

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DISEÑO DE UN TANQUE VERTICAL DE TECHO FIJO CON CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE 200.000 GALONES DE PETROLEO CRUDO

Jeisson Stiveen Rozo Ulloa
20191375030

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Proyecto Curricular de Tecnología Mecánica e Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C, Colombia.
2023

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DISEÑO DE UN TANQUE VERTICAL DE TECHO FIJO CON CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE 200.000 GALONES DE PETROLEO CRUDO

Jeisson Stiveen Rozo Ulloa

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:
INGENIERO MECÁNICO

Director del proyecto
Ing. Alexander Alvarado Moreno

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Proyecto Curricular de Tecnología Mecánica e Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C, Colombia.
2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Director del Proyecto
Alexander Alvarado Moreno

_____

Jurado
Por Asignar

Bogotá, D.C, septiembre de 2023

“For God so loved the world that He gave His only begotten Son, that whosoever believeth in Him should not perish, but have everlasting life.”.

(KJ21) John 3:16.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios por su gracia y compañía recibida, en efecto (éxodo 33:14), todo resulto bien. A mis padres Eduardo y Mariana por su comprensión, formación, estimulo y su cariño lo cual forjo mi carácter, A la universidad y a la academia por el conocimiento impartido. A mis docentes por sus enseñanzas y por haber brindado todos sus conocimientos en pro de mi desarrollo profesional. Y a mis amigos.

Tabla de Contenidos

RESUMEN 11
INTRODUCCIÓN 12
1. OBJETIVOS 14
1.1. OBJETIVO GENERAL 14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 15
3. JUSTIFICACIÓN 18
4. ESTADO DEL ARTE – ANTECEDENTES 19
5. MARCO TEÓRICO 22
5.1. PETRÓLEO. 22
5.3. TANQUES DE ALMACENAMIENTO. 23
5.4. TIPOS DE TANQUES. 23
5.4.1. Tanques atmosféricos. 23
5.4.2. Tanques a presión. 25
5.5. TANQUES DE ALMACENAMIENTO CON ESTÁNDAR API 650. 27
5.6. CORROSIÓN Y PROTECCIÓN CATÓDICA. 27
5.7. SOLDADURA. 29
5.8 RESISTENCIA DE MATERIALES 31
5.8.1. Esfuerzo axial o normal. 31
5.8.2. Esfuerzo cortante. 32
5.8.3. Esfuerzo circunferencial 33
6. METODOLOGÍA PROPUESTA 34
7. RESULTADOS - DISEÑO DE TANQUE BAJO ESTÁNDAR API 650 35
7.1. CONDICIONES INICIALES DE DISEÑO 35
7.2. DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE 36
7.2.1. Diámetro Y Altura 36
7.3. PREVENCIÓN DE SOBRELLENADO 38
7.3.1. API 2350 38
7.3.2. Nivel máximo de trabajo (V. MW) 39
7.3.3. Alta Alta (V. HH) 39
7.3.4. Alto critico (V. CH) 39
7.3.5. Altura Efectiva. 40
7.4. SELECCIÓN DE MATERIALES 40
7.5. DISEÑO DE ENVOLVENTE 43
7.5.1. Método de un pie. 43
7.5.2. Método de punto variable. 43
7.5.3. Tolerancia a la corrosión. 44
7.5.4. Cálculo de los anillos 45
7.5.5. Dimensiones de láminas. 48
7.5.6. Orientación y distribución de lamina 50
7.5.7. Masa de la envolvente 51
7.6. DISEÑO Y CÁLCULO DEL FONDO 52

