por tanto están expuestos a fenómenos de formación de vórtices. Estos fenómenos pueden causar oscilaciones en el ducto debido a los cambios de presión alternados por sobre y debajo del ducto lo que podría ocasionar el levantamiento del ducto de sus apoyos.

Grandes amplitudes producidas por la oscilación pueden ocurrir a menos que la frecuencia natural del tramo en oscilación sea lo suficientemente mayor que la frecuencia generada por el fenómeno de vórtice.

En el caso de los ductos en estudio, no se presentarán tramos en suspensión siendo más bien que se encontrará enterrado a lo largo de todo su tendido. Por esta razón no se analiza esta condición.

4.4.1.15.- Análisis estructural del ducto en tramos suspendidos.

Sobre el lecho marino no se dará esta condición debido a que el lecho marino es plano con una pendiente muy suave, y por otro lado el ducto estará íntegramente enterrado. Por esta razón no se analiza esta condición.

El análisis estructural se ha realizado para el caso de la prueba hidrostática de los ductos o varillones previamente al lanzamiento.

En este caso específico, el ducto sistema mixto 12" x 14" lleno de agua (prueba hidrostática) deberá estar soportado sobre apoyos distanciados a no más de 23,89 m entre sí.

Para el ducto de sistema mixto 6" x 8" lleno de agua deberá estar soportado sobre apoyos distanciados a 16,34 m como máximo, entre sí ver cálculos en la tabla 31 y tabla 32.

Tabla 31

Análisis estructural del ducto en tramos suspendidos en sistema mixto de 12 x 14 pulg

<u>ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL DUCTO EN TRAMOS SUSPENDIDOS</u>			
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION, Y MANTENIMIENTO OF TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE		
DUCTO A ANALIZAR:			
Ducto para el transporte de combustible Sistema Mixto de 12" x 14" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 12" y tubería externa de acero al carbono de 14")			
MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42		
Schedule	30	Espesor	0.375 pulg
Diá. Exterior	14 pulg		
Diá. Interior	13.25 pulg		
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado	127.87 Kg/m
Peso Total del Ducto	78,001 Kg		171,601.54 lbs
Ducto 14" sumergido lleno de agua para PH (condición off shore)			
Peso del agua Interior (PH)			-88.97 Kg/m
Peso del ducto submarino vacío			-127.87 Kg/m
Empuje por sumergencia en agua de mar			103.06 Kg/m
Peso del ducto submarino sumergido con la máxima carga			-113.78 Kg/m
Módulo de sección del ducto de acero (Z)			53.25 pulg ³ 0.87 m ³
SMYS del material del ducto AP\ 5 L Gr. B			42,000 Psi 29,555,459 Kg/m ²
Factor de disminución de resistencia			0.45
Esfuerzo Máximo de tensión considerado (σ)			25,200 Psi 17,733,275 Kg/m ²
Mu admisible, (tramo simplemente apoyado) = $\sigma \times Z$			1,341,940 lb-pulg 15,475 Kg-m
Luz máx. entre apoyos en el ducto sumergido $(8 \times Mu / W)^{1/2}$			32.99 m
Ducto 14" en tierra lleno de agua para PH (condición on shore)			
Peso del agua Interior (PH)			-88.97 Kg/m
Peso del ducto submarino vacío			-127.87 Kg/m
Empuje por sumergencia en agua de mar			0.00 Kg/m
Peso del ducto submarino sumergido con la máxima carga			-216.84 Kg/m
Módulo de sección del ducto de acero (Z)			53.25 pulg ³ 0.87 m ³
SMYS del material del ducto AP\ 5 L Gr. B			42,000 Psi 29,555,459 Kg/m ²
Factor de disminución de resistencia			0.45
Esfuerzo Máximo de tensión considerado (σ)			25,200 Psi 17,733,275 Kg/m ²
Mu admisible, (tramo simplemente apoyado) = $\sigma \times Z$			1,341,940 lb-pulg 15,475 Kg-m
Luz máx. entre apoyos en el ducto sumergido $(8 \times Mu / W)^{1/2}$			23.89 m

Fuente: Propia

Tabla 32

Análisis estructural del ducto en tramos suspendidos en sistema mixto de 6 x 8 pulg

<u>ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL DUCTO EN TRAMOS SUSPENDIDOS</u>			
Norma Aplicable	API RP 1111 DISEÑO, CONSTRUCCION, OPERACION, Y MANTENIMIENTO OF TUBERIAS DE HIDROCARBURO OFFSHORE		
DUCTO A ANALIZAR:			
Ducto de limpieza Sistema Mixto de 6" x 8" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 6 y tubería externa de acero al carbono de 8")			
MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42		
Schedule	30	Espesor 0.227 pulg	SMYS 42,000 psi
Diá. Exterior	8.625 pulg		
Diá. Interior	8.171 pulg		
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado	75.34 Kg/m
Peso Total del Ducto	45,957 Kg	101,106 lbs	
Ducto 8" sumergido lleno de agua para PH (condición off shore)			
Peso del agua Interior (PH)			-31.40 Kg/m
Peso del ducto submarino vacío			-75.34 Kg/m
Empuje por sumergencia en agua de mar			39.42 Kg/m
Peso del ducto submarino sumergido con la máxima carga			-67.32 Kg/m
Módulo de sección del ducto de acero (Z)			12.25 pulg ³ 0.20 m ³
SMYS del material del ducto AP 5 L Gr. 42			42,000 Psi 29,555,459 Kg/m ²
Factor de disminución de resistencia			0.45
Esfuerzo Máximo de tensión considerado (σ)			25,200 Psi 17,733,275 Kg/m ²
Mu admisible, (tramo simplemente apoyado) = σ x Z			308,747 lb-pulg 3,560 Kg-m
Luz máx. entre apoyos en el ducto sumergido (8 x Mu / W) ^1/2			20.57 m
Ducto 8" en tierra lleno de agua para PH (condición on shore)			
Peso del agua Interior (PH)			-31.40 Kg/m
Peso del ducto submarino vacío			-75.34 Kg/m
Empuje por sumergencia en agua de mar			0.00 Kg/m
Peso del ducto submarino sumergido con la máxima carga			-106.74 Kg/m
Módulo de sección del ducto de acero (Z)			12.25 pulg ³ 0.20 m ³
SMYS del material del ducto AP 5 L Gr. 42			42,000 Psi 29,555,459 Kg/m ²
Factor de disminución de resistencia			0.45
Esfuerzo Máximo de tensión considerado (σ)			25,200 Psi 17,733,275 Kg/m ²
Mu admisible, (tramo simplemente apoyado) = σ x Z			308,747 lb-pulg 3,560 Kg-m
Luz máx. entre apoyos en el ducto sumergido (8 x Mu / W) ^1/2			16.34 m

Fuente: Propia

4.4.1.16.- Control de propagación de fracturas dúctiles.

Se analiza si el material de la tubería supera o no el control de fractura de acuerdo a los requerimientos de la Norma API 5L, del ensayo de impacto de Charpy cuyo mínimo valor corresponde a la expresión:

$$KV = 0,0179 * (\sigma h)^{1,5} + (D/2)^{0,5} \quad (\text{Fórmula G1 API 5L PSL2}) \dots\dots[\text{Ecuación 45}]$$

Donde:

KV = Mínimo valor de energía absorbido, (lbf-pie).

$\sigma h:F \times SMYS$ = Esfuerzo de diseño circunferencial (ksi)..... [Ecuación 46]

SMYS = 42 000 psi (GrX42)

D = Diámetro exterior de la tubería (pulg)

F = Factor de esfuerzo (0,72)

El valor determinado de KV deberá ser inferior a 30 lb -pie, según tabla G.2 del API 5L.

- Resultados: De acuerdo a los cálculos que hemos realizado y plasmados en la tabla 33 utilizando la ecuación 45 al 46. Se determina que la energía absorbida por la tubería de 14" es de 5 622 lbf-pie < 30 lbf-pie, mientras que para el ducto de tubería de 8" es de 5 053 lbf-pie < 30 lbf-pie. Por lo tanto, cumplen con el requerimiento de control de propagación de fracturas dúctiles.

Tabla 33

Control de propagación de fracturas dúctiles para sistema mixto de 12 x 14 pulg y 6 x 8 pulg

CONTROL DE PROPAGACIÓN DE FRACTURAS DUCTILES					
Norma Aplicable	API 5L ANEXO G				
DUCTO A ANALIZAR:					
Ducto para el transporte de combustible Sistema Mixto de 12" x 14" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 12" y tubería externa de acero al carbono de 14")					
MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-42					
Schedule	30	Espesor	0.375 pulg	SMYS	42,000.00 psi
Diá. Nominal	14 pulg				
Diá. Exterior	14 pulg				
Diá. Interior	13.25 pulg				
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado			127.87 Kg/m
Peso Total del Ducto	78,001 Kg		171,602 lbs		
MÍNIMO VALOR DE ENERGÍA ABSORBIDA POR EL DUCTO					
$K_v = 0,0179 * (\sigma_h)^{1.5} + (D/2)^{0.5}$			$\sigma_h = F * SMYS$		
Donde:					
Kv =	Mínimo valor de energía absorbido		5.622 ft-lb		
σh =	Esfuerzo de diseño circunferencial		30.2 Ksi		
D=	Diámetro exterior de la tubería		14 pulg		
F=	Factor de esfuerzo		0.72		
SYM:	Esfuerzo de fluencia mínimo especificado		42 Ksi		
COMPARACIÓN					
DE ACUERDO A LA TABLA G.2 DE LA NORMA API 5L EL VALOR DE ENERGÍA ABSORBIDA MÍNIMA PARA UN FACTOR DE ESFUERZO DE 0,72 PARA MATERIALES GRADO X42 DE 14 IN DE DIÁMETRO, ES DE 30 LB-FT. SE DEBE CUMPLIR QUE:					
$K_v =$	5.622	LB-FT	≤	30	LB-FT
CONCLUSIÓN					
YA QUE EL MÍNIMO VALOR DE ENERGÍA ABSORBIDA POR LA TUBERÍA Kv ES MENOR DE 30 LB-FT, EL DUCTO CUMPLE CON EL REQUERIMIENTO DE CONTROL DE PROPAGACIÓN DE FRACTURAS DÚCTILES.					

CONTROL DE PROPAGACIÓN DE FRACTURAS DUCTILES					
Norma Aplicable	API 5L ANEXO G				
DUCTO A ANALIZAR:					
Ducto para el transporte de combustible sistema mixto de 6" x 8" (Tubería interna de Fibra de Vidrio de 6" y tubería externa de acero al carbono de 8")					
MATERIAL: ACERO AL CARBONO API 5L X-42					
Schedule	30	Espesor	0.375 pulg	SMYS	42,000.00 psi
Diá. Nominal	8 pulg				
Diá. Exterior	8.625 pulg				
Diá. Interior	7.875 pulg				
Longitud de Tubería	610 m	Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado			75.34 Kg/m
Peso Total del Ducto	45,957 Kg		101,106 lbs		
MÍNIMO VALOR DE ENERGÍA ABSORBIDA POR EL DUCTO					
$K_v = 0,0179 * (\sigma_h)^{1.5} + (D/2)^{0.5}$			$\sigma_h = F * SMYS$		
Donde:					
Kv =	Mínimo valor de energía absorbido		5.053 ft-lb		
σh =	Esfuerzo de diseño circunferencial		30.2 Ksi		
D=	Diámetro exterior de la tubería		8.625 pulg		
F=	Factor de esfuerzo		0.72		
SYM:	Esfuerzo de fluencia mínimo especificado		42 Ksi		
COMPARACIÓN					
DE ACUERDO A LA TABLA G.2 DE LA NORMA API 5L EL VALOR DE ENERGÍA ABSORBIDA MÍNIMA PARA UN FACTOR DE ESFUERZO DE 0,72 PARA MATERIALES GRADO X42 DE 14 IN DE DIÁMETRO, ES DE 30 LB-FT. SE DEBE CUMPLIR QUE:					
$K_v =$	5.053	LB-FT	≤	30	LB-FT
CONCLUSIÓN					
YA QUE EL MÍNIMO VALOR DE ENERGÍA ABSORBIDA POR LA TUBERÍA Kv ES MENOR DE 30 LB-FT, EL DUCTO CUMPLE CON EL REQUERIMIENTO DE CONTROL DE PROPAGACIÓN DE FRACTURAS DÚCTILES.					

Fuente: Propia

4.4.1.17.- Verificación de radios mínimos de giro para la tubería interior y su envolvente.

Para que no colapse la tubería interior de resina reforzada con fibra de vidrio del sistema mixto de tuberías, el radio de giro de ésta debe ser menor al radio de giro de la tubería envolvente de acero.

tubería de acero API 5L Gr. X42 PSL2.

Para determinar la flexión máxima de la tubería de acero, se determina el radio mínimo de curvatura por medio de la siguiente ecuación basada en el manual “Pipeline Rules of Thumb Handbook 8va edición”.

$$R_{ba} = (3 * E * D_o) / (4 * S) \dots\dots\dots [Ecuación 47]$$

Donde:

R_{ba} = Radio de giro de tuberías de acero en metros

E = módulo de elasticidad = 30 000 psi

D_o = diámetro externo de la tubería

U = esfuerzo de ruptura del material = 60 000 psi (Gr.X42)

SMYS = máximo esfuerzo de fluencia del material = 42 000 psi (Gr.X42)

S = esfuerzo de fluencia seleccionado (mínimo entre 0,5*U y 0,75*SMYS)

Para determinar la flexión máxima de la tubería de FRP, se determina el radio mínimo de curvatura seleccionando el valor de la tabla II-n-1 de “Wavistrong Engineering Guide”.

$$R_{bf} = (0,00050 * R_e * E_x * D_i) / S_a \dots\dots\dots [Ecuación 48]$$

$$S_a = S_{xt} - S_x \dots\dots\dots [Ecuación 49]$$

$$S_x = (P/4) * (D_i / T_e + 1) \dots\dots\dots [Ecuación 50]$$

Donde:

Rbf = Radio de giro de la tubería de vidrio, (m)

Re = Factor de corrección por temperatura (tabla II-h, para 20 °C de WEG).

Ex = Módulo de curvatura axial, (N/mm²) (tabla II-g de WEG)

Di = Diámetro interno de tuberías, (mm)

Sx = Esfuerzo axial aplicado debido a presiones internas, (N/mm²)

Sxt = Esfuerzo axial admisible para R: 0,50 en (N/mm²) (tabla II-m de WEG).

Te = Espesor de pared reforzado, (mm)

- Resultados: De acuerdo a los cálculos que hemos realizado en la ecuación 47 al 50 para la tubería de transporte de combustible y los damos a conocer en la tabla 34, se resume lo siguiente:

- La tubería interior FRP de 300 mm (12") de diámetro nominal y 4,6 mm de espesor tiene un radio mínimo de giro de 91,2 m.
- La tubería exterior de acero de 350 mm (14") de diámetro nominal y 9,5 mm (0,375") de espesor tiene un radio mínimo de giro de 178 m.

Para la tubería de limpieza en la tabla 35, se resume lo siguiente:

- La tubería interior FRP de 150 mm (6") de diámetro nominal y 2,4 mm de espesor tiene un radio mínimo de giro de 35,9 m.
- La tubería exterior de acero de 200 mm (8") de diámetro nominal y 7,04 mm de espesor tiene un radio mínimo de giro de 109,54 m.

De acuerdo a estos resultados, las tuberías de FRP de 300 mm (12") y 150 mm (6") de diámetro nominal cumplen con la condición de radio de giro de la tubería interior menor que el radio de giro de la tubería envolvente o externa.

Tabla 34

Verificación de radios de giro para la tubería de acero al carbono de 14 pulg y de FRP de 12 pulg

VERIFICACIÓN DE RADIO DE GIRO DE LAS TUBERÍAS DE ACERO 14" Y DE FRP 12"

DUCTO A ANALIZAR:

TUBERÍA DE ACERO AL CARBONO

MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42 (Tubería envolvente)				
Schedule	30	Espesor	0.375 pulg	SMYS	42,000 psi
Diá. Nominal	14 pulg				
Diá. Exterior	14 pulg		9.525 mm		
Diá. Interior	13 pulg				
Longitud de Tubería	610 m		Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado		127.8 Kg/m
Peso Total del Ducto	77,958 Kg		171,507.60 lbs		

E =	MÓDULO ELÁSTICO	30,000,000 psi
Do =	DIÁMETRO EXTERNO DE LA TUBERÍA	14.000 in
U =	ESFUERZO DE RUPTURA DEL MATERIAL	60,000 psi
SMYS =	MÁXIMO ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO DEL MATERIAL	42,000 psi
S =	ESFUERZO DE FLUENCIA SELECCIONADO (MÍNIMO ENTRE 0,5*U Y 0,75*SMYS)	30,000 psi

FORMULA DE RADIO DE GIRO PARA TUBERIA DE ACERO AL CARBONO

$$R_{ba} = (E * Do) / (2 * S)$$

Donde:

R _{ba} =	Radio de Giro de la Tubería de acero	177.80 m	7,000 in
-------------------	--------------------------------------	----------	----------

TUBERÍA INTERNA DE RESINA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO (FRP)

MATERIAL	RESINA EPOXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO 300 mm (12") EST 16		
Ψ	ANGULO DE LA FIBRA (TUBERÍA EST 16)	55 °	
OD	DIÁMETRO EXTERIOR DEL DUCTO,	309.2 mm	12.17 pulg
Di =	DIÁMETRO INTERNO DEL DUCTO,	300 mm	11.81 pulg
SH	ESFUERZO HIDROSTÁTICO (HYDROSTATIC DESIGN STRESS, HDS)	63 N/mm ²	9,137.39 psi
T _e =	Espesor de pared reforzado	3.8 mm (Tabla II -b.1)	
P =	Presión de Operación	165 psig	1.14 Mpa
W =	PESO DE LA TUBERÍA	11.0 Kg/m	
WEG =	WAVISTRONG ENGINEERING GUIDE		

$$R_{bf} = (0,0005 * R_e * E_x * Di) / Sa \qquad Sa = S_{xt} - S_x \qquad S_x = (P / 4) * (Di / Te + 1)$$

Donde:

R _{bf} =	Radio de giro de la tubería de fibra de vidrio	91.24 m
R _e =	FACTOR DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA (Tabla II-h, para 20°C de WEG)	1.00
E _x =	MODULO DE CURVATURA AXIAL (Tabla II-g de WEG)	10,500.00 N/mm ²
D _i =	DIÁMETRO INTERNO DE LA TUBERÍA	300.00 mm
S _a =	ESFUERZO AXIAL REMANENTE	17.26 N/mm ²
S _x =	Esfuerzo Axial Aplicado debido a Presiones internas	22.74 N/mm ²
S _{xt} =	Esfuerzo axial admisible para R: 0.50	40.00 N/mm ²
		TABLA II-m en WEG

R _{ba} =	177.80 m
-------------------	----------

R _{bf} =	91.2 m
-------------------	--------

CONCLUSIÓN

EL RADIO DE CURVATURA ELÁSTICA DEL DUCTO DE ACERO ES MAYOR QUE EL RADIO DE CURVATURA DEL TUBO DE RESINA REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO, DE MANERA QUE AL APLICAR EL RADIO DE GIRO DEL ACERO, EL TUBO DE FRP ESTARÁ DENTRO DE SUS LÍMITES DE ACEPTABILIDAD.