7.6.1. Fondo Anular. 53
7.6.2. Fondo interior. 56
7.6.3. Distribución de láminas. 56
7.6.5. Sumideros. 58
7.7. DISEÑO DEL TECHO 61
7.7.1. Techo Tipo Domo 61
7.7.2. Cargas. 62
7.7.4. Masa del Techo del tanque 68
7.8. DISEÑO DE VIGAS DE REFUERZO 69
7.8.1. Altura no Reforzada 71
7.8.2. Altura Transformada. 72
7.8.3. Módulo de sección y selección de perfil. 74
7.8.4. Masa de viga de refuerzo. 75
7.8.5. Distribución y orientación. 75
7.9. ESTABILIDAD DE VOLTEO 77
7.9.1. Masa total del tanque. 77
7.9.2. Criterios de estabilidad. 78
7.9.3. Cálculo de cargas y momentos. 79
7.9.4. Anclajes. 82
7.10. CONEXIONES. 83
7.10.1. Condiciones para la ubicación de boquillas. 84
7.10.2. Diseño de conexiones. 86
7.11. ACCESORIOS 98
7.11.1. Terminal de conexión a tierra. 98
7.11.2. Plataformas. 98
7.12. JUNTAS SOLDADAS. 101
7.12.1. Especificación del Procedimiento de Soldadura. 101
7.12.2. Variables. 102
7.12.3. Soldadura Por Arco Metálico Protegido (SMAW). 103
7.12.4. WPS 103
7.13. PROTECCION CONTRA LA CORROSION. 114
7.13.1. Protección Catódica. 115
7.13.2. Sistema de Recubrimientos Acorde a la norma ISO 12944. 121
7.14. DATA SHEET 129
8. ANALISIS DE RESULTADOS. 130
8.1. SIMULACION CAD. 130
8.4.1. Estrés Von-Mises Equivalente. 134
8.4.2. Deformación. 135
9. CONCLUSIONES 137
Anexos 142

Lista de Tablas

Tabla 1. Participación en los ingresos de la nación 2008-2018 (billones COP). Adaptado de (Asociación Colombiana del Petróleo, 2017).....13
Tabla 2. Producción media en barriles de petróleo por día (GTE) del campo Costayaco y Moqueta. Fuente: (Valora Analitik, 2021).....16
Tabla 3. Condiciones ambientales de Mocoa.....35
Tabla 4. Tamaños típicos y capacidades nominales de tanques con anillos de 1800 mm. Fuente: norma API650, anexo A Tabla A.1a 37
Tabla 5. Capacidades seleccionadas de la Tabla 4. 38
Tabla 6. Niveles establecidos para el tanque. 40
Tabla 7. Cálculo de anillos. 47
Tabla 8. Espesores mínimos de las planchas del cuerpo según la norma API 650. 48
Tabla 9. Dimensiones de láminas.....50
Tabla 10. Espesores para fondo anular. Criterios tomados de la sección 5.5 - tabla 5.1a. Adaptada del estándar API 650. 54
Tabla 11. Dimensiones de sumideros de extracción. Fuente: Adaptado de la tabla 5.16a de la norma API 650. 59
Tabla 12. Alturas del cuerpo del tanque transformada por hileras y total.....73
Tabla 13. Requisitos mínimos para soldaduras de boquillas en el cuerpo. Fuente: API650. Sección 5.7. Fig. 5.6. 85
Tabla 14. Dimensiones para boquillas sobre el cuerpo del tanque. Fuente: API650. Sección 5.7. Tabla. 5.6ª.....88
Tabla 15. Diámetros necesarios para diseño de manhole. Fuente: API 650, tabla 5.5a, dimensiones en milímetros. 90
Tabla 16. Espesor de tapa cubierta y brida para manhole. Fuente: API650 Sec. 5.7 tabla 5.3a. 90
Tabla 17. Listado de boquillas TK-001. Elaboración propia. 92
Tabla 18. Medias generales boquillas cuerpo. Elaboración propia.....92
Tabla 19. Dimensiones para boquillas bridadas de techo. Fuente: API 650, tabla 5.14a.....94
Tabla 20. Medias generales boquillas techo. Elaboración propia.....95
Tabla 21. Dimensiones para manhole de techo. 95
Tabla 22. Variables para especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) – SMAW.....104
Tabla 23. Propiedades de materiales seleccionados. Elaboración propia.....105
Tabla 24. Corrosividad de ambientes típicos. Fuente: ISO 12944-2. 123
Tabla 25. Preparación de superficie. Fuente: Norma ISO 12944-5, Tabla B.1....124
Tabla 26. Selección de categoría. Fuente: Norma ISO 12944-5 125
Tabla 27. Sistemas de pinturas para acero al carbono y categoría C3. Fuente: Norma ISO 12944-5. Table C.3 126
Tabla 28. Tamaño de elementos según parte a analizar.....132