Fuente: Propia

Tabla 35

Verificación de radios de giro para la tubería de acero al carbono de 8 pulg y de FRP de 6 pulg

VERIFICACIÓN DE RADIO DE GIRO DE LAS TUBERÍAS DE ACERO 8" Y DE FRP 6"					
DUCTO A ANALIZAR:					
TUBERÍA DE ACERO AL CARBONO					
MATERIAL:	ACERO AL CARBONO API 5L X-42 (Tubería envolvente)				
Schedule	30	Espesor	0.277 pulg	SMYS	42,000 psi
Diá. Nominal	8 pulg		7.0358 mm		
Diá. Exterior	8.625 pulg				
Diá. Interior	8.071 pulg				
Longitud de Tubería	610 m		Peso de la Tubería Sistema Mixto Estimado		75.34 Kg/m
Peso Total del Ducto	45,957.40 Kg		101,106.28 lbs		
E =	MÓDULO ELÁSTICO				30,000,000 psi
Do =	DIÁMETRO EXTERNO DE LA TUBERÍA				8.63 in
U =	ESFUERZO DE RUPTURA DEL MATERIAL				60,000 psi
SMYS =	MÁXIMO ESFUERZO DE FLUENCIA ESPECIFICADO DEL MATERIAL				42,000 psi
S =	ESFUERZO DE FLUENCIA SELECCIONADO (MÍNIMO ENTRE 0,5*U Y 0,75*SMYS)				30,000 psi
FORMULA DE RADIO DE GIRO PARA TUBERIA DE ACERO AL CARBONO					
$R_{ba} = (E * Do) / (2 * S)$					
Donde:					
R _{ba} =	Radio de Giro de la Tubería de acero		109.54 m		4,312.50 in
TUBERÍA INTERNA DE RESINA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO (FRP)					
MATERIAL	RESINA EPOXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO 150 mm (6") EST 16				
Ψ	ANGULO DE LA FIBRA (TUBERÍA EST 16)				55 °
OD	DIAMETRO EXTERIOR DEL DUCTO,				156.4 mm 6.16 pulg
Di =	DIÁMETRO INTERNO DEL DUCTO,				150 mm 5.91 pulg
SH	ESFUERZO HIDROSTÁTICO (HYDROSTATIC DESIGN STRESS, HDS)				63 N/mm ² 9,137.39 psi
T _e =	Espesor de pared reforzado				2.4 mm (Tabla II -b.1 de WEG)
P =	Presión de Operación				165 psig 1.14 Mpa
W =	PESO DE LA TUBERÍA				4.0 Kg/m
WEG =	WAVISTRONG ENGINEERING GUIDE				
$R_{bf} = (0,0005 * Re * Ex * Di) / Sa$		$Sa = Sxt - Sx$		$Sx = (P / 4) * (Di / Te + 1)$	
Donde:					
R _{bf} =	Radio de giro de la tubería de fibra de vidrio				35.89 m
R _e =	FACTOR DE CORRECCION POR TEMPERATURA (Tabla II-h, para 20°C de WEG)				1.00
E _a =	MODULO DE CURVATURA AXIAL (Tabla II-g de WEG)				10,500 N/mm ²
D _i =	DIÁMETRO INTERNO DE LA TUBERÍA				150.00 mm
S _a =	ESFUERZO AXIAL REMANENTE				21.94 N/mm ²
S _x =	Esfuerzo Axial Aplicado debido a Presiones internas				18.06 N/mm ²
S _{xt} =	Esfuerzo axial admisible para R: 0.50 TABLA II-m en WEG				40.00 N/mm ²
R _{ba} =	109.54 m				
R _{bf} =	35.9 m				
CONCLUSIÓN					
EL RADIO DE CURVATURA ELÁSTICA DEL DUCTO DE ACERO ES MAYOR QUE EL RADIO DE CURVATURA DEL TUBO DE RESINA REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO, DE MANERA QUE AL APLICAR EL RADIO DE GIRO DEL ACERO, EL TUBO DE FRP ESTARÁ DENTRO DE SUS LÍMITES DE ACEPTABILIDAD.					

Fuente: Propia

4.4.1.18.- Flotación para el sistema mixto de tuberías.

Para el cálculo de la flotabilidad de las tuberías del sistema mixto se realizará de acuerdo se aplicará el Principio de Arquímedes, un cuerpo que se encuentre en un fluido, ya sea flotando o sumergido, es empujado hacia arriba por una fuerza igual

al peso del fluido desplazado. La fuerza boyante (flotante) actúa verticalmente hacia arriba a través del centroide del volumen desplazado. Se calculará con la siguiente expresión:

$$B = \gamma * Vd \dots\dots\dots [Ecuación 51]$$

Donde:

B = Fuerza boyante (flotante), (kg)

γ = Peso específico del fluido, (kg/m³)

Vd = Volumen desplazado del fluido, (m³)

W = Peso del objeto sólido (kg)

Si:

B > W = La tubería del sistema mixto flota

B = W = La tubería del sistema mixto está en equilibrio

B < W = La tubería del sistema mixto no flota

- Resultados: De acuerdo a los cálculos que hemos desarrollado y mostrados en la tabla 36 y tabla 37 utilizando la ecuación 51, el ducto submarino del sistema mixto de 12" x 14" flota; sin embargo, el ducto submarino del sistema mixto de 6" x 8", necesita la colocación de 20 flotadores tipo barriles (cilindros), para que pueda flotar y ser posicionado en la zona marítima para el abastecimiento de buques.

Tabla 36

Cálculo de flotabilidad de la tubería del sistema mixto de 6" x 8"

CALCULO DE FLOTABILIDAD DE LA TUBERÍA DE SISTEMA MIXTO 6" X 8"			
DATOS DE ENTRADA		Sist. Inglés	Sist. Métrico
Diametro exterior	D	8.63 in	0.22 m
Diametro interior	d	7.98 in	0.20 m
Peso de tubería acero	Wa	28.55 lb/ft	42.49 Kg/m
Diámetro tubería FRP	Dfrp	6.21 in	0.16 m
Peso de la tubería de FRP	Wfrp	2.70 lb/ft	4.02 Kg/m
Peso específico agua de mar	γa	64.11 lb/ft³	1,026.95 Kg/m³
Peso específico concreto	γg	0.00 lb/ft³	0.00 Kg/m³
Espesor del revestimiento	r	0.09 in	0.002 m
Longitud tubería	L	2,001.31 ft	610.00 m
PESO DEL GROUT : Por proceso constructivo el grout se colocará después de lanzamiento de la tubería, por lo tanto no se considerará en el cálculo.			
		$Wg = \gamma g * PI/4 * (d^2 - Dfrp^2) * L$	
		Wg	0.00 lb 0.00 Kg
PESO DE LA TUBERÍA DE ACERO + PESO DEL GROUT + PESO DE LA TUBERÍA DE FRP			
		WT= Wt + Wg+Wfrp	62,541.01 lb 28,368.12 Kg
FUERZA BOYANTE (Flotabilidad)			
		$B = \gamma a * PI/4 * D^2 * L$	B 54,169.96 lb 24,593.16 Kg
Para que la tubería flote		$B < Wa+Wg+Wfrp$ NO FLOTA Se necesita colocar flotadores	Flota Si $B > Wa+Wg+Wfrp$ Equilibrio Si $B = Wa+Wg+Wfrp$ NO Flota Si $B < Wa+Wg+Wfrp$
FLOTADORES			
Volumen de Cilindro	ft3	9.26 ft3	0.26 m3
Peso cilindro de acero	Lb	132.30 lb	60 Kg
Diámetro cilindro	Dc	1.9352 ft	0.59 m
Largo Cilindro	Lc	3.1488 ft	0.96 m
Cantidad de cilindros	N	20	20
PESO DE LA TUBERÍA DE ACERO + PESO DEL GROUT + PESO DE LA TUBERÍA DE FRP+ PESO DE LOS CILINDROS			
		WT= Wt + Wg+Wfrp+Wc	65,187.01 lb 29,568.12 Kg
FUERZA BOYANTE (Flotabilidad)			
		$B = \gamma a * PI/4 * D^2 * L$	B 66,045.20 lb 29,984.52 Kg
Para que la tubería flote		$B > Wa+Wg+Wfrp+Wc$ FLOTA ok.	Flota Si $B > Wa+Wg+Wfrp+Wc$ Equilibrio Si $B = Wa+Wg+Wfrp+Wc$ NO Flota Si $B < Wa+Wg+Wfrp+Wc$
Conclusión: Se necesita colocar 20 flotadores tipo cilindros para que la tubería flote del sistema mixto de 6" x 8".			

Fuente: Propia

Tabla 37

Cálculo de flotabilidad de la tubería del sistema mixto de 12" x 14"

CALCULO DE FLOTABILIDAD DE LA TUBERIA DE SISTEMA MIXTO 12" X 14"			
DATOS DE ENTRADA		Sist. Inglés	Sist. Métrico
Diametro exterior	D	14.00 in	0.36 m
Diametro interior	d	13.25 in	0.34 m
Peso de tubería acero	Wa	54.57 lb/ft	81.21 Kg/m
Diámetro tubería FRP	Dfrp	11.81 in	0.30 m
Peso de la tubería de FRP	Wfrp	7.10 lb/ft	10.57 Kg/m
Peso específico agua de mar	γa	64.11 lb/ft³	1,026.95 Kg/m³
Peso específico concreto	γg	0.00 lb/ft³	0.00 Kg/m³
Espesor del revestimiento	in	0.09 in	0.002 m
Longitud tubería	L	2,001.31 ft	610.00 m
PESO DEL GROUT : Por proceso constructivo el grout se colocará después de lanzamiento de la tubería, por lo tanto no se considerará en el cálculo.			
		$Wg = \gamma g * PI/4 * (d^2 - Dfrp^2)$	
		0.00 lb	0.00 Kg
PESO DE LA TUBERÍA DE ACERO + PESO DEL GROUT + PESO DE LA TUBERÍA DE FRP			
		$WT = Wt + Wg + Wfrp$	
		123,420.93 lb	55,982.77 Kg
FUERZA BOYANTE (Flotabilidad)			
		$B = \gamma a * PI/4 * D^2 * L$	
	B	140,574.20 lb	63,820.68 Kg
Para que la tubería flote	$B > Wa + Wg + Wfrp$		
	FLOTA		
		Flota Si $B > Wa + Wg + Wfrp$ Equilibrio Si $B = Wa + Wg + Wfrp$ NO Flota Si $B < Wa + Wg + Wfrp$	
Conclusión: La tubería del sistema mixto de 12" x 14" flota.			

Fuente: Propia

Los cálculos para el análisis de integridad de la tubería del sistema mixto planteado, cumplen con los parámetros de diseño estipulados en las Normas ASME B31.4, API RP 1111 y API 5L. En la tabla 38 se detalla el resumen del sistema mixto y en el apéndice K y L, donde mostramos el plano típico en planta e isométricos de un sistema mixto de tuberías on-shore y off-shore. En el apéndice M, se muestra el diagrama de conexión actual con sistema de abastecimiento de altamar y descarga en planta y el apéndice N, se muestra el diagrama de conexión propuesto con el sistema mixto.

Tabla 38*Reemplazo de tuberías de acero al carbono por un sistema mixto en Consorcio Terminales*

Reemplazo de tuberías de acero al carbono por un sistema mixto en Consorcio Terminales.	
Línea Submarina	Nueva línea Submarina con Sistema Mixto
12" (300 mm) SCH 30.	<p>Sistema mixto de 12" x 14" de 610 m de longitud</p> <p>Pared exterior de acero al carbono API 5L Gr x 42 PSL2 de diámetro 14" (350 mm), SCH 30 de 9.5 mm de espesor, sin costura. Recubierta exteriormente con sistema tricapa (3LPE) de polietileno de alta densidad de 2,2 mm de espesor.</p> <p>Pared interior de Fibra de vidrio Wavistrong EST 16 de diámetro 12" (300 mm), 4.6 mm de espesor. Lechada de cemento entre la tubería de acero y fibra de vidrio.</p>
6" (150 mm) SCH 30.	<p>Sistema Mixto de 8" x 6" de 610 m de longitud</p> <p>Pared exterior de acero al carbono API 5L Gr x 42 PSL2 de diámetro 8" (200 mm), SCH30 de 7.0 mm de espesor, sin costura. Recubierta exteriormente con sistema tricapa (3LPE) de polietileno de alta densidad de 2,2 mm de espesor.</p> <p>Pared interior de Fibra de vidrio Wavistrong EST 16 de diámetro 6" (150 mm), 3.2 mm de espesor. Lechada de cemento entre la tubería de acero y fibra de vidrio.</p>

Fuente: Propia

4.5.- Disciplina civil

Los requerimientos para el desarrollo del proyecto de la disciplina civil contemplan los siguientes diseños:

- Líneas submarinas de 14 X 12" (300 mm) y 8 X 6" (150 mm).
 - Soportes metálicos de tuberías típicas en lado tierra y mar.
 - Soportes submarinos de concreto.
- Características de los materiales
 - Los materiales a utilizar cumplirán con los requerimientos mínimos de los códigos y estándares descritos a continuación en la tabla 39.

Tabla 39

Requerimientos mínimos y estándares de materiales

Concreto de cementación para la tubería del sistema mixto	$f'c = 15 \text{ kg/cm}^2$.(Resistencia mínima)
Concreto para soportes submarinos y contrapesos de tuberías.	$f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.
Pernos de anclaje:	ASTM A-307- Esfuerzo al corte 700 kg/cm^2 .
Acero de refuerzo	ASTM A-615Gr, $Fy = 4,200 \text{ kg/cm}^2$.
Acero estructural (Perfiles, planchas)	A-36, $Fy = 2.530 \text{ Kg/cm}^2$.
Soldadura	E-70XX, Norma AWS D1.1, Metal base ASTM A36.
Grout	Con resistencia mínima 700 kg/cm^2 , a los 28 días.
Cemento:	Portland ASTM C150 Tipo V.
Electrodos	Norma AWS 5.1.

Fuente: McCormac y Csernak, 2012

4.5.1.- Datos del sitio

Para efectos del diseño se considerarán las condiciones ambientales y meteorológicas del sitio, indicadas:

- Suelo

Resistencia admisible: $1,00 \text{ kg/cm}^2$

Peso específico: $1\ 800 \text{ kg/m}^3$

- Sismo

Para las condiciones sísmicas del sitio, nos basamos en la Norma E 030 (sismo resistente), la cual nos indica que la fuerza cortante se determina con la siguiente ecuación.

$$V = \frac{ZUCS}{R} W \dots\dots\dots [Ecuación 52]$$

Donde:

Cortante sísmica horizontal	$V =$ (kg o ton)
Factor de zona sísmica (4)	$Z = 0,45$
Coefficiente de uso e importancia	$U = 1,5$
Factor de suelo	$S3 = 1,10$
Factor de amplificación sísmica	$C = 2,5$
Coefficiente de reducción	$R = 6$
Vida útil de la instalación:	25 años
Peso	W (kg o ton).

▪ Viento

Las cargas de viento serán calculadas de acuerdo a la Norma N.T.E E.020 (cargas), basado en las siguientes formulas y considerando los siguientes parámetros:

$$V_h = v(h/10)^{0,22} \dots\dots\dots [Ecuación 53]$$

Donde:

V_h : Es la velocidad de diseño en la altura (h) en (km/h)

v = Es la velocidad de diseño hasta (10 m) de altura (h) en (km/h)

h = Es la altura sobre el terreno, (m)

La carga exterior de viento (presión o succión), se calcula con la siguiente expresión.

$$Ph = 0,005 C V_h^2 \dots\dots\dots [Ecuación 54]$$

Donde:

Ph = Presión o succión del viento a una altura (h) en (kg/m²)

C = Factor de forma e importancia

Los parámetros de sitio para el diseño del viento son:

Velocidad de diseño 33,5 m/s

Velocidad básica 27,8 m/s

Factor de importancia eólica $C = 1,00$

4.5.2.- Combinaciones de carga

- El diseño estructural de los soportes de tuberías se realizará por resistencia basado en factores de carga LRFD.
- Las conexiones se diseñaron por lo especificado en las Normas del AISC /LRFD manual “Of Steel Construction – Allowable Stress Design” y las combinaciones de carga que se aplican para el método del LRFD son:

(1) 1,4 D

(2) $1,2 D + 1,6 L + (0,5 L \text{ o } 0,8 W)$

(3) $1,2 D \pm 1,0 E + 0,5 L + 0,2 S$

(4) $0,9 D \pm (1,3W \text{ o } 1,0 E)$

Donde:

D = Carga muerta.

L = Carga viva.

E = Carga de sismo.

W = Carga de viento

S = Carga de nieve

4.5.3.- Estructura de acero para soportes de tuberías del sistema mixto

Las estructuras de soporte metálico del sistema de tuberías mixto, deberán ser diseñadas de acuerdo a la Norma N.T.E E090 estructuras metálicas y con acero estructural ASTM A 36; por consiguiente, es necesario entender cómo controlar

los esfuerzos que se generan al soporte estructural frente a esfuerzo de compresión, flexión, corte, entre otros.

A continuación, se detallarán las ecuaciones que validan el diseño de miembros con el método de LRFD, que se utilizarán para el diseño de soportes

4.5.3.1.- Diseño de elementos a compresión.

Son elementos que reciben esfuerzos axiales capaces de comprimirlos. Sin embargo, en el acero se producen tres tipos de falla asociados a la compresión los cuales se describe a continuación:

- Pandeo flexionante: Conocido como pandeo de Euler, se produce cuando el elemento en flexión llega a la inestabilidad.
- Pandeo local : Se origina en ciertas partes de la columna que sean delgadas, lo cual hace que se pandea lateralmente en compresión antes de producirse algún otro tipo de pandeo; por lo tanto, se puede prevenir la estructura por pandeo, controlando la relación ancho espesor de la sección transversal.
- Pandeo flexo torsionante: Se produce en columnas que fallen principalmente por flexión o por combinación de torsión. La columna mientras sea más larga tiene la probabilidad de pandearse; por lo tanto, es necesario comprobar la relación de esbeltez del elemento a diseñar.

Para que la columna llegue al pandeo elástico se considera la fórmula de Euler.

$$P = \frac{\pi^2 E I}{L^2} \dots\dots\dots [Ecuación 55]$$

Considerando la relación de esbeltez se representará como $r = (I/A)^{1/2}$, sustituyendo en la ecuación 55, se tiene la siguiente expresión.

$$\frac{P}{A} = F_e = \frac{\pi^2 E I}{(L/r)^2} \dots\dots\dots [Ecuación 56]$$

Donde:

P = Peso de la columna.

a = Área de la columna.

E = Módulo de elasticidad.

L = Longitud de la columna

r = Radio de giro

F_e = Esfuerzo de pandeo crítico elástico.

Otro factor a considerar es la restricción en los extremos de la columna o soporte y para determinar la longitud efectiva (KL), se muestra en la siguiente figura 11 como determinar el factor de longitud efectiva (K).

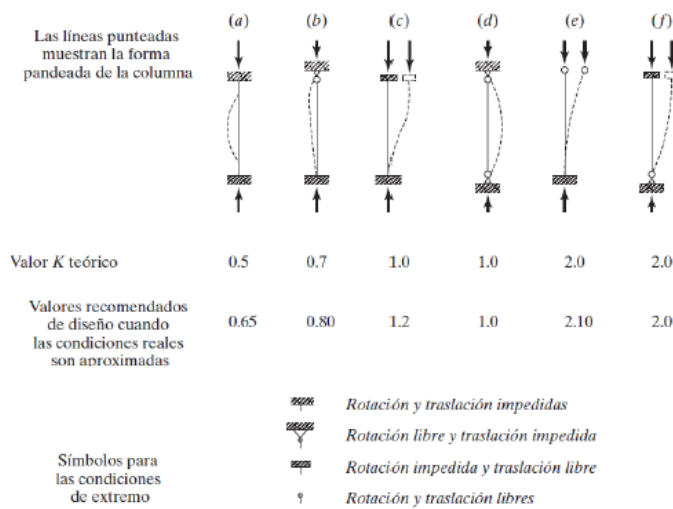


Figura 11. Valores para determinar el factor de longitud efectiva.

Fuente: McCormac y Csernak, 2012

Por otra parte, las columnas que están sujetas a fuerzas de compresión axial se debe verificar la relación de esbeltez, ancho-espesor, de manera que el elemento se flexione. A continuación, en la tabla 40 se detalla los casos que aplican para perfiles laminados tipo W.

Tabla 40

Relación ancho-espesor para elementos sometidos a compresión

Descripción del elemento	Razón ancho-espesor (λ)	Relación límite ancho-espesor λ_r (no esbelto/esbelto)
Patines de perfiles laminados tipo W, lados salientes de pares de ángulos conectados con contacto continuo, patines tipo canal y tes	b/t	$0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Almas de perfiles W y canales doblemente simétricos	h/t _w	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
HSS redondo	D/t	$0,11 \frac{E}{F_y}$

Fuente: McCormac y Csernak, 2012

Donde:

b = Ancho efectivo del ala

t = Espesor del ala

t_w = Ancho del alma

h = peralte del alma

Para diseños elementos a compresión se debe de considerar lo siguiente:

$$\Phi_c P_n = \Phi_c F_{cr} A_g \dots\dots\dots [Ecuación 57]$$

Se debe considerar $\Phi_c = 0,90$

Donde:

P_n = Resistencia nominal a la compresión

F_{cr} =Esfuerzo de pandeo a la flexión

A_g = Área de sección transversal

F_e = Esfuerzo de pandeo crítico elástico

El valor de pandeo de flexión se determina mediante las siguientes condiciones:

Si:

$$\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ o } \left(\frac{F_y}{F_e}\right) \geq 2.25 \quad F_{cr} = 0.877F_e \quad \dots\dots\dots [\text{Ecuación 58}]$$

$$\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ o } \left(\frac{F_y}{F_e}\right) \leq 2.25 \quad F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e}\right] F_y \quad \dots\dots[\text{Ecuación 59}]$$

Considerar K = 1.00

Para la condición de esfuerzo de compresión último:

$$P_u < \Phi_c P_n$$

4.5.3.2.- Diseño de elementos por esfuerzo cortante.

Un elemento al flexionarse se presentan los esfuerzos cortantes producto del cambio de longitud en sus fibras longitudinales. Dentro del momento positivo, las fibras inferiores se alargan y las superiores se acortan, siendo la zona intermedia neutra al cambio de longitud.

Para determinar la resistencia nominal al cortante de un elemento en el alma se utiliza la siguiente expresión.

$$V_n = 0,6 F_y A_w C_v \quad \dots\dots\dots [\text{Ecuación 60}]$$

$$\text{Para: } \frac{h}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \quad C_v = 1.0 \quad \dots\dots\dots [\text{Ecuación 61}]$$

$$1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \quad C_v = \frac{1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}}{h/t_w} \quad \dots\dots\dots [\text{Ecuación 62}]$$

$$\frac{h}{t_w} > 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \quad C_v = \frac{1.51 E k_v}{(h/t_w)^2 F_y} \quad \dots\dots\dots [\text{Ecuación 63}]$$

Donde:

V_n = Esfuerzo cortante nominal.

C_v = Coeficiente de cortante del alma.

A_w = Área del alma

h = Distancia libre entre las puntas del filete del alma ($h=d-k_{des}$)

d = Peralte de la sección transversal

t_w = espesor del alma

k = Espesor del ala más el filete del alma

k_v = Coeficiente de pandeo por cortante de la placa del alma, Si $h/t_w < 260$, $k_v=5$

Para la condición de esfuerzo cortante último:

$$V_u < \Phi_c V_n$$

Se debe considerar $\Phi_c = 1,00$

4.5.3.3.- Diseño de elementos por esfuerzo a flexión.

Para los elementos flexión de secciones compactas se empezará definiendo el momento plástico M_p y el momento nominal de la sección M_n . El primero define el límite del estado de los elementos, restringiendo al elemento a trabajar dentro del estado plástico sin generar algún otro efecto.

La resistencia de diseño a la flexión determinada por el límite de fluencia, es $\Phi_b M_n$.

Se debe considerar $\Phi_b = 0,90$

$$\Phi_b M_n = M_p \dots\dots\dots [Ecuación 64]$$

Donde:

M_p = Momento plástico

M_n = Momento nominal de la sección

M_y = Momento correspondiente al inicio de fluencia en la fibra extrema debido a una distribución elástica de esfuerzos

Z = Módulo de sección plástica, se presenta cuando la sección se plastifica es decir las fuerzas de tracción y compresión en la sección son del mismo valor

S_y = Módulo de sección elástica, y esta se presenta cuando la sección empieza a fluir alcanzando el esfuerzo de fluencia

$$M_p = F_y Z \leq M_y \quad \dots\dots\dots \text{[Ecuación 65]}$$

$$M_y = F_y S_y \quad \dots\dots\dots \text{[Ecuación 66]}$$

Para la condición de esfuerzo de flexión último:

$$M_u < \Phi_b M_n$$

4.5.3.4.- Diseño de conexiones.

Las conexiones son uniones mediante conectores mecánicos o soldaduras de los miembros de una estructura, para obtener un conjunto resistente que transmita las cargas a tierra. Las uniones deben ser resistentes, dúctiles, de conducta predecible y de fácil fabricación y montaje.

Para el diseño de conexión columna – placa base se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

4.5.3.5.- Diseño de plancha base.

La plancha base se configura de tal manera que sea capaz de distribuir las cargas en la columna a la base de concreto. El espesor necesario de las planchas ASTM A 36 dependerá de la disposición de los pernos y su diámetro, como también de las cargas a las cuales serán sometidas.

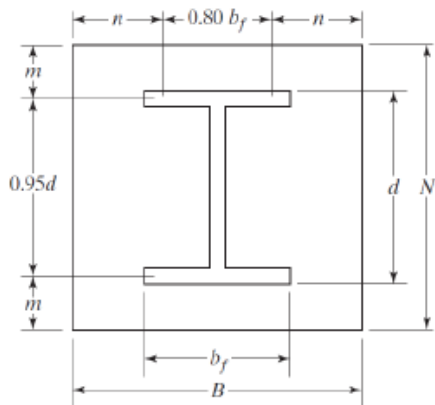


Figura 12. Plancha base

Fuente: McCormac y Csernak, 2012

Donde:

N = Longitud en el eje longitudinal

B = Longitud en el eje transversal

b_f = Longitud total del ala (patín)

$$m = (N - 0,95d) / 2$$

$$n = (B - 0,80 b_f) / 2$$

Teniendo en cuenta con la anterior, para determinar la resistencia de diseño de contacto del concreto debajo de la plancha base se debe considerar lo siguiente:

$$P_p = \phi_c (0,85 f'_c A_1) \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 f'_c A_1 \quad \dots\dots\dots \text{[Ecuación 67]}$$

Se debe considerar $\Phi_c = 0,65$

Donde:

P_p = Resistencia nominal de contacto del concreto

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto a los 28 días

A_1 = Área de la plancha base

A_2 = Área máxima de la porción de concreto soportante

4.5.3.6.- Diseño por resistencia a momentos.

Una carga axial genera esfuerzos de compresión entre la plancha base y la fundación de soporte, mientras que el momento realiza un incremento de la carga en compresión en un lado y lo disminuye en el otro.

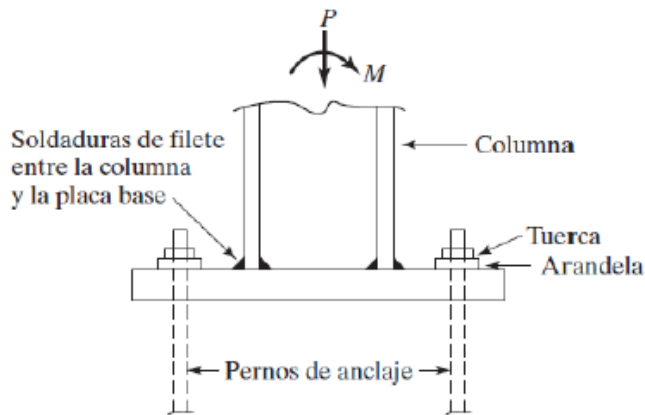


Figura 13. Plancha base resistente a momentos de columna

Fuente: McCormac y Csernak, 2012

El momento se determina un tramo de ancho de plancha igual a 1 y se iguala a su respectivo momento resistente, despejando la resultante la fórmula queda de la siguiente manera.

$$M_u \leq \phi_b M_n = \frac{\phi_b F_y I}{c} = \frac{\phi_b F_y (1/12)(1)(t)^3}{t/2} \quad t \geq \sqrt{\frac{6M_u}{\phi_b F_y}} \quad \text{.[Ecuación 68]}$$

Se debe considerar $\Phi_b = 0,90$

Donde:

M_u = Momento a la derecha del centro del ala

M_n = Momento resistente de la placa base

C = Longitud de compresión ($c=t/2$)

t = Espesor de la plancha base

La reacción última en la plancha base se determina por medio de las ecuaciones a describir:

$$R_u = P_u + T_u \dots\dots\dots[\text{Ecuación 69}]$$

$$T_u = P_u \left[\frac{e - \left(\frac{d-t_f}{2} \right)}{L+d - \frac{t_f}{2}} \right] \dots\dots\dots[\text{Ecuación 70}]$$

Donde:

R_u = Reacción última sobre la plancha base.

P_u = Carga axial máxima combinada.

T_u = Fuerza de tracción en la plancha.

e = Excentricidad ($e = M_y / F_z$)

L = Distancia del eje del perno al borde del ala.

M_y = Momento flexionante respecto al eje más crítico

F_z = Carga vertical actuante sobre la plancha base

F_u = Resistencia a la ruptura de la tensión.

Luego se procede a calcular área del perno de anclaje requerido (A_{req}).

$$A_{req} = T_u / \Phi_t \ 0,75 \ F_u \dots\dots\dots[\text{Ecuación 71}]$$

Se debe considerar $\Phi_t = 0,75$

4.5.3.7.- Pernos de anclaje para la plancha base.

Los pernos estructurales deberán ser pernos de alta resistencia y cumplir con las especificaciones ASTM A-325, así como de cumplir con los requisitos de tensión y corte; estipulado en la Norma E.090 estructuras metálicas.

El distanciamiento a los bordes de la plancha debe ser tal que evite el desgarramiento de la plancha o el levante de los bordes.

Los agujeros para pernos serán 1/16", más grandes que el diámetro nominal del conector.

a) *Diseño para cargas en tracción y corte.*

La resistencia en Tracción o Corte, por el método del LRFD, de un perno de alta resistencia o de un elemento roscado serán por las expresiones siguientes de resistencia nominal:

En tracción $\Phi R_{nt} = \Phi F_{nt} A_b$ [Ecuación 72]

En Corte $\Phi R_{nc} = \Phi F_{nv} A_b$ [Ecuación 73]

Se debe considerar $\Phi = 0,75$

Donde:

R_n = Resistencia a la tracción o corte

F_{nt} = Resistencia nominal a la tracción 620 Mpa para pernos A-325

F_{nt} = Resistencia nominal al corte 330 Mpa para pernos A-325

A_b = Área del perno nominal sin roscar

Para la condición de resistencia a tracción y cortante último, estos deben ser menor a ΦR_n .

b) *Espaciamiento mínimo.*

La distancia entre centro de huecos no deberá ser menor a 2 2/3 veces el diámetro nominal del perno es recomendable una distancia de 3d.

c) *Distancia mínima al borde.*

La distancia del centro de un hueco estándar al borde de una parte conectada no será menor a lo indicado en la tabla 41.

Tabla 41

Distancia mínima al borde en pernos de anclaje

Diametro nominal del perno (mm)	En bordes cizallados	En bordes laminados de planchas perfiles o barras o bodes cortados con soplete (c)
16	28	22
20	34	26
22	38	28
24	42(d)	30
27	48(d)	34
30	52	38
36	64	46
Mayores a 36	1,75d	1,25d

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), 2006

4.6.- Soldadura de soporte en plancha base

Por el método LRFD la resistencia de diseño de la soldadura será el menor valor de la siguiente expresión.

$$\Phi R_{nv} = \Phi F_w A_w \dots\dots\dots [Ecuación 74]$$

Se debe considerar $\Phi = 0,75$ y para $F_w = 0,60 FeXX$.

Donde:

R_{nv} = Resistencia nominal de la soldadura al corte

F_w = Resistencia nominal del electrodo

$FeXX$. = Resistencia mínima a la tensión

A_w = Área efectiva de la sección recta de la soldadura

Φ = Factor de resistencia

a) *Soldadura de filete.*

El área efectiva de la soldadura de filete deberá tomarse como el producto de la longitud efectiva por el espesor de la garganta efectiva. La longitud efectiva de la soldadura de filete es la longitud total del filete incluyendo los retornos del extremo.

El tamaño mínimo de soldadura de filete no debe ser menor que el necesario para transmitir las fuerzas calculadas ni menor de lo indicado en la tabla 42.

Tabla 42

Tamaño mínimo de soldaduras de filete

Espesor de la parte unida mas gruesa (mm)	Tamaño minimo de la soldadura filete (a) en (mm)
Hasta 6 inclusive	3
Sobre 6 a 13	5
Sobre 13 a 19	6
Sobre 19	8

(a) Dimensión del lado de la soldadura de filete. Debe emplearse soldaduras en una sola pasada
(b) Para el tamaño máximo de soldaduras de filete

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), 2006

El tamaño máximo de soldadura de filete W_s , cuando el espesor del borde es menor o igual a 6 mm, el espesor máximo puede ser $W_s = 6$ mm, pero cuando el espesor del borde es mayor de 6 mm, el máximo tamaño de soldadura podrá ser igual al espesor de la pieza menos 2 mm.