Lista de Figuras

Figura 1. Producción anual (promedio) de crudo entre años 1990 y 2019.....12
Figura 2. Localizaciones campos Costayaco y Moqueta. 16
Figura 3. Tanques de techo fijo.....24
Figura 4. Tanques de techo flotante. 24
Figura 5. Tanques cilíndricos verticales. 26
Figura 6. Tanques esféricos.....27
Figura 7. Esquema común de protección catódica para tuberías. 28
Figura 8. Procesos de soldadura y las técnicas afines. 30
Figura 9. Representación gráfica de un esfuerzo axial 31
Figura 10. representación gráfica de un esfuerzo cortante 32
Figura 11. Representación gráfica de un esfuerzo circunferencial.....33
Figura 12. Método de 1 pie. Descripción grafica 44
Figura 13. Conformación de anillos.....49
Figura 14. Ubicación de Juntas verticales.....51
Figura 15. Fondo anular.....55
Figura 16. Espaciamiento mínimo entre juntas del fondo. 57
Figura 17. Distribución de fondo seleccionada.....57
Figura 18. Sumidero de extracción. 59
Figura 19. Posición de los sumideros. 60
Figura 20. Diseño del techo domo - tipo sombrilla. Elaboración propia 63
Figura 21. Detalle conexión. 66
Figura 22. Detalle Preliminar unión techo – Angulo superior (sección Transversal). 68
Figura 23. Módulos de sección en vigas de refuerzo. Fuente: Tomado de la norma API 650 sección 5.9., Fig. 5.24. 71
Figura 24. Ubicación viga de refuerzo.....75
Figura 25. Distribución angular de viga de refuerzo con respecto a la 3ra hilera del tanque.....76
Figura 26. Verificación de vuelco para tanques auto anclados. 77
Figura 27. Requisitos mínimos para soldaduras de boquillas en el cuerpo. 83
Figura 28. Layout para medidas recomendadas para placas de refuerzo de boquillas.....86
Figura 29. Detalles Típicos de conexiones bridadas.....87
Figura 30. Detalle conexión boquilla N1.....87
Figura 31. Detalle manhole lateral. 89
Figura 32. Medidas Generales Manhole de cuerpo. 91
Figura 33. Boquilla para drenaje con arreglo de tubería. 93
Figura 34. Boquillas Bridadas de techo,.....94
Figura 35. Esquema para manhole de techo. 96
Figura 36. distribución de las boquillas en la envolvente y techo del tanque. 97
Figura 37. Terminal de conexión a tierra detalle. 98
Figura 38. Escalera vertical con jaula fija.....99

Figura 39. Placa de identificación. 100
Figura 40. QW-402 Juntas 106
Figura 41. QW-403 Metales Base 107
Figura 42. QW-404 Metales de Aporte.....109
Figura 43. QW-405 Posiciones. 110
Figura 44. QW-406 Precalentamiento. 111
Figura 45.QW-407 Tratamiento térmico posterior a la soldadura.....111
Figura 46. QW-409 características eléctricas.....112
Figura 47. QW-410 técnica. 114
Figura 48. Modelado Tanque 200.000 Gal (D 12m x H 7.2m).....130
Figura 49. Distribución de presión hidrostática en ANSYS 2023. 132
Figura 50. Mallado de modelo. 133
Figura 51. Distribución de esfuerzo equivalente Von-mises. 135
Figura 52. Deformación total (escala 240/1). 136

Lista de Anexos

Anexo A.....142
Anexo B.....143
Anexo C 144
Anexo D 145
Anexo E.....146

RESUMEN

En la industria de los hidrocarburos, el almacenamiento de crudo es parte esencial en la producción de petróleo y sus derivados, ya que este requiere un almacenamiento especial en todas sus fases (extracción y refinación) y el almacenamiento actúa como acumulador entre la producción y transporte, además, permite la sedimentación de agua y barros del crudo antes de despacharlo por oleoducto y brinda flexibilidad operativa a las refinerías.

En el presente trabajo, desarrollado para optar por el título de ingeniero mecánico llevo a cabo el diseño de un tanque vertical de techo fijo para el almacenamiento de crudo con una capacidad de 200.000 galones el cual se proyectó a 40 años en operación.