El Longitud mínima del cordón: Esta no será menor que cuatro veces el tamaño de la soldadura. Se considera un retorno de $2 W_s$ y la longitud del traslape no será menor de cinco veces del espesor del material.

Para la dimensión de la garganta de la soldadura de filete T_e , se considerará lo siguiente.

- Si la soldadura $W_s \leq 10$ mm la garganta T_e será (W_s).
- Si la soldadura $W_s > 10$ mm la garganta T_e será ($0,707 W_s + 3,0$ mm)

b) Electrodo.

Los electrodos que serán utilizados en la fabricación de las estructuras de acero son del tipo E-70XX y deberán ser adquiridos en envases herméticamente sellados o en caso contrario serán secados por lo menos dos horas en un horno a temperaturas entre 450 y 500 °F antes de ser utilizados.

Los electrodos que no sean utilizados en el lapso de 4 horas después de ser retirados de sus envases herméticamente cerrados, deberán ser secados nuevamente antes de ser utilizados.

c) Calificación de los soldadores.

Las normas para calificación de soldadores, juntas a tope y filete a utilizarse será la AWS D1.1.2004.

Todos los operadores de la soldadura serán calificados de acuerdo con los requerimientos de la Norma AWS D 1.1.2004, demostrando los certificados expedidos a los soldadores y que no tengan una antigüedad mayor de 12 meses antes del inicio de la fabricación de la tubería de acero.

Las soldaduras se efectuarán con arco manual conforme a la Norma AWS A5.1 ó A5.2 ó con arco sumergido conforme a la Norma AWS A5.17 y se utilizará electrodo E70-XX. metal base ASTM A 36.

4.6.1- Cálculo del soporte metálico en el sistema de tuberías mixtas

En este punto se presentan los cálculos para los diferentes elementos estructurales que forma parte del soporte típico metálico, como la columna plancha base, pernos y soldadura. El diseño de soporte metálico en tierra de 1,35 m de altura, se realizó en acero estructural A36 considerando los efectos del peso propio, y la carga que prevalece mayor por sismo o viento. La figura 14 muestra el detalle típico de soporte en tierra para las tuberías mixtas de 14" x 12".

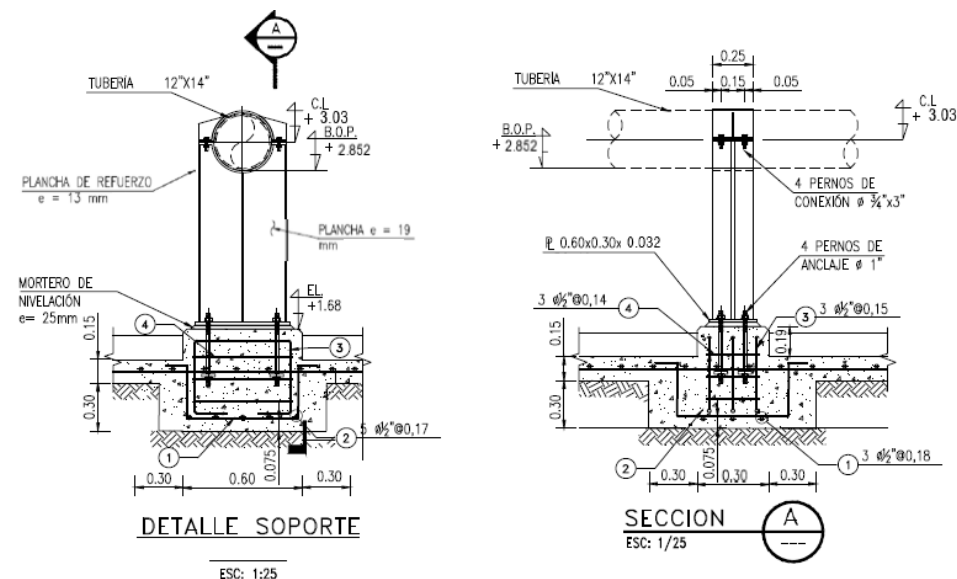


Figura 14. Detalle típico de un soporte metálico de tubería mixta

Fuente: Propia

4.6.2.- Cálculo de cargas actuantes en el soporte metálico

a) *Datos de carga muerta.*

Longitud tributaria de la tubería entre espaciamiento de soportes 10,0 m.

Peso de la tubería Mixta de 12"x 14", 0,128 ton/m.

Peso del líquido biodiesel dentro de la tubería de 12"x 14", 0,074 ton/m

Peso propio del soporte metálico: 0,11 ton.

$$P_u = (0,128+0,074) * 10 + 0,11 = 2,14 \text{ ton}$$

$P = 2,14 \text{ ton}$ Peso total.

b) Datos de la carga de sismo.

La definición de carga de sismo se define con los parámetros que se encuentran en el capítulo 4.1.4.1 de datos del sitio. Para hallar la carga sísmica se calcula la fuerza cortante con la ecuación 52.

$Z = 0,45$ Factor de zona (4)

$U = 1,5$ Coeficiente de uso e importancia

$S_3 = 1,10$ Factor de suelo

$C = 1,10$ Factor de amplificación sísmica

$R = 6$ Coeficiente de Reducción

$W = 2,14 \text{ ton}$ Peso de carga muerta (P)

$V = 0,64 \text{ ton}$ Fuerza cortante

$M = 0,86 \text{ ton-m}$ Momento sísmico ($V \times L$ del soporte)

c) Datos de la carga de viento.

La definición de carga de viento se define con los parámetros que se encuentran en el capítulo 4.1.4.1 de datos del sitio. Para hallar la carga de viento se considera la altura del soporte de 1,35 m y se calcula con la ecuación 53 y ecuación 54.

Donde:

$U = 1,5$ Coeficiente de uso e importancia

$v = 120,6 \text{ km/h}$ Velocidad de diseño hasta 10 m de altura

$h = 1,35 \text{ m}$ Altura sobre el terreno en metros

$V_h = 77,62 \text{ km/h}$ Velocidad de diseño en la altura h en (km/h)

$C = 1$ Factor de forma e importancia

$Ph = 30,12 \text{ kg/m}^2$ Presión o succión del viento a una altura h en (kg/m^2)

$A = 4,47 \text{ m}^2$	Área de la tubería expuesta al viento (10,0 m x 0,47 m)
$V = 0,13 \text{ ton}$	Fuerza de viento
$M = 0,18 \text{ ton-m}$	Momento por viento ($V \times L$ del soporte)

Por ser la fuerza por viento menor que la fuerza sísmica, el diseño se realizará para el efecto de la carga de sismo.

Aplicando las combinaciones de carga que se aplican para el método del LRFD, las cuales están estipuladas en el capítulo 4.1.4.2. Obtenemos las cargas actuantes últimas, que se usaran para el diseño del soporte.

- $P_u = 3,0 \text{ ton.}$ Peso actuante último
- $V_u = 0,64 \text{ ton}$ Cortante actuante último
- $M_u = 0,86 \text{ ton-m.}$ Momento actuante último

4.6.3.- Cálculo de la columna tipo W para el soporte de tuberías

Para el diseño de la columna del soporte se empleará la ecuación 55 al 59 para el diseño de resistencia de compresión axial, la ecuación 60 al 63 para la resistencia de diseño al corte y por último la ecuación 64 al 66 para la resistencia de diseño a la flexión.

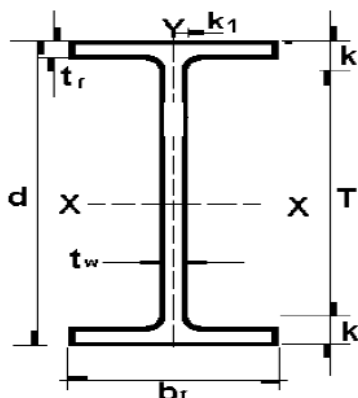


Figura 15. Sección del perfil W de la columna del soporte metálico

Fuente: Propia

Datos de la sección del perfil W como se muestra en la figura 15.

$A = 134,2 \text{ cm}^2$	Área de la sección W
$b_f = 25 \text{ cm}$	Longitud del ala
$t_w = 1,9 \text{ cm}$	Espesor del alma
$t_f = 1,3 \text{ cm}$	Espesor del ala
$d = 39 \text{ cm}$	Altura de la sección
$K = 2,8 \text{ cm}$	Espesor del ala más filete del alma
$K_1 = 2,5 \text{ cm}$	Espesor del alma/2 más filete del ala
$I_x = 30\,741,03 \text{ cm}^4$	Momento de Inercia respecto al eje x
$I_y = 13\,391,20 \text{ cm}^4$	Momento de Inercia respecto al eje y
$r_x = 15,13 \text{ cm}$	Radio de giro respecto al eje x
$r_y = 9,98 \text{ cm}$	Radio de giro respecto al eje y
$F_y = 2\,530 \text{ kg/cm}^2$	Esfuerzo de fluencia del acero
$F_u = 4\,080 \text{ kg/cm}^2$	Resistencia a la fractura del acero
$E = 2\,040,000 \text{ kg/cm}^2$	Módulo de Elasticidad del acero

a) *Diseño por Resistencia a Compresión axial.*

Verificación de la esbeltez (λ) usando las expresiones de la tabla 42.

$b/t = 9\,615$	Razón ancho espesor ($b = t_f / 2$)
$\lambda_r = 15,90$	Relación límite de esbeltez. $0,56 (E / F_y)^{1/2}$
$\lambda < \lambda_r$	Elemento no esbelto
$h/t_w = 0,334$	Razón ancho espesor ($h = d - 2k$)
$\lambda_r = 42,30$	Relación límite de esbeltez. $1,49 (E / F_y)^{1/2}$
$\lambda < \lambda_r$	Elemento no esbelto

Determinación del esfuerzo de pandeo a flexión F_{cr} .

$L = 1,35 \text{ m.}$	Longitud de la sección W
$K = 1$	Factor de longitud efectiva
$KL/r_y = 13,63$	$4,71 (E/ F_y)^{1/2} = 133,71$
$KL/r_y < 4,71(E/ F_y)^{1/2}$	Pandeo inelástico
$F_e = 108\,378 \text{ Kg/ cm}^2$	Esfuerzo de pandeo crítico elástico
$F_{cr} = 2\,505,45 \text{ Kg/ cm}^2$	Esfuerzo de pandeo a la flexión
$A_g = 134,20 \text{ cm}^2$	Área de sección transversal
$\Phi_c = 0,90$	
$P_u = 3,0 \text{ ton.}$	Fuerza máxima de compresión.
$\Phi_c P_n = 302,16 \text{ ton.}$	Resistencia nominal a la compresión
$P_u < \Phi_c P_n$	Conforme

b) *Resistencia de diseño al corte.*

$h/t_w = 0,334$	Razón ancho espesor ($h = d - 2k$), Si $h/t_w < 260$, $k_v = 5$
$k_v = 5$	Coefficiente de pandeo por cortante de la placa del alma, valor para almas sin atiesadores transversales
$h/t_w < 1,10(k_v E/ F_y)^{1/2}$	$1,10(k_v E/ F_y)^{1/2} = 9,84$, por lo tanto, $C_v = 1$
$C_v = 1$	Coefficiente de cortante del alma
$A_w = 74 \text{ cm}^2$	Área del alma
$\Phi_c = 1,00$	
$V_u = 0,64 \text{ ton.}$	Fuerza cortante actuante
$\Phi_c V_n = 12,33 \text{ ton.}$	Resistencia nominal al corte
$V_u < \Phi_c V_n$	Conforme

c) *Resistencia de diseño por flexión.*

$L = 1,35 \text{ m.}$	Longitud de la sección de la columna
-----------------------	--------------------------------------

$S_y = 1\,040\text{ cm}$ Módulo de sección elástica o transversal, $I_y / (b_f/2)$
 $Z_y = 438,6\text{ cm}$ Módulo de sección plástica
 $A_s = 67,06\text{ cm}$ Área del acero a tensión (zona achurada)
 $d_1 = 6,54\text{ cm}$ Distancia del momento par

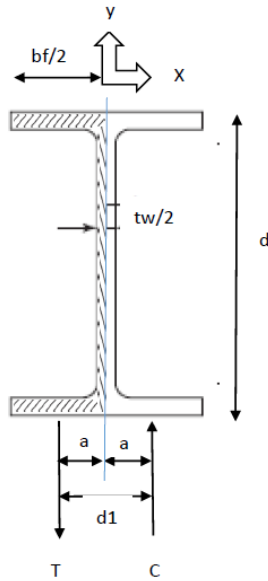


Figura 16. Cálculo del módulo plástico con respecto al eje y

Fuente: Propia

$$M_p = Z_y \times F_y = T \times d_1 \quad \text{pero} \quad T = A_s \times F_y$$

$$Z_y \times F_y = A_s \times F_y \times d_1 \quad \text{obtenemos} \quad Z_y = A_s \times d_1$$

Para calcular la distancia (d_1) se requiere conocer el centroide de la sección achurada en la figura 16, puesto que esa es la mitad del área de la sección. Dicho centroide medido desde la línea punteada se llamará (a) por lo que $d_1 = 2a$.

Figura Sombreada	Área (cm ²)	Centroide (cm)	Área x Centroide (cm ³)
Patin Superior	12.5 x 1.3 =. 16.25	12.5 ÷ 2 =. 6.25	101.56
Alma	36.4 x 0.95 =. 34.58	0.95 ÷ 2 =. 0.475	16.43
Patin Inferior	12.5 x 1.3 =. 16.25	12.5 ÷ 2 =. 6.25	101.56
	67.08		219.55

$$a = 219,55\text{ cm}^3 / 67,06\text{ cm}^2 = 3,27\text{ cm}, \text{ pero } d_1 = (2 a) \text{ entonces } d_1 = 6,54\text{ cm}$$

$$M_y = 26,31\text{ ton-m} \quad \text{Momento de fluencia}$$

$M_p = 11,13 \text{ ton-m}$	Momento plástico
$M_p < 1,5 M_y$	$1,5 M_y = 39,46 \text{ ton-m}$
$\Phi_b = 0,90$	
$M_u = 0,86 \text{ ton-m}$	Momento último actuante.
$M_n = 10,02 \text{ ton-m}$	Momento nominal a la flexión
$M_u < \Phi_b M_n$	Conforme

4.6.4.- Cálculo de la plancha base de la columna del soporte

La plancha base como elemento a conexión utilizará la siguiente ecuación 67 al 71. El área de la plancha depende de la resistencia del concreto y el espesor de la plancha es controlado por la resistencia en flexión de la misma.

- Datos de la sección de la columna sobre la plancha base.

$b_f = 25 \text{ cm}$	Longitud del ala
$t_w = 1,9 \text{ cm}$	Espesor del alma
$t_f = 1,3 \text{ cm}$	Espesor del ala
$d = 39 \text{ cm}$	Altura de la sección

- Datos del pedestal bajo la plancha.

$f'_c = 2 \text{ 100 ton/m}^2$.	Reacción a la compresión sobre la plancha
$N_p = 0,30 \text{ m}$.	Longitud del pedestal en la dirección del eje x
$B_p = 0,60 \text{ m}$.	Longitud del pedestal en la dirección del eje y

- Datos de la plancha.

$F_y = 2 \text{ 530 kg/cm}^2$	Esfuerzo de fluencia del acero
$F_u = 4 \text{ 080 kg/cm}^2$	Resistencia a la fractura del acero
$E = 2 \text{ 040,000 kg/cm}^2$	Módulo de elasticidad del acero

$N = 0,30 \text{ m.}$ Longitud de la plancha en la dirección del eje x
 $B = 0,60 \text{ m.}$ Longitud de la plancha en la dirección del eje y
 $A=0,18 \text{ m}^2$ Área de la plancha
 $IX = 0,0054 \text{ m}^4$ Momento de inercia de la plancha al eje x
 $C = 0,30 \text{ m}$ Longitud de compresión de la plancha en planta

- Datos de las cargas últimas actuantes sobre la plancha.

$P_u = 3,0 \text{ ton.}$ Peso actuante último

$M_u = 0,86 \text{ ton-m.}$ Momento actuante último

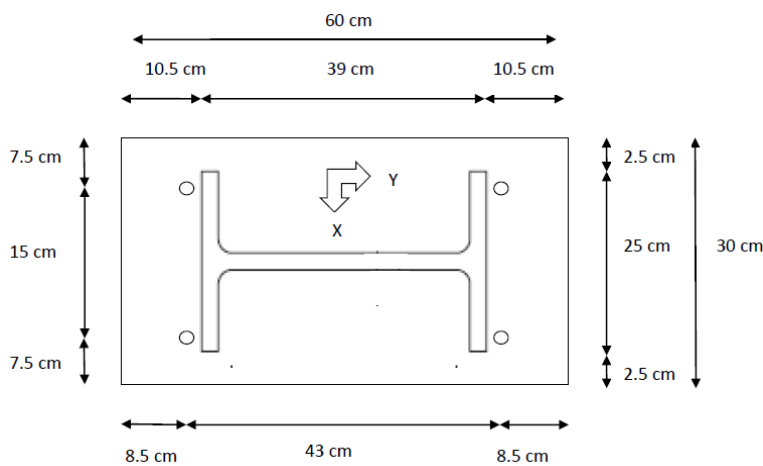


Figura 17. Vista en planta de la plancha base

Fuente: Propia

a) *Diseño por resistencia al contacto con el concreto.*

Con este diseño verificamos el área mínima requerida para la plancha base y pernos de anclaje.