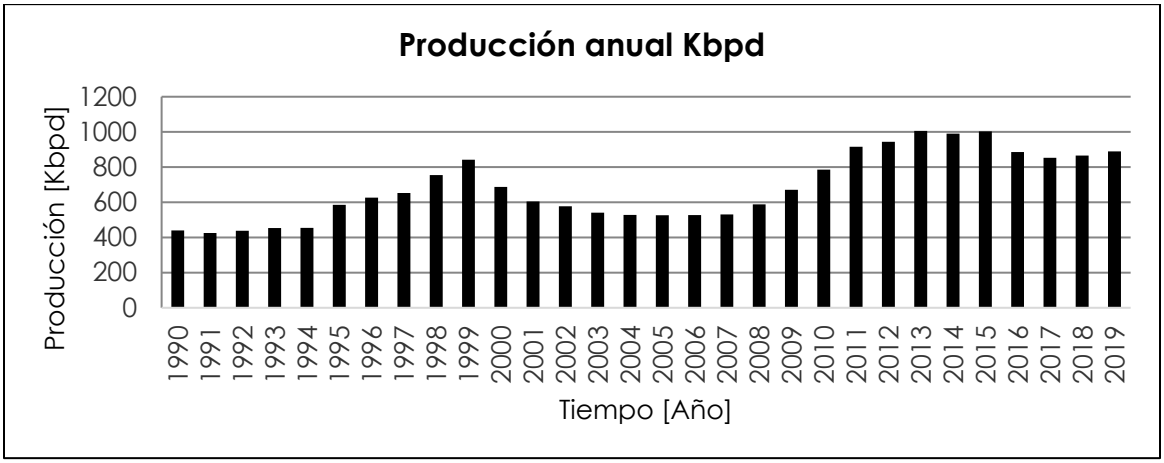
Para realizar un diseño optimo se tomaron en cuenta todas las consideraciones necesarias documentadas por el Instituto Americano de Petróleos (API) quien emite una serie de normas y estándares basados en la experiencia adquirida, dicha instituto recomienda utilizar, más específicamente, el código API 650 que regula el diseño y la construcción de tanques de acero con uniones soldadas para almacenamiento de petróleo a presión atmosférica.

Adicionalmente, se realizó un modelamiento y una simulación a través del software CAD/CAE Autodesk Inventor 2019 ® con versión estudiantil gratuita que permitió obtener datos adicionales que alimentaron un análisis más completo sobre mejores condiciones de diseño y de operación.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, según datos de (Asociación Colombiana del Petróleo, 2019), los pozos exploratorios pasaron de 53 en los años 1999 y 2000 a 485 pozos entre los años 2011 y 2014, por ende, en los últimos años, se ha aumentado la producción de crudo pasando de 610.000 BPDC (barriles de petrolero promedio día calendario) en el año 2000 a 790.000 BPDC en el año 2010 y terminando con una producción anual de 890.000 BPDC en el año 2019 como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Producción anual (promedio) de crudo entre años 1990 y 2019.



Fuente: (Asociación Colombiana del Petróleo, 2019)

Pero el desarrollo de la industria petrolera no solo se centra en el realce progresivo de sus actividades principales tal como la exploración, la producción, el almacenamiento y el transporte, sino también por ser uno de los sectores que más contribuye al desarrollo económico y social del país (Asociación Colombiana del Petróleo, 2019), pues no es de extrañarse que la industria de los hidrocarburos sea uno de las mayores contribuyentes de recursos a la nación y a las regiones donde operan las principales empresas dedicadas a la extracción y producción del petróleo y sus derivados.

Según la agencia nacional de hidrocarburos y el ministerio de hacienda en la última década (2008 – 2018) la industria de los hidrocarburos ha aportado más de $157 billones, a través del pago de impuestos, dividendos y derechos económicos de los contratos con la agencia nacional de hidrocarburos (ANH).

En la Tabla 1 se muestran los valores en billones de pesos que la industria petrolera aportó a la nación.

Tabla 1. Participación en los ingresos de la nación 2008-2018 (billones COP).

Año causado	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018 P
Impuesto de renta **($ billones)**	6,8	3,6	5,4	11,3	10,1	11,2	9,0	5,9	6,3	7,1	11,0
Dividendos de Ecopetrol ($ billones)	4,2	7,9	3,3	5,3	7	13,2	10,8	4,8	0,7	3,6	3,2
Derechos económicos contratos ANH	0,2	0,2	0,5	0,7	0,7	0,8	0,8	0,5	0,2	0,4	1,0
Total Aportes Gobierno Central	**11,18**	**11,67**	**9,17**	**17,24**	**17,81**	**25,28**	**20,46**	**11,24**	**7,22**	**11,1**	**15,2**
Ingresos corrientes Gobierno Central ($ billones)	65,0	65,7	67,4	84,4	96,3	101,8	109,0	117,1	118,0	132,4	136,0
% Aportes Gobierno Central	17%	18%	14%	20%	18%	25%	19%	10%	6%	8%	11%
Regalías causadas ($ billones)	5,4	3,8	5,5	8,2	8,6	8,2	7,8	5,2	3,9	5	6,5
Total Aportes al Estado	**16,63**	**15,48**	**14,66**	**25,43**	**26,38**	**33,46**	**28,26**	**16,44**	**11,15**	**16,1**	**21,71**