$e = 0,29 \text{ m}$ Excentricidad (M_u / P_u)

$d/2 = 19,5 \text{ cm}$ Ubicación del centroide de la sección de la columna

$e > d/2$ La resultante está fuera del patín de la columna

La resultante se sitúa fuera del patín de columnas, tomando momentos respecto al centro del patín derecho, obtenemos:

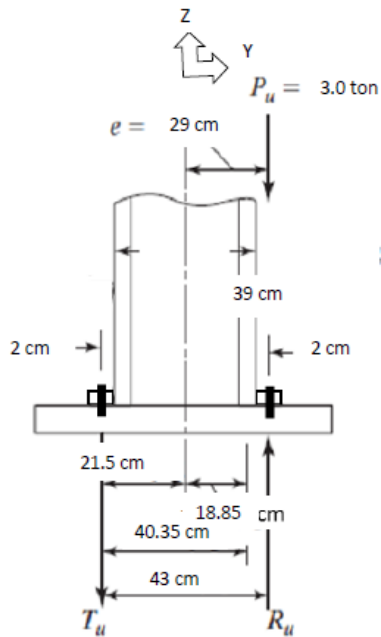


Figura 18. Ubicación de las fuerzas de compresión y tensión sobre la plancha

Fuente: Propia

Para calcular el área mínima requerida para el perno, se usarán la ecuación 69 al

71.

- $P_u = 3,0 \text{ ton.}$ Carga axial máxima combinada
- $L = 2,0 \text{ cm.}$ Fuerza de tracción de la plancha
- $F_u = 4\ 080 \text{ kg/cm}^2$ Resistencia a la fractura del acero
- $T_u = 0,75 \text{ ton.}$ Fuerza de tracción de la plancha
- $R_u = 3,75 \text{ ton.}$ Reacción última sobre la plancha base
- $\Phi_t = 0,75$

$A_{req} = 1,62 \text{ cm}^2$ Área mínima requerida del perno. Usaremos de $\Phi 1''$

Con el valor de la reacción última verificaremos el área requerida para la plancha se usará la ecuación 67.

- $R_u = 3,75 \text{ ton.}$ Carga axial máxima combinada
- $f'_c = 2\ 100 \text{ ton/m}^2.$ Reacción última sobre la plancha
- $\Phi_c P_p = R_u$ Resistencia Nominal de contacto del concreto

$$A_1 = A_2$$

Área del pedestal es igual al área de la plancha

$$\Phi_c = 0,65$$

$$A_{req} = 32,3 \text{ cm}^2$$

Área mínima de la plancha usaremos 30 cm x 60 cm

b) *Diseño del espesor requerido de la plancha base.*

La excentricidad se sitúa fuera de los patines de la columna y fuera del tercio medio de la plancha, debido a esto se tomarán momentos respecto al centro del patín derecho ver figura 19.

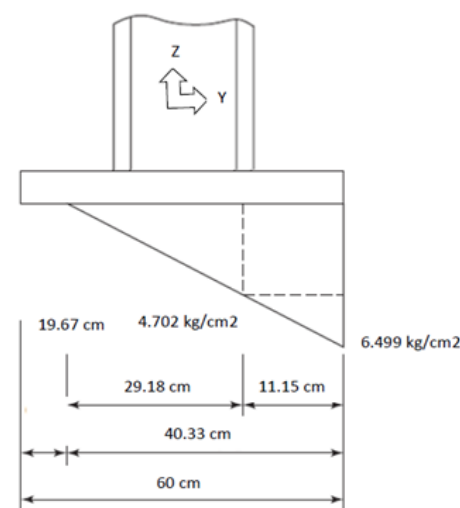


Figura 19. Momentos a la derecha del centro del patín

Fuente: Propia

Para el cálculo del espesor de la plancha base, utilizaremos la ecuación 68.

$$F_y = 2\,530 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzo de fluencia del acero

$$N = 0,30 \text{ m.}$$

Longitud de la plancha en la dirección del eje x

$$L_1 = 40,33 \text{ cm.}$$

Longitud del triángulo de reacciones sobre la plancha

$$A_p = 1\,210 \text{ cm}^2$$

Área de presión sobre la plancha de compresión

$$\sigma_m = 6,50 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzo mayor sobre la plancha

$$L_2 = 11,14 \text{ cm.}$$

Longitud del volado derecho a partir del ala del perfil

$$\sigma_m = 4,70 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzo en el ala del perfil

$\Phi_b M_n = M_u$	Momento resistente de la plancha base
$\Phi_b = 0,90$	
$M_u = 0,37 \text{ ton-m.}$	Momento en el lado derecho del ala del perfil
$t = 2,74 \text{ cm}$	Espesor de la plancha base usaremos de $\frac{3}{4}$ "

4.6.5.- Cálculo de los pernos de anclaje

Se usarán pernos de alta resistencia A-325 y la verificación se realizará con la ecuación 72 y ecuación 73, que son para tracción y cortante respectivamente.

Datos de los pernos.

$R_u = 3,75 \text{ ton.}$	Carga axial máxima combinada
$V_u = 0,64 \text{ ton}$	Cortante actuante último
$F_{nt} = 6\ 200 \text{ kg/cm}^2$	Resistencia nominal a la tracción para pernos A-325
$F_{nv} = 3\ 300 \text{ kg/cm}^2$	Resistencia nominal al corte para pernos A-325
$A_b = 20,24 \text{ cm}^2$	Área del perno nominal sin roscar, usaremos 4 $\Phi 1"$
$\Phi = 0,75$	
$\Phi R_{nt} = 94,11 \text{ ton.}$	Resistencia en tracción
$\Phi R_{nv} = 49,99 \text{ ton.}$	Resistencia en corte
$R_u < \Phi R_{nt}$	Conforme
$V_u < \Phi R_{nv}$	Conforme

4.6.6.- Cálculo de la soldadura entre la columna soporte y la plancha base

Los cálculos se basarán en la soldadura de filete entre la columna y plancha base ver ecuación 74 y figura 20.

- a) Datos de la soldadura y cargas.
- Dimensión del espesor de la soldadura filete.

Si el espesor del borde $> 6,0$ mm el tamaño de la soldadura (w_s) $= e_b - 2,0$ mm

Entonces: $w_s = 19,0 \text{ mm} - 2,0 \text{ mm} = 17,0 \text{ mm}$

El retorno es $L_r = 2w_s = 2(17,0 \text{ mm}) = 34,0 \text{ mm}$

- Dimensión del espesor de la garganta en filete.

Si $W_s > 10$ mm la garganta T_e será $0,707 W_s + 3,0$ mm

Entonces: $T_e = 0,707(17,0 \text{ mm}) + 3,0 \text{ mm} = 15,0 \text{ mm}$

$L_p = 40,10$ cm	Longitud de soldadura en cada patín
$e_b = 19,00$ mm	Espesor de borde
$w_s = 17,00$ mm	Espesor de la soldadura filete
$T_e = 15,00$ mm	Tamaño de la garganta en la soldadura filete
$F_{E70} = 4,92$ ton/cm ²	Resistencia mínima a la tensión (fractura de soldadura)
$M_u = 86$ ton-cm.	Momento actuante último
$t_f = 1,3$ cm	Espesor del ala
$d = 39$ cm	Altura de la sección
$\Phi = 0,75$	
$T = 2,28$ ton	Fuerza de Tracción $= M_u / (d - t_f)$
$A_w = 61,65$ cm ²	Área efectiva de la sección recta de la soldadura
$\Phi R_{nv} = 159,74$ ton.	Resistencia nominal de la soldadura al corte
$T < \Phi R_{nv}$	Conforme

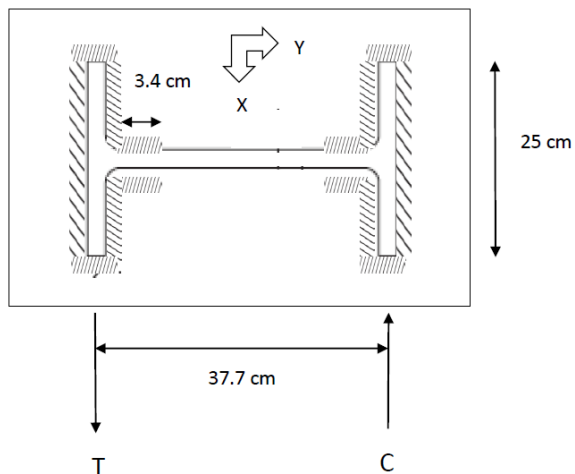


Figura 20. Ubicación de fuerza de tensión para la soldadura de filete entre columna y plancha
Fuente: Propia

4.7.- Concreto armado

Se realizará el dimensionamiento básico de las estructuras correspondiente a fundaciones de soportes de tuberías y se deberá considerar los siguientes aspectos:

- El diseño de concreto reforzado debe estar en concordancia con N.T.E E.060 concreto armado.
- La cota de asiento mínima para las fundaciones, medida desde el nivel de terreno será de 1,20 m.
- Para los recubrimientos se utilizará lo estipulado en las Normas N.T.E E.060.

Conforme a la Norma N.T.E.E.020, los soportes de concreto para tuberías serán diseñados para un coeficiente de seguridad mínimo de 1,25 contra falla por deslizamiento y de 1,50 para falla por volteo.

4.7.1.- Cálculo del soporte marino por deslizamiento y volteo

El diseño del soporte se realizó en concreto armado considerando los efectos del peso propio, el efecto flotación y el efecto de las corrientes marinas actuando en la dirección perpendicular a las tuberías soportadas y a su vez en el soporte.

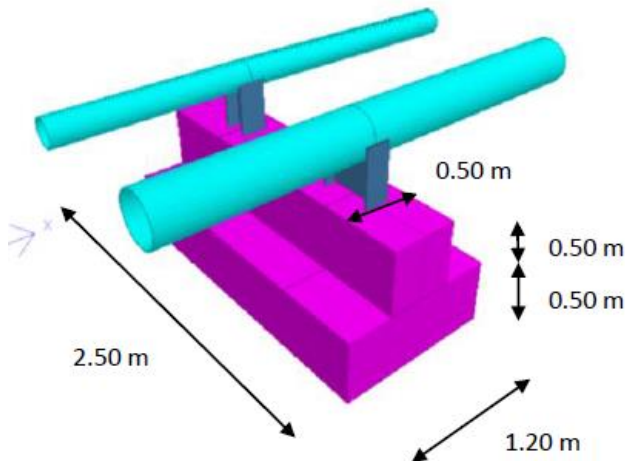


Figura 21. Base de concreto del soporte marino

Fuente: Propia

Verificación por desplazamiento y volteo:

Peso sumergido del soporte: 2 975 kg

Longitud tributaria de tubería = 3,1 m

Fuerza horizontal por corriente: 3,1 m x 3,42 kg/m = 10,60 kg.

Coefficiente de fricción lecho marino-acero = 0,7

- $(2\,975 \times 0,7) / 10,60 = 196 > 1,25$ Ok. factor de deslizamiento (E-020)

- $(2\,975 \times 0,6) / (10,60 \times 2,35) = 71,65 > 1,50$ Ok. factor de volteo (E-020)

De estos resultados se puede concluir que el soporte es estable al desplazamiento y levantamiento por efecto de las corrientes marinas, debido a que el peso propio del soporte es mucho mayor que las fuerzas verticales y horizontales actuantes sobre el conjunto soporte y tuberías.

4.7.2.- Procedimiento de cementación anular en spool de sistema mixto

- Primeramente, se verificará que la tubería de FRP, del sistema a cementar, este llena de agua y se encuentre a una presión entre 80 – 120 psi.
- La densidad es controlada con la báscula de densidad obteniendo valores en un rango entre 9 a 14 lb/gal y cono de fluidez con un rango entre 8 a 15 segundos. La resistencia mínima del grout será de por lo menos 15 kgf/cm² (213 psi).
- La presión de inyección del cemento será ligeramente menor entre 5 a 10 psi que la presión colocada en la tubería de FRP.
- En la figura 3 y figura 4 se muestra el procedimiento gráfico de cementación, ubicado en el ítem 2.3.1.1.
- Los resultados del vaciado de la cementación anular se encuentran detallado en el registro R-01 de calidad en el apéndice J.

4.8.- Disciplina electricidad

4.8.1.- Diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa

El sistema de protección catódica además de proteger los nuevos ductos, tanto en el tramo submarino como en el tramo terrestre, brindará protección a instalaciones existentes las cuales constan de dos tuberías de acero API 5L Gr B (de 12” y 6”) que van desde la caja de válvulas de la playa hasta las juntas de aislamiento ubicadas en la planta, para la tubería de 12" está en la caja de válvulas de la planta y la de 6" está en la válvula de entrada al sistema de flushing. La longitud media de la tubería de 12" es de 165 m y la de 6" es de 200 m.

El sistema de corriente impresa propuesto tiene como ventajas principales la posibilidad de ser ajustable, condición que es requerida para contrarrestar los

cambios que puedan sufrir tanto el suelo como el agua de mar de acuerdo con las estaciones climáticas y, por otra parte, la vida útil del mismo es superior a 25 años; también contará con monitoreo de los parámetros de operaciones por medio del sistema SCADA. En la figura 22, se muestra el diagrama esquemático típico del sistema de protección catódica por corriente impresa.

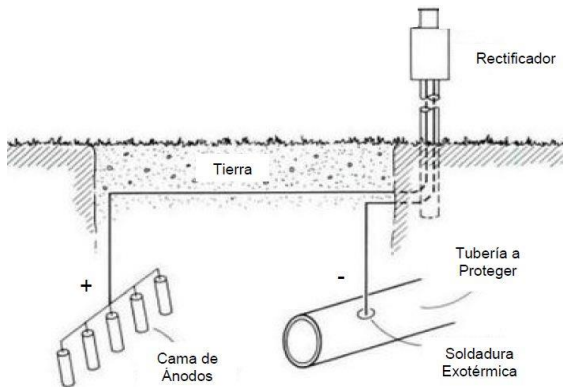


Figura 22. Diagrama esquemático del sistema de protección catódica por corriente impresa

Fuente: Chavarría, 2007

El sistema de protección catódica por corriente impresa consiste en ánodos enterrados directamente en la tierra y cerca de las tuberías a proteger, con poca longitud de cables, y utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura.

Los ánodos a utilizar serán del tipo MMO “Mixed Metal Oxide” iguales a los existentes, los cuales están constituidos por un sustrato de titanio de 99 % de pureza, en forma de barra, alambre o tubo, revestido con óxidos cerámicos metálicos mezclados, de alta capacidad conductora. Este tipo de ánodos permiten expectativas de vida superior a 25 años.

La cama de ánodos, se utilizará la existente n=10 y estará conectada a la tubería a ser reemplazada la cual hará la función de un gran ánodo de chatarra, los mismos serán alimentados a través de un cable colector HMWPE AWG # 2.

El diseño contempla la utilización de un rectificador enfriado por aceite, dotado con gabinete tipo intemperie NEMA 4X, así como también módulo de medición de potenciales para el control del sistema de protección catódica el cual será monitoreado.

La corriente de retorno o negativa, se conducirá a través de un cable HMWPE AWG # 2 que irá directo desde el borne negativo del rectificador a una caja de paso, de la que saldrán dos cables HMWPE AWG # 2, hacia cada tubería, esto permitirá balancear la corriente por igual entre los mismos.

Las uniones de los tramos de tubería serán interconectadas con un “puente eléctrico” donde sea necesario para asegurar la continuidad de la corriente de la protección catódica, por medio de un cable de cobre desnudo AWG # 1/0 empleando soldadura exotérmica.

4.8.2.- Criterios adoptados para el diseño del sistema

Para garantizar el buen funcionamiento del sistema de protección catódica se recomienda el seguimiento de criterios aceptados internacionalmente por la NACE, los cuales se basan específicamente en el mantenimiento del potencial de la estructura protegida en relación con el electrolito de referencia, establecidos en la Norma NACE RP0169-2013, sección 6 potencial medido en “instant off” menor a -0,850 V y mayor a -1 150 V.

4.8.3.- Densidad de corriente

Se consideró un valor de densidad de corriente promedio de 65 mA/m² para la zona sumergida, valor obtenido de la tabla 43, para las superficies de acero desnudo enterradas en sedimentos, se recomienda una densidad de corriente de diseño de 20 mA/m².

Tabla 43

Densidades de corrientes requeridas para protección catódica de acero desnudo en ambiente marino en diversas zonas geográficas

Lugar	Resistividad	Temperatura	Densidad de corriente típica para diseño	
	ρ Ohm-cm	°C	mA/ m ²	mA/ ft ²
Golfo México	20	22	54 - 65	5,0 – 6,0
Costa oeste U. S	24	15	76 - 106	7,0 – 1,0
Mar del norte	26-33	0-12	86 - 216	8,0 – 2,0
Golfo pérsico	15	30	54 - 86	5,0 – 80
Indonesia	19	24	54 - 65	5,0 – 6,0
Perú-costa sur	24	18	54 - 65	5,0 – 6,0

Fuente: Rosario, 2004

4.8.4.- Área a proteger

Para el cálculo de área a proteger en el tramo submarino, se estimarán los factores de deterioro del revestimiento según la Norma ISO 15589-2 “petroleum, petrochemical and natural gas industries – cathodic protection of pipeline transportation systems - part 2 off-shore pipelines”, un factor de deterioro del revestimiento por medio de la siguiente fórmula con los valores que se encuentran en la tabla 44.

$$FCf = fi + \Delta f \times Tdl \dots\dots\dots[Ecuación 75]$$

Donde:

FCf= Factor de ruptura de revestimiento (coating breakdown factor)

Fi= Es el factor de ruptura del revestimiento al inicio de la operación de la tubería
0,009 para 3LPE según tabla 3 de la Norma ISO 15589-2:2012 ver tabla 44.

Δf = Es el incremento promedio anual de daño en el recubrimiento. 0,0006 para 3LPE según tabla 3 de la Norma ISO 15589-2:2012 ver tabla 44.