Fuente: Adaptado de (Asociación Colombiana del Petróleo, 2019)

Con toda la responsabilidad para desarrollar las actividades referentes a la producción de petróleo y sus derivados, esta industria desarrolla con bastante cuidado cada una de las actividades, desde la explotación, la extracción, la producción hasta el transporte, de esta manera, en las empresas encargadas de llevar a cabo proyectos con hidrocarburos se hace necesaria la intervención de ingeniería especializada para garantizar el desarrollo con precisión seguridad y rentabilidad.

Para controlar estos procesos existen varios comités que a partir de normas regulan cada etapa para garantizar la seguridad y el continuo avance de la industria. Una de las organizaciones que regula el desarrollo de la industria del petróleo es el instituto americano de petróleos o API por sus siglas en inglés, fue formada en 1919 y su misión es promover la seguridad en toda la industria a nivel mundial e influir en las políticas públicas en apoyo de una industria de petróleo y gas natural estadounidense sólida y viable (American Petroleum Institute, 2023).

Durante más de 90 años ha desarrollado más de 700 estándares y debido a la confiabilidad su desarrollo, estas normas son las más citadas por la comunidad reguladora internacional. En la producción nacional de petróleo, el almacenamiento es parte vital en el proceso y está presente en 3 fases, estas son: La fase de extracción, refinación y distribución (Puertos & Logistica, 2016)

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un tanque vertical de techo fijo con capacidad de 200.000 galones de acuerdo con la norma API 650 para almacenamiento de petróleo crudo.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar el diseño detallado del tanque (cálculos, cargas, materiales, uniones soldadas, consideraciones especiales) para desarrollar el recipiente (fondo, cuerpo, techo, conexiones, elementos estructurales).

Aplicar normativa y requerimientos nacionales para el diseño de tanques y tuberías según documentación técnica.

Elaborar una memoria de cálculo, planos generales, detallados y P&ID con su respectiva lista de materiales para futura construcción.

Generar una simulación en software CAE para analizar y comparar resultados obtenidos, además de visualizar deformaciones.

Seleccionar un sistema de protección contra la corrosión aplicando recubrimiento de acuerdo con la norma ISO 12944 y Especificar un sistema de protección catódica para aumentar la protección de la superficie del tanque.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Frente a la constante y creciente necesidad de almacenar los productos para asegurar un abastecimiento y facilitar la distribución en las 3 fases mencionadas, los tanques dispuestos para dicho fin juegan un papel de gran importancia dentro de la cadena, por tal motivo, requieren de diseño preciso, fabricación controlada e inspección de calidad. Gracias a los entes reguladores, por ejemplo, API, se tiene una trazabilidad en la creación de tanques para diferentes tipos de aplicaciones con características particulares para cada proceso.

Analizando el crecimiento y el progreso en la producción anual de crudo en distintas zonas del país, surge la necesidad de contar con recipientes que cumplan con la normativa para abastecer a la cadena de producción almacenando el fluido con parámetros de seguridad operativa y ambiental, mejorando la eficiencia y la sostenibilidad.

Así pues, para aportar a la solución de esta necesidad, el presente proyecto tomó como referencia y punto de partida la relación que existe entre el campo Costayaco (campo petrolero ubicado en el municipio de Villa Garzón, departamento de Putumayo al sur de Colombia, operado por la compañía canadiense Gran Tierra Energy) y el campo Moqueta (localizado en el municipio de Mocoa al norte de la cuenca del Putumayo, 6 km al NE del Campo Costayaco), la ubicación de los campos se muestra en la Figura 2.

Adicionalmente, Gran Tierra planea un programa de reacondicionamiento de cinco pozos, que se espera pueda ayudar en la reactivación y estimulación para restaurar la producción de los campos, además de activar tres conversiones de inyectores para optimizar la inyección de agua y aumentar la producción en la segunda mitad de 2021. En la Tabla 2 se puede observar el desempeño del campo Costayaco y Moqueta.

Figura 2. Localizaciones campos Costayaco y Moqueta.



Fuente: Elaboración Propia, adaptado de Google Earth®.

Tabla 2. Producción media en barriles de petróleo por día (GTE) del campo Costayaco y Moqueta.

Producción media	Acordionero	Costayaco	Moqueta	Otro	Compañía total
	(BOPD)	(BOPD)	(BOPD)	(BOPD)	(BOPD)
Segundo trimestre de 2020	10,744	6.021	2,468	932	20,165
Tercer trimestre de 2020	9,696	4.949	2.051	2,248	18,944
Cuarto trimestre de 2020	9,732	4.363	2.530	5.282	21,907
Primer trimestre de 2021	12,681	4.190	2.304	5.288	24,463
Producción promedio actual	16400	4.700	2.400	5.430	28,93

Fuente: (Valora Analitik, 2021).

Considerando que el campo Moqueta y el campo Costayaco pertenecen al bloque Chaza que tiene la misma licencia exploratoria, existe la necesidad de construir una línea de flujo entre los dos campos, ya que, debido a la ubicación geográfica de los campos y la ausencia de vías de acceso, las operaciones realizadas como la perforación de pozos, la construcción de líneas de transporte y almacenamiento, entre otras facilidades tempranas han tenido que ser helitransportadas (Corpoamazonia, 2012). Lo anterior es inconveniente desde diversos puntos de vista porque implica sobrecostos y complicaciones logísticas.

Por todo lo anterior, se proyecta la necesidad de diseñar un tanque para almacenamiento de 200.000 Galones para ser utilizado en el campo Costayaco, que recibirá el petróleo producido en el campo Moqueta, El tanque podría ser utilizado para futuras exploraciones y almacenamiento del sistema proyectado a 40 años en el que participan los oleoductos Mary, Uchupaco y Santana.

3. JUSTIFICACIÓN

La Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) prevé que la demanda mundial de petróleo aumentara, a pesar de la pandemia del año 2020, aun así, esta organización dice que la demanda global aumentara en 6.25 millones de barriles por día (BPD) el próximo año 2021, por su parte la Agencia Internacional de Energía (AIE) dice "Por ahora, nuestros pronósticos no anticipan un impacto significativo para el primer semestre del 2021" (La Republica, 2020), esta consideración concuerda con la estimación de la OPEP.

Aun con los recortes en la producción de crudo el aumento sigue siendo significativo ya que la demanda de petróleo en 2021 repuntará en siete millones de BPD, cabe aclarar que el cálculo está sujeto a la incertidumbre generada por el impacto negativo en el consumo de crudo y la demanda de viajes aéreos, la llegada de autos más eficientes en cuanto al combustible y la competencia energética.

Teniendo en cuenta el aumento en la producción del sector petrolero es evidente la necesidad de generar soluciones de almacenamiento, ya que no solo se trata de suplir de combustible a la industria automotriz o del transporte, si no que la disponibilidad del petróleo y sus derivados afecta directa e indirectamente industrias como la manufactura, los alimentos, calefacción e iluminación, lubricantes, la agricultura y hasta la farmacéutica.

Teniendo en cuenta lo anterior, se pretende dar solución al almacenamiento en la producción petrolera, pero se precisan soluciones con gran sentido de responsabilidad profesional que brinden características de seguridad humana y ambiental, como soporte se usara el estándar escrito por la Asociación americana de Petróleos llamado API 650 que está basado en el conocimiento y la experiencia acumulado de usuarios, diseñadores y fabricantes de tanques de almacenamiento de petróleo soldados de distintos tamaños y capacidades.

4. ESTADO DEL ARTE – ANTECEDENTES

Dado que el presente trabajo se enfoca en el diseño estándar de tanques, en la búsqueda de referencias se encontraron numerosos documentos y estudios realizados en referencia al diseño y dimensionamiento de tanques bajo el estándar API 650, a continuación, se presentan la selección de los más relevantes.