Tdl= Es el tiempo de vida útil de diseño, en este caso 25 años

$$FCf = 0,009 + 0,0006 \times 25 = 2,4\%$$

Por lo tanto, el FCf = 2,4 %.

Tabla 44

Factor de deterioro del revestimiento para tuberías submarinas

Factory-applied coating type	Field joint coating type	f_i	Δf
Fusion-bonded epoxy (FBE)	Heat-shrinkable sleeves (HSS ^a)	0,080	0,003 5
	FBE	0,060	0,003 0
Three-layer coating systems including epoxy, adhesive and polyethylene (3LPE)	HSS ^a	0,009	0,000 6
	FBE	0,008	0,005
	Multilayer coating including epoxy and PE (e.g. moulded, HSS ^a or flame spray)	0,007	0,000 5
Three-layer coating systems including epoxy, adhesive and polypropylene (3LPP)	HSS ^a	0,007	0,000 3
	FBE	0,006	0,000 2
	Multilayer coating including epoxy and PP (e.g. HSS ^a , hot tapes, moulding or flame spray)	0,005	0,000 2
Heat insulation multilayer coating systems including epoxy, adhesive and/or PE, PP or PU	Thick multilayer coating systems including epoxy, adhesive and/or PE, PP, PU, HSS ^a or a combination of these products.	0,002	0,000 1
Thick coatings: elastomeric materials (e.g. polychloroprene or EPDM) or glassfibre-reinforced resins	Thick elastomeric materials or glassfibre-reinforced resins	0,002	0,000 1
Flexible pipelines	Not applicable (mechanical couplings)	0,002	0,000 1

^a HSS can be used with or without primer.

Fuente: Organización Internacional de la Normalización (ISO), 2012

Por lo tanto, los cálculos se realizarán con un factor de deterioro del revestimiento con daños hasta 2,4 %, lo que implica un porcentaje igual de área desnuda en la tubería submarina, el área a proteger de tubería submarina con porcentaje de deterioro de 2,4% es:

TUB.	Diámetro (m)	Longitud en Agua (m)	Área en Agua (m ²)	Área a Proteger en Agua (m ²)
14"φ	0.356	610	682.23	16.374
8"φ	0.219	610	419.69	10.072
		Total	1,101.92	26.446

Respecto al tramo terrestre, se utiliza la misma ecuación 75, que se realizó para el tramo submarino y considerando los valores sugeridos en la ISO_15589-1 ver

tabla 45, tomando como recubrimiento el coal tarepoxy o pintura epoxi, se obtiene un factor de deterioro de 65,8 %.

Donde:

$f_i = 0,008$ Es el factor de ruptura del revestimiento al inicio de la operación de la tubería ver tabla 45

$\Delta f = 0,01$ Es el incremento promedio anual de daño en el recubrimiento para coal tarepoxy según la Norma ISO 15589-1:2015 ver tabla 45

$T_{dl} = 65$ años, tomando en cuenta la antigüedad de la tubería y la proyección a 25 años

$FC_f = 0,008 + 0,01 \times 65 = 65,8\%$, para la tubería en tierra

Tabla 45

Factores de deterioro del revestimiento típicos para tuberías en tierra

Pipeline coating	f_i	Δf
FBE	0,005	0,003
3LPE	0,001	0,000 3
3LPP	0,001	0,000 3
Liquid epoxy	0,008	0,01
Coal tar urethane	0,008	0,01

Fuente: Organización Internacional de la Normalización (ISO), 2015

El área a proteger de tubería en tierra con porcentaje de deterioro de 65,80% es:

TUB.	Diámetro (m)	Longitud en Tierra (m)	Área en Tierra (m ²)	Área a Proteger en Tierra (m ²)
12"φ	0.305	195	186.85	122.945
6"φ	0.168	200	105.56	69.457
		Total	292.40	192.402

4.8.5.- Resistividad adoptada

Para la medición de la resistividad del suelo se utilizó el método de cuatro puntas de Wennerb ASTM G57-06, donde se utilizó un equipo vibrador con batería “Nilson” con capacidad de 12 voltios y 97 Hz. La resistividad se calcula mediante la fórmula indicada en la figura 24 y las mediciones se detallan en la tabla 46.

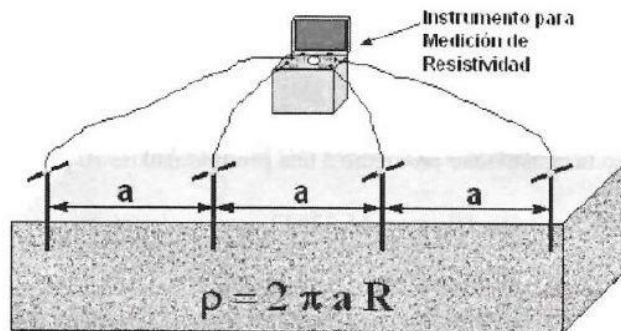


Figura 23. Medición de resistividad por el método de cuatro puntas de wenner

Fuente: Rosario, 2004

Donde:

ρ = Resistividad (Ohm-cm) se tomará el valor promedio del estrato 0-1,50 m

π = Constante (Pi: 3,1416)

a = Separación (cm)

R = Resistencia (Ohm)

Tabla 46

Mediciones de resistividad según método de cuatro puntas de Wenner

Ubicación	Distancia cm	Resistencia Ohm	Resistividad Ohm - cm	Promedio de resistividad Ohm - cm
Inicio	150	3,2	3 014	3 485,4
	250	2,3	12 839,11	
Medio	150	2,4	2,260	162 738,88
	250	4,1	9 087,53	
Final	150	5,5	5 181,00	estrato 1,5 a 2,5m
	250	5,4	466 290,0	

Fuente: Wenner, 1915

4.8.6.- Cálculo de la corriente requerida

Para el cálculo de la corriente se utiliza la siguiente expresión:

$$\mathbf{Corriente\ Requerida = A_p \times i} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 76}]$$

Donde:

A_p = Área desnuda que se protege (m^2)

i = Densidad de Corriente (mA/m^2)

$i = 65 \text{ mA}/m^2$ (agua)

$i = 20 \text{ mA}/m^2$ (playa)

Las corrientes teóricas requeridas para la protección catódica de las tuberías son:

Tuberías sumergidas: 2,10 A

Tuberías enterradas no sumergidas: 4,53 A

Usando un 50% de factor de seguridad:

Corriente total requerida: $(2,10 + 4,53) \times 1,5 = 9,95 \text{ A}$

4.8.7.- Resistencia del sistema

Se realizarán dos cálculos uno utilizando la cama de ánodos tipo MMO existente, y otro utilizando las estructuras remanentes (tuberías a reemplazar) como ánodo chatarra longitudinal, con ello se tendría una mejor distribución de la corriente y potenciales a lo largo de las nuevas estructuras de líneas submarinas.

4.8.7.1.- Cálculo del número de ánodos.

Se ha considerado la cama anódica o lecho dispersor actual ánodos TI/MMO debido al poco tiempo de funcionamiento y acoplarlo a los remanentes de las tuberías (610 m. parte marina) que no serán retiradas, ello permitirá aumentar la vida útil del lecho de ánodos TI/MMO, estos ánodos se instalan generalmente en un relleno carbonoso. La vida útil del diseño se rige generalmente por la velocidad

de consumo carbonoso de relleno. Por lo tanto, la velocidad de consumo del ánodo es insignificante ver tabla 47.

Tabla 47

Características electroquímicas típicas de ánodos

Anode materials	Consumption rate g·A ⁻¹ ·y ⁻¹	Typical range for anodic current density A·m ⁻²
Scrap steel	10 000 to 12 000	1 to 5
High silicon iron alloy	250 to 1 000	10 to 30 ^b
Impregnated graphite	500 to 1 000	2,5 to 10 ^b
Magnetite	2	10 to 20 ^b
Mixed metal oxide (MMO) on titanium substrate in carbonaceous backfill	a, c	50 to 100 ^b
Conductive polymers in carbonaceous backfill	a	0,4 ^b

NOTE When impressed current anodes are installed with carbonaceous backfill, it is necessary to take into account the consumption rate of carbonaceous backfill. Typically, it is 900 g·A⁻¹·y⁻¹ to 2 000 g·A⁻¹·y⁻¹ and a typical range for anodic current density is 5 A·m⁻².

^a These anodes are usually installed in a carbonaceous backfill. The design life is generally governed by the carbonaceous backfill consumption rate. The consumption rate of the anode is therefore insignificant.

^b The anode manufacturer's maximum current density recommendations should be observed.

^c NACE/TM 0108-2008^[2] gives recommendations for testing catalysed titanium anodes in soil.

Fuente: Organización Internacional de la Normalización (ISO), 2012

Dimensiones:

Diámetro = 1" (0,025 m)

Longitud = 45" (1,143 m)

Diámetro con canister = 3" (0,0762 m)

Longitud con canister = 60" (1,524 m)

Área con canister = 0,0046 m²

Densidad de corriente máxima en relleno carbonoso = 50 mA/m²

Descarga máxima por ánodo = 4,61 A

Numero de ánodos requeridos basados en la descarga de corriente es:

$$I_f = \frac{I_{cf}}{n} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 77}]$$

If = Descarga máxima por ánodo (amperios) = 4,61A

Icf = Corriente requerida (Ireq = 9,95 A)

N = Mínimo de ánodos

Despejando n de la fórmula se obtiene que $n = 9,95 \text{ A} / 4,61 \text{ A} = 2,16$ ánodos (mínimo).

Se tiene una cama existente de 10 ánodos; por lo tanto, está cubierto el requerimiento.

4.8.7.2.- Cálculo de masa neta de ánodo de chatarra.

$$m = I_{cm} \times t_{dl} \times \frac{8760}{u \times \epsilon} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 78}]$$

Donde:

Icm = 9,95 A. Corriente requerida (amperios)

Tdl = 25 años. Tiempo de vida de diseño (años)

ϵ = 730 Ah/kg. Capacidad electroquímica del material del ánodo (Amp.horas/kg)

u = 50%. Factor de utilización

De la tabla, se obtiene que para el acero chatarra su ratio de consumo es 12 kg/A-y, haciendo la conversión para ser usado en (ϵ) sería 730 Ah/kg, sustituyendo en la fórmula se tiene:

$$m = (9,95 \text{ Amp} \times 25\text{años} \times 8760) / (0,5 \times 730 \text{ Ah/kg}) = 5970 \text{ kg}$$

cantidad mínima de chatarra requerida.

La cantidad de chatarra total residual una vez reemplazada la tubería será de aproximadamente 59,4 toneladas. Es decir, se tendrá una masa de aproximadamente 10 veces la cantidad mínima requerida.

Por lo tanto, los cálculos de resistencia más conservadores para el dimensionamiento del rectificador serían usando la resistencia de la cama de ánodos.

4.8.7.3.- Resistencia del ánodo de chatarra.

Para determinar la resistencia del ánodo de chatarra se utiliza la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \times \ln(D/r) \times F \quad \dots\dots\dots[\text{Ecuación 79}]$$

Donde:

ρ = Resistividad del medio (ohm-cm) = 23 ohm-cm por ser lecho marino

L= Longitud del ánodo (cm) = 61 000 cm aproximadamente en cada tubería existente

D = Distancia entre el ánodo y la estructura a proteger (m) = 2 m

r = Radio del ánodo o tubería (m) = 12" (0,305 m) y 6" (0,152 m)

F = Factor de corrección de profundidad de enterramiento 1, para enterramiento muy profundo y 2 para completamente superficial. Se tomó el caso más desfavorable que es 2.

Sustituyendo los valores en las fórmulas obtenemos una resistencia de:

$$R_{\text{tubo 12"}} = 0,00031 \text{ ohm}$$

$$R_{\text{tubo 6"}} = 0,00039 \text{ ohm}$$

Por lo tanto, la resistencia del ánodo de chatarra es despreciable.

4.8.7.4.- Resistencia de la cama de ánodos.

Se tomó el cálculo para la resistencia.

Para determinar la resistencia de un (1) ánodo horizontal se utiliza la fórmula de

Dwight:

$$R = \frac{0,00159 \cdot \rho}{L} \times \left(\ln \left(\frac{4 \cdot L^2 + 4 \cdot L \cdot \sqrt{S^2 + L^2}}{d \cdot S} \right) + \frac{S}{L} - \frac{\sqrt{S^2 + L^2}}{L} - 1 \right) \dots \dots [\text{Ecuación 80}]$$

Donde:

ρ = Resistividad del medio (ohm-cm) = 3 485 ohm-cm (medición promedio de Wenner)

L = Longitud del ánodo (m) = 60" = 1,524 m

S = Doble de la profundidad de enterramiento (m) = 2 x 2,5 = 5 m

d = Diámetro del ánodo (m) = 3" = 0,0762 m

La resistencia de un ánodo horizontal en estas condiciones es:

$$R_{(1 \text{ ánodo})} = 12,57 \text{ ohm.}$$

La resistencia de una cama de N = 10 ánodos horizontales es:

$$R_{(10 \text{ ánodos})} = F \cdot (R_{(1 \text{ ánodo})} / N).$$

Donde F es un factor de corrección por interferencia, tal que:

$$F = 1 + (\rho \cdot \ln (0,656 \times N)) / (\pi \cdot s \cdot R_{(1 \text{ ánodo})}) \dots \dots \dots [\text{Ecuación 81}]$$

Donde:

S = Distancia entre centros de dos ánodos horizontales consecutivos = 3m = 300cm

Por lo tanto: F = 1,55

$$R_{(10 \text{ ánodos})} = 1,95 \text{ ohm}$$

4.8.7.5.- Resistencia de los cables y resistencia del recubrimiento.

Los cables a utilizar serán de calibre HMWPE 70 mm² para la alimentación positiva (+) y HMWPE 70 mm² para el retorno negativo del circuito (-). El cable positivo tiene una longitud aproximada de 270 m hasta la tubería chatarra y 100 m hasta la cama de ánodos. Por su parte, el cable negativo tiene una longitud de 30

m hasta la estructura a proteger por lo tanto la resistencia total de los cables en cada sistema será igual al producto de la longitud del conductor y la resistividad del material dividido por la sección del conductor ($L \times \rho_{cu} / S$).

$$\text{Resistencia de los cables} = (400 \text{ m} \times 0,0171 \text{ ohm. mm}^2/\text{m}) / 70 \text{ mm}^2 = 0,10 \text{ ohm}$$

Para la resistencia del recubrimiento consideramos una resistencia específica de 10^4 ohm.m^2 (@ $1\ 000 \text{ ohm.cm}$ según NACE International (2005) y un área total (parte en agua y playa) de $1\ 394,32 \text{ m}^2$.

Se considera la resistencia del conductor en función del calibre (AWG o mm^2) ($30 \text{ ohm.cm}/1\ 000 \text{ ohm.cm}$) $\times 10^4 \text{ ohm.m}^2 / 1\ 394,32 \text{ m}^2$.

Resistencia del Recubrimiento: $0,22 \text{ ohm}$.

En resumen: Referente a la resistencia total del sistema, este se calcula:

$$R.T. \text{ sistema} = R \text{ cama horizontal} + R \text{ cables} + R \text{ recubrimiento} \dots [\text{Ecuación 82}]$$

$$\text{Resistencia total sistema} = 1,95 + 0,10 + 0,22 + 0,00031 + 0,00039 = 2,27 \text{ Ohm}$$

4.8.7.6.- Dimensionamiento del rectificador.

Para determinar el voltaje del rectificador se utiliza la Ley de Ohm, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$V = I \times R \dots \dots \dots [\text{Ecuación 83}]$$

Donde:

V = Voltaje (V)

I = Intensidad de corriente (A) incluyendo factor de seguridad, 50%

R = Resistencia total del sistema (Ω)

$$V = (9,95\text{A} \times 2,27 \text{ ohm}) = 22,59 \text{ V}$$

Por necesidad en los diseños con corriente impresa se aumenta en 2 V el voltaje para contrarrestar el efecto del “backvoltage” o voltaje de retorno, por lo que el voltaje final será de $V_T = 24,59 \text{ V}$.

Los cálculos realizados establecieron como resultado un rectificador con capacidad mínima de 9,95 A y 24,59 V, enfriado por aceite, diodos silicio, con circuitos de protección CA/CC, utilizando la cama existente de 10 ánodos de MMO de 1" de diámetro y 48" de longitud, contenidos en un ambiente cilíndrico de 3" x 60" relleno con “back fill”, con una capacidad de drenaje nominal de 5 A cada uno.

4.8.7.7.- Cálculo del sistema de puesta a tierra.

El sistema de puesta a tierra se diseñará para proteger al personal durante las actividades de operación y/o mantenimiento. También deberá proteger a los equipos asociados al sistema eléctrico, en el sentido de minimizar los daños causados, a través de una baja impedancia, limitando la tensión a tierra y facilitando la operación de los dispositivos de protección. El diseño del sistema de tierra de los equipos deberá estar acorde a lo indicado en IEEE 1100-2005.

La resistencia máxima a tierra en cualquier punto será de 15Ω (ohmios), salvo para el caso de instrumentación, donde este valor será menor de 2Ω . Mientras mayor sea la corriente de falla a tierra, menor será la resistencia de puesta a tierra.

4.9.- Disciplina instrumentación

Para el sistema mixto de tuberías se plantea un diseño conceptual del sistema SCADA y del sistema de detección de fugas correspondientes al proceso de recepción de combustible y flushing que se efectuará a través de las líneas de 14"

y de 8", en el trayecto comprendido entre el fondo submarino donde está la válvula check que conecta con la manguera flexible de descarga del buque y la caja de válvulas n°2 ubicada en la planta de Consorcio Terminales.

– Glosario de términos y definiciones:

SCADA: Control Supervisorio y Adquisición de Datos (Supervisory Control And Data Acquisition).

RTU: Unidad Terminal Remota (Remote Terminal Unit).