- **"Diseño y Calculo de un Tanque para Almacenamiento de Petróleo Para 3.000 BBLS"**

En este trabajo de grado previo a obtener el título de ingeniero mecánico el autor desarrolla el diseño de un tanque de techo cónico para almacenar petróleo con una capacidad de 3000 BLS, este diseño lo genera bajo norma API 650 - 2013Ed. En este trabajo el autor determina los parámetros funcionales de cálculo de estabilidad en sismo y contra viento ligados a la norma que le permitan decidir si el tanque necesita ser anclado mecánicamente.

Además, en este trabajo se determinó el material a utilizar y el proceso de soldadura, luego se realizó el diseño del cuerpo del tanque que es el componente más grande, el cual representa alrededor del 75 % de la construcción y se calculó por el método de punto fijo o pies ya que este método es el usado para tanques con un diámetro más pequeño que 60 ft. Los demás componentes del tanque se diseñaron siguiendo la metodología de la norma: manhole, flanges. (Sánchez & Hugo, 2015)

- **"Diseño de Tanques de Acero Soldado Apoyados sobre el Suelo para Almacenamiento de Hidrocarburos"**

Esta tesis para optar el título profesional de ingeniero civil fue llevada a cabo en lima (Perú). El trabajo está relacionado con el diseño de tanques de acero soldado apoyados sobre el suelo para el almacenamiento de hidrocarburos siguiendo las reglamentaciones del Instituto Americano del Petróleo contenidas en su norma API 650.

En sus primeros capítulos lleva el tema al modelamiento sísmico aceptado hoy en día y que estandariza el diseño de tanques, además muestra los tipos de falla por pandeo y los esfuerzos ubicados en las planchas inferiores del tanque. Sigue el desarrollo de su trabajo analizando las consideraciones que se toman al momento de seleccionar el tamaño de un tanque y muestra algunos tipos de tanques que se diseñan y construyen actualmente.

Continúa su diseño con el desarrollo formal del tanque y analiza cada detalle, además realiza comparaciones de distintas configuraciones y tamaños de tanques para analizar diversas combinaciones de aceleraciones sísmicas a las que estará sometido el tanque, con esto busca generar una discusión con respecto a las alternativas de estabilización de acuerdo con la norma API650. (Aranda Burckhardt, 2011)

- **"Diseño de un Tanque de Almacenamiento de Petróleo de 10.000 Galones Según Norma API 650 Y Su Análisis Empleando un Programa CAD/CAE"**

Este trabajo desarrollado para optar al título de ingeniero mecánico tuvo como objetivo diseñar un tanque de almacenamiento de petróleo de 10000 galones utilizando la norma API 650, pero adicionalmente los autores utilizaron un software CAD CAE para analizar el diseño y así evitar errores en la construcción.

En su metodología determinaron los materiales, dimensiones de la base, cuerpo, techo y accesorios para el tanque y adicional al uso de la norma API, sustentaron bajo las normas ASTM y AWS. Para la simulación se utilizó un tanque modelado con las dimensiones calculadas y se establecieron variables de entrada de presión y temperatura los resultados de la simulación arrojaron una deformación de 0.23 mm y un esfuerzo máximo de 14.91MPa verificando así que el diseño es óptimo para su fabricación. (Quispe Quispe & Aguilar Tejeda, 2019)

- **"Diseño y Simulación de un Tanque de Techo Fijo para Almacenar Petróleo de 3.000 BLS de Capacidad en la Plataforma del Pozo Sacha 192, Ubicada en La Provincia de Orellana"**

Este trabajo de grado para obtener el título en ingeniería mecánica, los autores diseñan un tanque de techo fijo para almacenar petróleo, ellos identifican que para poder mejorar la producción de la plataforma sacha 192 con 12 pozos, se requiere entre las facilidades de superficie, un tanque de almacenamiento de petróleo de techo fijo con una capacidad de 3.000 barriles.