MTU: Unidad Terminal Maestra (Master Terminal Unit).

SPC: Sistema de Protección Catódica.

LDS: Sistema de Detección de Fugas (Leak Detection System).

PLC: Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller).

HMI: Interfaz Hombre-Máquina (Human Machine Interface).

TCP/IP: Transmission Control Protocol/Internet Protocol.

UC Unidad Controladora.

Tag: Codificación alfanumérica para la identificación de instrumentos y equipos.

4.9.1.- Diseño conceptual sistema SCADA

El diseño conceptual del sistema SCADA, abarca el gabinete de la RTU donde se alojará el RTU y llegarán las señales del LDS, SPC y las señales analógicas de los sensores acústicos. En la figura 25 se muestra la arquitectura preliminar propuesta para el diseño del proyecto, que es a modo referencial.

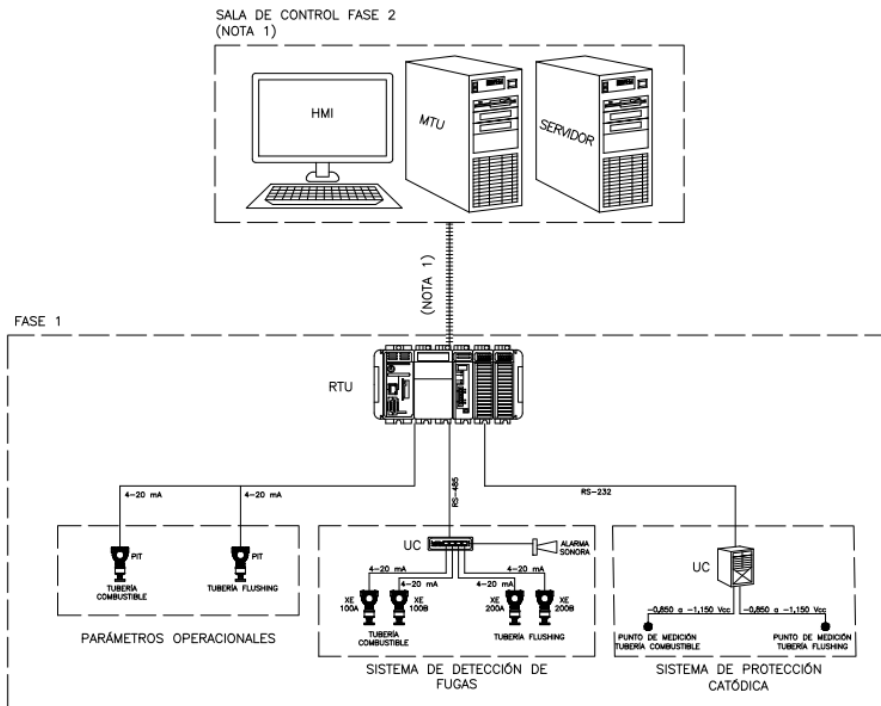


Figura 24. Arquitectura preliminar SCADA .

Fuente: Propia

4.9.2.- Conformación del Sistema SCADA

En esta sección se describe los elementos que conforman el sistema SCADA.

4.9.2.1.- Componentes del Sistema SCADA.

Los componentes que integran el Sistema SCADA son:

- Gabinete RTU: Conformado por CPU, fuente de poder, módulo I/O digital, módulo memoria volátil, módulo memoria no volátil y bus central.
- Sistema de detección de fuga.
 - Sensores acústicos (02) en la tubería de combustible.
 - Sensores acústicos (02) en la tubería de flushing.
 - Controlador LDS.
- Sistema de protección catódica.
 - Controlador SPC.

4.9.2.2.- Adquisición de las señales del proceso analógicas y digitales.

La adquisición de señales analógicas se realiza mediante lazos de corriente de 4 a 20 mA de los sensores acústicos, los cuales llegan a la RTU del sistema SCADA. En la figura 25 “arquitectura de control” están indicados los instrumentos conectados con estas señales.

La adquisición de señales digitales se realiza mediante las salidas seriales de los controladores del sistema LDS y del SPC, los cuales llegan a la RTU del sistema SCADA. En la figura 25 “arquitectura de control” están indicados los sistemas conectados con estas señales.

4.9.2.3.- Sistema de comunicación SCADA.

La RTU se comunicará a la sala de control mediante un protocolo abierto con el MTU de tal forma que el operador tendrá toda la información que le permitirá supervisar y controlar los sistemas y parámetros operacionales desde el HMI de su estación de operación. Los equipos que intervienen directamente sobre el proceso de transferencia de combustible son:

- Sistema de detección de fugas.
- Sistema de protección catódica.
- Sistema de control de procesos.

Cada uno de estos sistemas e instrumentos deberán comunicarse con la RTU y se enviará vía red al MTU de la sala de control mediante cable UTP.

- La comunicación con un protocolo abierto de la unidad controladora del LDS con la RTU se realizará mediante una conexión serial RS-485 a dos hilos.

- La comunicación con un protocolo abierto de la unidad controladora del SPC con la RTU se realizará mediante una conexión serial RS 232 a dos hilos.
- La comunicación con la instrumentación del sistema de control de proceso con la RTU será analógica de 4-20 mA.

4.9.3.- Sistema de detección de fugas (LDS) por el método de ondas acústicas de presión negativa

Este método se basa en el análisis de las variaciones de presión y su expansión cuando ocurre la fuga en una tubería, en donde al salir el producto por la pared de la tubería se produce una despresurización y represurización inmediata de unos pocos milisegundos. La baja de presión viaja a la velocidad del sonido a través del líquido en ambas direcciones hasta llegar a cada extremo de la línea, llegando más rápido al punto más cercano de la fuga, la evidencia de tiempo registrado en cada extremo de la línea de control o segmento produce una variación de tiempo medida que nos dará la ubicación de la fuga, tal como se observa en la figura 26.

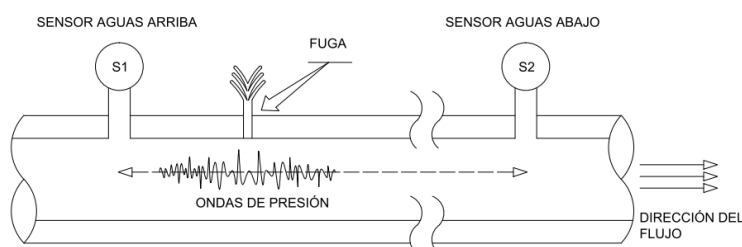


Figura 25. Detección de fugas por onda de presión negativa

Fuente: Propia.

Cuando el evento de fuga sea detectado, inmediatamente se activará la alarma sonora y al mismo tiempo se enviará la señal al operador a través del SCADA, y

este advertirá a la tripulación del buque para que procedan a detener el bombeo y cerrar la válvula respectiva ubicada en la caja de válvulas N°1.

En el caso de que la tubería no esté operando y se presente un evento que origine una fuga, no habrá peligro de contaminación ya que está establecido operacionalmente que la tubería esté llena de agua mientras no esté en operación.

4.9.4.- Filosofía de control

La arquitectura del LDS es distribuida y modular de lazo simple del tipo sensor-controlador-actuador, pero centralizada en la unidad de comando. Los sensores acústicos están ubicados en lugares estratégicos de la tubería mixta; ante cualquier evento de rotura o fisura de la tubería, se generan ondas de presión negativa u ondas de rarefacción, las cuales viajan a velocidades del sonido utilizando al líquido como medio de transporte; estas señales son detectadas por los sensores, luego transformadas en una señal estándar de 4 – 20 mA, y enviadas a la UC para el procesamiento de las señales. Las señales procesadas y reconocidas como ondas de fuga, son almacenadas en el UC con estampado del tiempo. Estas señales, son remitidas al RTU del sistema SCADA y posteriormente al MTU de la sala de control, para ser mostradas en pantallas sinópticas en el monitor del sistema.

En el caso específico de este proyecto, el LDS podrá detectar el evento de fuga y el punto de origen debido por los sensores instalados en el extremo sumergido de las tuberías de 14" y de 8". Por consiguiente, en las tuberías que se conectan con las de 12" y 6" que están dentro de la planta, se instalarán, dos sensores en cada una de las tuberías, distanciados 50 m entre sí, de tal forma que el LDS pueda discriminar si el evento ocurre del lado de la planta o del lado de la instalación que está fuera de la planta.

En la figura 27 se muestra una ilustración del método propuesto, donde se aprecia en forma esquemática lo descrito en esta sección.

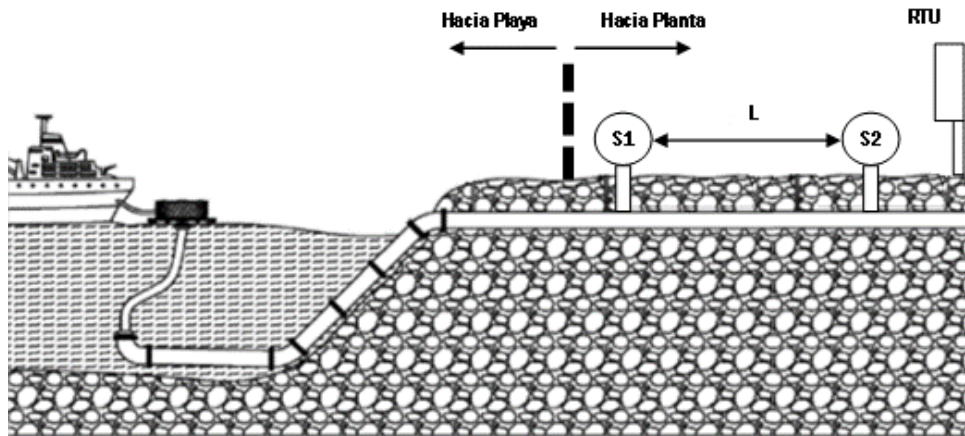


Figura 26. Instalación del LDS por ondas acústicas de presión negativa

Fuente : Propia.

Los posibles escenarios de eventos de fuga serían los siguientes:

- Si el evento ocurre fuera de la planta del Consorcio Terminal, la onda de acústica lo recibirá primero el sensor S1 y posteriormente el sensor S2; la unidad controladora del LDS realizará el cálculo, considerando la distancia L entre los sensores S1 y S2, para determinar si el evento ocurrió fuera de la planta (del lado de la playa) o entre S1 y S2.
- Si el evento ocurre del lado de la planta del consorcio terminal, la onda de presión lo recibirá primero el sensor S2 y posteriormente el sensor S1; la unidad controladora del LDS realizará el cálculo correspondiente, considerando la distancia L entre los sensores S1 y S2, para determinar si el evento ocurrió en la planta o entre S1 y S2.

Cuando el evento ocurre entre los dos sensores, el LDS podrá localizar la fuga con una exactitud equivalente al 2% de la longitud del tramo de la tubería entre S1 y S2 (L).

En resumen, el LDS estará en condiciones de discriminar si el evento ocurre entre el extremo sumergido de las tuberías y el sensor S1 o entre los dos sensores S1 y S2 o entre el sensor S2 y la planta.

4.10.- Procedimientos y pruebas realizadas al sistema de tuberías mixto

4.10.1.- Prueba neumática a tubería spool de acero al carbono

Este Procedimiento tiene como objetivo explicar las fases de control e inspección para las pruebas neumáticas a tuberías de acero, elaborado de acuerdo a los estándares según Norma ISO 9001 versión 08.

Los equipos, herramientas y materiales que se usan en la prueba neumática son las siguientes:

Equipos y Herramientas:

- Compresora industrial de 150 CFM.
- Manómetros de glicerina de 0 – 400 psi, de 2” y/o 4” de diámetro.
- Extintores de PQS
- Llaves de boca de 11, 12, 13 y 14mm.
- Llaves de tubo 14”, 18” y 24”.
- Martillos de bola de 8 Libras.
- Mangueras de alta presión (150 Psi), de 2” de diámetro.
- Válvulas de ½”, ¾”, 1” y 2” de Bronce, conexión NPT, 400 – 600 Psi.
- Niples de ½”, ¾”, 1” y 2”, acero negro, conexión NPT, 400 – 600 Psi.
- Tapón de ½”, ¾”, 1” y 2”, acero negro, conexión NPT, 400 – 600 Psi.

- Bandejas antiderrames

Materiales:

- Agua
 - Jabón
 - Teflón de ½" y 1".
- a) Posterior al armado y construcción de spool de acero de 14"Ø y 8"Ø, se tiene la necesidad de probar la hermeticidad de los mismos, mediante pruebas de fuga neumáticas, estas se realizarán a una presión máxima de 110 psi. El tiempo de la prueba neumática será de 2 horas.
- b) La ejecución de la prueba hidrostática fue con los siguientes pasos:
- Preliminarmente, en ambos extremos de los subvarillones del spool tipo H se soldarán tapas de 15" Ø (para la tubería de 14" Ø) y 9" Ø (para tubería de 8" Ø), estas tapas se prefabricarán con plancha de ¾" espesor y con un cople de 2" x 300 lbs concéntrico.
 - Limpiar la superficie de cualquier material sólido (piedra, acero, etc.) que pudiera dañar el revestimiento de los mismos durante la expansión de las tuberías por efecto de la presurización.
 - Instalación de válvulas, manómetros, niples y accesorios en los extremos del spool.
 - Ubicar compresor 150 CFM, por un extremo del spool a probar.
 - Instalación de cintas de sujeción para aseguramiento de las conexiones de la manguera – compresor y manguera – tubería.
 - Conexión de sistema de presurización (compresor, manguera y tubería).
 - Se apertura la válvula de alimentación para el ingreso de aire al spool.

- Se alimentará aire al sistema hasta alcanzar la presión de prueba de 100 psi.
- Alcanzada la presión de prueba, se procederá a cerrar las válvulas de alimentación.
- Colocar un tapón de 2" en la válvula de alimentación para asegurar la hermeticidad del sistema durante la prueba 2 horas como mínimo.
- Durante la prueba, se procederá a inspeccionar cada una de las juntas soldadas, esto mediante la aplicación de solución acuosa de jabón, para descartar fuga de aire y el inspector deberá llenar el registro.
- De no encontrar filtración de aire a través de las juntas soldadas, se continuará con la prueba hasta completar el tiempo requerido.
- De tener alguna filtración a través de las juntas se dará por abortada la prueba y se procederá a despresurizar la línea, para reparar el punto de falla en la línea y reiniciar nuevamente la prueba.
- La Prueba concluirá a satisfacción, si la presión se mantiene constante, por encima de la presión establecida o si hay una pérdida de presión menor (la presión no debe ser menor a la presión establecida de la prueba), justificada por el descenso de la temperatura y soportadas por la ausencia de fugas en las juntas o en algún punto del recorrido del spool.
- Los resultados de la prueba neumática se encuentran detallado en el registro R-01 de Calidad en el apéndice G.
- A continuación, se muestra en la figura 28 un esquema típico para inyección de aire en varillones de tubería de acero al carbono.

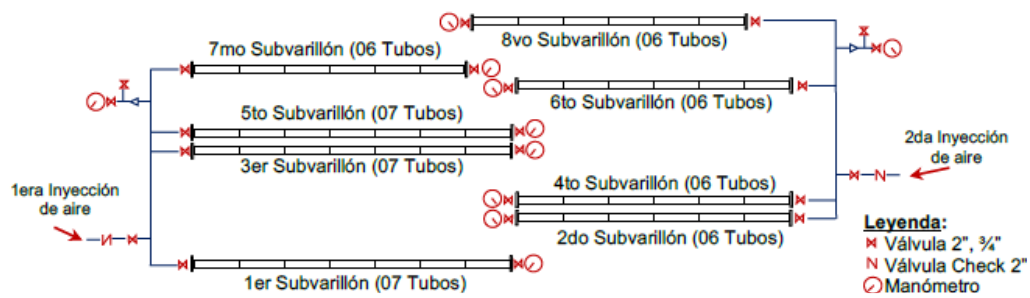


Figura 27. Esquema de inyección de aire en varillones de acero al carbono

Fuente. Propia

4.10.2.- Prueba hidrostática a tubería spool de fibra de vidrio de 6"x 12" y al spool de sistema mixto 6"x 8 "y 12" x 14"

Este procedimiento tiene como objetivo explicar las fases de control e inspección de pruebas hidrostáticas, elaborado de acuerdo a lo establecido por el DS-081-2007-EM y los estándares según Norma ISO 9001.

La presión de las pruebas será a 206 psi, que es el 1,25 veces la máxima presión permisible de operación (165 psi), el tiempo de la prueba hidrostática será de 4 horas , tan igual que se realizará para la prueba hidrostática de liner de FRP insertado dentro de la carcaza de acero con concreto cementicio.

Los equipos, herramientas y materiales que se usan en la prueba hidrostática son las siguientes:

Equipos y Herramientas:

- Camión cisterna de agua de 4000 galones
- Empaques Garlock de 1/4" de espesor
- Llaves de tubo de 3/4", 1" y 1 1/2".
- Mangueras de alta presión (150 psi), de 2" de diámetro.
- Manómetros de glicerina de 0 – 300 psi.

- Bomba de Alta Presión (300 psi)
- Bitácora Barton, registrador de Presión y Temperatura (0 – 500 psi).
- Caps de acero, con doble orificio roscado de 2"Ø y 1"Ø.
- Brida Ciega de 14" clase 150, con conexiones soldadas.
- Brida Ciega de 8" clase 150, con conexiones soldadas.
- Pernos 7/8" x 7,5" de largo

Materiales:

- Lijas, Espátulas, Trapo industrial, Teflón de ½" y 1".
 - Extintores de PQS
 - Bandejas antiderrames
- a) Posterior al armado y construcción de los spool de FRP de 12" y 14", se realizará las pruebas hidrostática, cuya prueba asegurará la hermeticidad del spool, en sus respectivas uniones de campana – espiga de los tubos FRP.
 - b) El procedimiento de armado y soldeo de la junta química en las tuberías de FRP fue el siguiente:
 - Se realiza la limpieza de las superficies a pegar (limpieza de la campana y de la espiga), con un lijado suave y luego con acetona, para retirar cualquier vestigio de grasa en las superficies. Para la limpieza con acetona se emplea retazos de tela de 100% algodón.
 - Se instalarán los accesorios del equipo de juntas a presión en los tubos a unir (grapasa, brazos pistón, etc.).
 - Para la soldadura química entre tuberías de FRP, se usa el componente kits de resina epóxica Hunstman Araldite Epibond 200 A/B y su catalizador mezclado homogéneamente, lo cual quedara evidenciado al no encontrar las

coloraciones iniciales de ambos compuestos (negro y plomo) y se tendrá la precaución de aplicarlos en las superficies en el menor tiempo posible de 5 a 7 minutos, debido a que la mezcla podría iniciar el proceso de curado sin estar entre las superficies.

- Se aplicará la mezcla epóxica homogéneamente en las superficies, procurando la proporción de 2 a 1 (dos tercios en la espiga y un tercio en la campana).

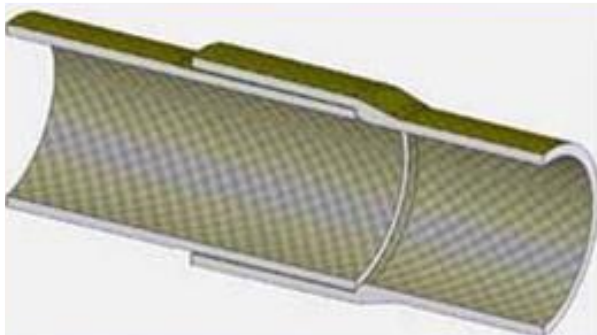


Figura 28. Junta en tubería FRP espiga –campana

Fuente. Propia

- Luego de aplicada la mezcla se procede a la inserción de la espiga en la campana, con un mazo de goma se golpeará la campana del tubo que tiene la espiga untada, de manera que la espiga llegue al tope interno de la campana conectada con ayuda del equipo de juntas de presión .



Figura 29. Grapas para junta a presión para unión de tuberías FRP

Fuente: Propia

- La presión de instalación con grapa hidráulica será de 1 500 psi para el tubo FRP de 6" y de 2 500 para tuberías de 12", temperatura aplicada de 70° C.
 - Hecha la junta epóxica, se procede a limpiar los excesos de mezcla sobresalientes a la junta.
 - Se instala una manta térmica que ayude a optimizar el tiempo de curado, ésta deberá ser revisada constantemente para evitar dañar el revestimiento del tubo FRP por la acción del calor.
 - Se dejará curar la junta entre 5 a 10 minutos, se podrá retirar la manta una vez que el epóxico expuesto se haya plastificado.
 - El tiempo de curado total de la mezcla epóxica en la junta, es de alrededor de los 50 minutos, durante ese tiempo la junta no deberá soportar esfuerzos o tensiones que provoquen movimientos o desplazamientos.
 - Luego de esto se retiran las grapas y cadenas de la junta.
- c) Una vez realizadas todas las conexiones de hermetización, se instalarán las conexiones de alimentación y de control que permitan ejecutar la prueba, a continuación, el proceso de prueba de presión hidrostática:

- Instalación del árbol de pruebas en la conexión de 1", este árbol de prueba consta de ramificaciones para la purga del aire y conexión de manómetro, abrir la válvula de conexión de 1" para purgar el aire durante la alimentación.
- Se procede al llenado de agua de la tubería a ser probada; una vez llenada la línea, cerrar la válvula de 1".
- Purgado el aire de la tubería, se cierra la válvula de 1" y se instala el manómetro para controlar la estabilización de presión, para luego ser aperturada nuevamente la válvula de conexión de 1".
- Se presuriza la línea durante al menos 4 horas que permita homogenizar las temperaturas del agua alimentada con la temperatura del recipiente a probar y estabilizar la presión, caídas de presión por mínimas bolsas de aire. La presurización debe ser lenta, al alcanzar el 70% de la presión de prueba (144 psi) se debe inyectar agua a una tasa de llenado donde el incremento de presión sea de 10 psi por minuto aproximadamente o menor, para una mejor estabilización de la presión.
- Estabilizada la presión en la tubería se procede a inyectar más agua al sistema, hasta llegar a la presión de prueba, a su vez esta estabilizará la presión de todo el sistema. El proceso de estabilización puede durar hasta 24 horas, esto dependerá del diámetro y la longitud a ser probada, mientras mayor sea el diámetro y longitud del tramo, mayor tiempo de estabilización será requerido.
- Estabilizada la presión se procede a desconectar la manguera de alta presión y las conexiones de martillo y se coloca un tapón en la válvula de 2".

- Se instala en la conexión de 1" el manómetro, donde se monitoreará el comportamiento de la presión respecto al tiempo para todas las pruebas se generará un protocolo para el registro de la presión. La presión de prueba será de 206 psi y el tiempo de prueba no será menor a 4 horas, se realizará mediciones cada 15 minutos y se llenará en el respectivo protocolo en caso de una variación negativa en la presión cuando ésta llegue al 20% de la presión de prueba (es decir baje a 165psi); la presión en la línea podrá ser incrementada hasta en 3 oportunidades, hasta alcanzar la presión de prueba, sin que esto prolongue la duración total de la prueba. Si por el contrario la presión se incrementara excediendo el 10% de la presión de prueba (se incremente hasta 226 psi), esta deberá aliviarse cuantas veces sea necesario hasta llegar a la presión de prueba.
- Finalizada satisfactoriamente la prueba se cerrará la válvula de 1", se retirará el tapón de 2" y se despresurizará la línea.
- Los resultados de las pruebas hidrostáticas se encuentran detallados los registros R-01 Y R-02 de calidad en el apéndice H y apéndice I respectivamente.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1.- Presentación de resultados

5.1.1.- Análisis de costos

Analizaremos el costo del sistema de tuberías de acero al carbono vs el sistema de tuberías mixto conformado por fibra de vidrio, acero y concreto, mediante unas hojas de cálculo en Excel ingresaremos los datos que serán los precios unitarios (dólares) de cada sistema, así dar con el costo directo de manera independiente de cada sistema.

Para finalmente concluir mediante una comparación aritmética para conocer la diferencia económica del costo, la fuente usada para los precios unitarios es de la revista especializada en la construcción de costos del S10, edición 307/ agosto-setiembre 2020.

5.1.1.1.- Precio unitario del uso de tuberías de acero al carbono del sistema simple existente.

Presupuesto **Sistema de tuberías de acero al carbono**
 Cliente **Consortio Terminales**
 Lugar **Ilo**

Item	Descripción	Unid	Cantidad	Precio unitario \$	Total \$
1.0	Tubería de acero al carbono				
1.1	API SPEC 5L Gr. X B, 12" Ø schule 30 (espesor=0,330"), PSL 2 x 12m	m	601.80	30.00	18 054.00
1.2	API SPEC 5L Gr. X B, 6" Ø schule 30 (espesor=0,250"), PSL 2 x 12m	m	601.80	20.00	12 036.00
2.0	Brida				
2.1	ASTM A-105, ANSI B.16.5, clase 150, 12" Ø	pza	8	50.00	400.00
2.2	ASTM A-105, ANSI B.16.5, clase 150, 6" Ø	pza	8	50.00	400.00
3.0	Válvula de bola				
3.1	ASTM A-216, 12"	pza	1	200.00	200.00
3.2	ASTM A-216, 6"	pza	1	120.00	120.00
4.0	Valvula retención (chek valve)				
4.1	ASTM A-350, clase 150, 14" Ø	pza	1	300.00	300.00
	Costo directo				31 510.00

Figura 30. Costos de tuberías y accesorios de 12" Ø y 6" Ø de acero al carbono

Fuente: Propia

Presupuesto **Sistema de tuberías de acero al carbono**
 Cliente **Consortio Terminales**
 Lugar **Ilo**

Item	Descripción	Unid	Cantidad	Precio unitario \$	Total \$
1.0	Recubrimiento con pintura epoxica alto contenido solido, espesor 15 mils.				
1.1	Tubería acero API SPEC 5L Gr.X B, 12" Ø	m2	683.00	42.00	28 686.00
1.2	Tubería acero API SPEC 5L Gr. X B, 6" Ø	m2	415.00	42.00	17 430.00
2.0	Inspección anual a ductos de 6" y 12" Ø	día	3	3 500.00	10 500.00
	Costo directo				56 616.00

Figura 31. Costo de recubrimiento de pintura e inspección a tuberías y accesorios de 12" Ø y 6" Ø de acero al carbono

Fuente: Propia

El costo total del sistema simple existente es de \$88 126,00 dólares.

5.1.1.2.- Precios unitarios del uso de tuberías de sistema mixto.

La fuente usada para los precios unitarios, es de la revista especializada en la construcción de costos del S10, edición 307/ agosto-setiembre 2020.

Presupuesto	Sistema de tuberías mixto				
Cliente	Consortio Terminales				
Lugar	Ilo				
Item	Descripción	Unid	Cantidad	Precio unitario \$	Total \$
1.0	Tubería de acero al carbono				
	API SPEC 5L Gr. X B, 14" Ø schule 30				
1.1	(espesor=0,375"), PSL 2 x 12m	m	601.80	40.00	24 072.00
	API SPEC 5L Gr. X B, 8" Ø schule 30				
1.2	(espesor=0,277"), PSL 2 x 12m	m	601.80	25.00	15 045.00
2.0	Brida				
2.1	ASTM A-105, ANSI B.16.5, clase 150, 14" Ø	pza	8	70.00	560.00
2.2	ASTM A-105, ANSI B.16.5, clase 150, 8" Ø	pza	8	50.00	400.00
3.0	Válvula de bola				
3.1	ASTM A-216, 14"	pza	1	250.00	250.00
3.2	ASTM A-216, 8"	pza	1	150.00	150.00
4.0	Valvula retención (chek valve)				
4.1	ASTM A-350, clase 150, 14" Ø	pza	1	300.00	300.00
	Costo directo				40 777.00

Figura 32. Costos de tuberías y accesorios de 14" Ø y 8" Ø de acero al carbono

Fuente: Propia

Presupuesto	Sistema de tuberías mixto				
Cliente	Consortio Terminales				
Lugar	Ilo				
Item	Descripción	Unid	Cantidad	Precio unitario \$	Total \$
1.0	Recubrimiento con pintura epoxica alto contenido solido, espesor 15 mils.				
	Tubería acero API SPEC 5L Gr.X 42, 14" Ø				
1.1	(espesor 0.375"), PSL 2	m2	683.00	9.75	6 659,25
	Tubería acero API SPEC 5L Gr. X 42, 8" Ø				
1.2	(espesor 0.277"), PSL 2	m2	415.00	9.75	4 046,00
2.0	Cementación concreto fc=100 kg/cm2				
	Tubería 12" Ø x 14" Ø	m3	9.0	350.00	3 150,00
	Tubería 6" Ø x 8" Ø	m3	8.5	350.00	2 975,00
	Costo directo				16 830,50

Figura 33. Costos de recubrimiento de 3LPE y Cementación Anular en tuberías y accesorios del sistema mixto 14" Ø x 12" y 8" Ø x 6" Ø

Fuente: Propia

Presupuesto **Sistema de tuberías mixto**
 Cliente **Consortio Terminales**
 Lugar **Ilo**

Item	Descripción	Unid	Cantidad	Precio unitario \$	Total \$
1.0	Tubería de resina epóxica con fibra de vidrio				
1.1	Diametro nominal 12" EST16 (espesor=4.6mm) (225 psi)	m	596,70	20,00	11 934,00
1.2	Diametro nominal 6" EST16 (espesor=3.2mm) (225 psi)	m	596,70	15,00	8 950,50
2.0	Brida de resina epóxica con fibra de vidrio				
2.1	Diametro nominal 12", sin orificios (232 psi) ANSI 150	pza	6	25,00	150,00
2.2	Diametro nominal 6", sin orificios (232 psi) ANSI 150	pza	6	25,00	150,00
	Costo directo				21 184,50

Figura 34. Costos de tuberías y accesorios de 12" Ø y 6" Ø de fibra de vidrio

Fuente: Propia

El costo total del sistema mixto planteado es de \$78 792,00 dólares

5.2.- Discusión de resultados

Apoyados en la descripción de materiales, cantidades y precios unitarios podemos identificar que existe una diferencia del 10,6% entre sistema convencional y el sistema mixto.

De la comparación en costos del sistema de tuberías de acero al carbono (\$ 88 126,00 dólares) vs sistema de tuberías mixto (\$ 78 792,00 dólares) conformado por fibra de vidrio, acero y concreto si existe una diferencia de \$ 9934,00 dólares.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.- Conclusiones

Primera. Los cálculos hidráulicos procesados de la tubería de fibra de vidrio de 300 mm de diámetro interno pueden manejar los caudales de 3 500 bbl/h de petróleo industrial 500 y 5 000 bbl/h de diésel B5 S50, para los fluidos.

Segunda. La tubería “flushing” tendrá capacidad para manejar los 1 200 bbl/h de agua a una presión de descarga de la bomba de “flushing” de 45 psi, sin exceder la máxima caída de presión y velocidad permisibles de 3 psi/100 pie y 15 pies/s, respectivamente.

Tercera. Diámetros de tuberías de acero es el correspondiente a un SCH 30, es decir, 0,277" tubería de 8" de diámetro y de 0,375" para la tubería de 14". Según esta condición, la tubería de 14" SCH 30 puede soportar una presión interna de 1 620 psi y la de 8" SCH 30 una presión interna de 1 942,34 psi.

6.2.- Recomendaciones

Primera. Se recomienda a la empresa Consorcio Terminales planificar la implementación para reemplazar las tuberías de acero por el sistema mixto propuesto, debido a que ejecutará reposiciones constantes por corrosión con el consiguiente efecto negativo en las operaciones.

Segunda. Para la etapa de implementación del reemplazo de tuberías por un sistema mixto, se recomienda seguir lo indicado en la evaluación técnica para lo cual fue proyectado cumpliendo con la normativa técnica peruana e internacional.

Tercera. Se recomienda a la empresa Consorcio Terminales, investigadores y proyectistas seguir la investigación planteada y tomarla como base de estudio para disminuir el costo por mantenimiento y reparaciones en la descarga de combustibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM Internacional (2003). *Especificaciones para concreto pre-mezclado ASTM-C-94*. Estados Unidos.
- ASTM Internacional (2003). *Método para preparar y curar testigos de concreto para pruebas a la compresión y flexión en el campo ASTM-C-31*. Estados Unidos.
- ASTM Internacional (2019). *Concrete Test Specimens in the Laboratory ASTM C192*. Estados Unidos.
- ASTM Internacional (2012). *Especificación normalizada para barras de acero al carbono lisas y corrugadas para refuerzo de concreto ASTM A615/A615M*. Estados Unidos.
- ASTM Internacional (2014). *Especificación normalizada para acero al carbono estructural ASTM A36/A36M*. Estados Unidos.
- ASTM Internacional (2018). *Especificación estándar para pernos, espárragos y varilla roscada de acero al carbono de 60 000 psi de resistencia a la tracción ASTM A307*. Estados Unidos.
- Chavarria, R. (2007). Recuperado de www.imeel.mx/boletín032007/art005.pdf.
Mexico
- CNE Nacional (2006). *Código nacional de electricidad DS-081-2007-EM (2007)*.
Peru.
- Eslinger, David (1999). “La lucha contra las incrustaciones – Remoción y prevención”. Recuperado de www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/p30-49

Grace, W. (1978). Recuperado de

www.fim.um.ichmx/teach/gsolorio/notas/capitulo%204.pdf.

ISO Organización Internacional de la Normalización (2012). *Industria del Petróleo, petroquímica y del gas natural. Protección Catódica de los sistemas de transporte por tuberías ISO 15589-2. Parte 2: Tuberías marinas*. Ginebra, Suiza.

ISO Organización Internacional de la Normalización (2015). *Industria del Petróleo, petroquímica y del gas natural. Protección Catódica de los sistemas de tuberías ISO 15589-1. Parte 1: Tuberías terrestres*. Ginebra, Suiza.

Ministerio de Energía y Minas (1994). *Reglamento de Seguridad para el Transporte de Hidrocarburos por ductos DS-026-94-EM*. Perú

Ministerio de Energía y Minas (2006). *Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos DS-015-2006-EM*. Perú

Ministerio de Vivienda y Saneamiento (2006). *Cargas. Normas Técnica de Edificación. N.T.E E.020*. Perú.

Ministerio de Vivienda y Saneamiento (2016). *Diseño sismo resistente Saneamiento. Normas Técnica de Edificación N.T.E. E 030*. Perú.

Ministerio de Vivienda y Saneamiento (2009). *Concreto armado. Normas Técnica de Edificación N.T.E E.060*. Perú.

Ministerio de Vivienda y Saneamiento (2015). *Diseño en acero. Normas Técnica de Edificación N.T.E E.090*. Perú.

McCormac, J. y Csernak, S. (2012). *Diseño de estructuras de Acero*. Quinta Edición, Editorial Alfa omega. México.

Petro Perú (2018). Recuperad de

www.permisos.petroperu.com.pe/Bocs/spa/files/tsur-taser-es.pdf

Presidencia del Consejo de Ministros (2012). *Tupa Osinergmin DS 045-2012-PCM*. Perú.

Rosario Francia, S. (2004). *Revista del Instituto de Investigación, FIGMMG Vol.7*
– *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. Lima.

Wenner, F. (1915). *Sistema de Puesta a Tierra*. Estados Unidos de América.