Con el desarrollo de dicho proyecto se espera que la planta pueda mejorar su producción en calidad y en cantidad ya que con la implementación de un nuevo tanque a la plataforma 192 se le permitirá realizar pruebas de producción, inspecciones fuera de operación y mantenimientos a los tres tanques adicionales de 500 barriles de capacidad, garantizando el volumen y calidad del crudo, adicionalmente, pensando en el medio ambiente, se previenen derrames y pérdidas de producción por falta de capacidad instalada. (Ismael & Patricio, 2011)

- **“Diseño y Cálculo de un Tanque de Almacenamiento Atmosférico de 60,000 Barriles para Almacenaje de Gasolina de 90 Octanos en La Selva”**

Esta tesis para optar el título profesional de ingeniero mecánico fue llevada a cabo en lima (Perú). Desarrolla un diseño sistemático donde se describen los pasos para calcular y diseñar un tanque de almacenamiento atmosférico que sirve para solucionar la falta de capacidad instalada de combustible, el proyecto realizó los cálculos necesarios, el diseño y la planificación del montaje de un tanque de almacenamiento que cumpla las condiciones mecánicas que solicite la Norma API 650, 12th Edición, Año 2013. (Pejerrey, 2017)

5. MARCO TEÓRICO

5.1. PETRÓLEO.

El petróleo es un aceite mineral y una sustancia combustible de color muy oscuro o negro, viscosa, liquida a presiones y temperaturas corrientes, además, es menos denso que el agua. El petróleo se encuentra sólo en las rocas sedimentarias y es el resultado de la fosilización de animales y plantas, en otras palabras, es la descomposición de las sustancias orgánicas por la acción de microbios anaerobios.

Esta sustancia es formada, por una parte, unos compuestos denominados hidrocarburos, formados por átomos de carbono e hidrógeno y, por otra, pequeñas proporciones de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales. (Vázquez, 2008) El producto es un compuesto químico complejo en el que coexisten partes sólidas, líquidas y gaseosas. (Martínez Hoyos, 2003)

La industria del gas y el petróleo abarca todos los procesos de exploración, extracción transporte, refinación, almacenamiento y comercialización del producto, el mayor derivado que se comercia es la gasolina y el diésel que representa un gran porcentaje de lo que consume la población mundial específicamente en transporte.

5.2. NORMAS APLICABLES.

Cabe destacar que las normas y códigos representan calidad y confianza, por esta razón son muy usados por ingenieros de diferentes países marcando un uso mundial. En la mayoría de los casos, en el proceso de diseño, se recurre a revisar varios estándares para desarrollar un diseño más confiable.

En el campo del diseño mecánico las normas aplicables más comunes son el código ASME que rige en Estados Unidos junto con el código API, El British Estándar es el código británico, el JIS es el código usado en Japón y en Alemania y países bajos se usa el código alemán.

Para que un tanque pueda funcionar necesita de varios elementos estandarizados que forman parte directa del tanque, tal como las boquillas, anillos de soporte, plataformas, escaleras. Columnas etc. y algunos otros elementos complementarios como válvulas, sensores, agitadores etc.

5.3. TANQUES DE ALMACENAMIENTO.

Un tanque de almacenamiento es un depósito que se utiliza para manipular y almacenar diferentes sustancias como por ejemplo gases, líquidos, productos de origen químico y petróleos, entre otros. El origen de estos recipientes se remonta a los inicios de la historia de la industria y han ido evolucionando a lo largo de los años en función de las necesidades que los diferentes sectores pedían. Por este motivo, existen diferentes medidas, diferentes tipos y, por supuesto, distintos usos. (Haléco Iberia, 2022)

5.4. TIPOS DE TANQUES.

Los tanques de almacenamiento se usan en numerosas aplicaciones en la industria como depósitos para contener una reserva de algún producto para su uso posterior y/o comercialización, transporte, producción y líneas de procesos. El producto almacenado puede ser trabajado a presiones atmosféricas o pueden almacenarse a una presión superior, en cada caso existen varios códigos que rigen su diseño y construcción.

5.4.1. Tanques atmosféricos.

Como su nombre lo indica están diseñados para trabajar a presiones atmosféricas, estos tanques no pueden almacenar líquidos a temperaturas altas las cuales puedan ocasionar la ebullición. (Laindustriasite, 2017) Entre los más comunes, en este grupo, están los tanques de techo fijo y de techo flotante.

5.4.1.1. Tanque atmosférico de techo fijo.

Estos tanques poseen el techo en una posición fija. Puede ser auto soportado o cuando el tanque supera cierta relación de diámetro, estos techos se soportan con columnas internas.

En la mayoría de los tanques se prefiere el techo con forma cilíndrica o cónica para que los vapores generados puedan ascender a la parte más alta del tanque y poder ser aliviados por venteos así el interior se mantendría una presión atmosférica. Así pues, estos tanques se usan para almacenar productos no volátiles y no inflamables. En Figura 3 se ilustran tanques de techo fijo.

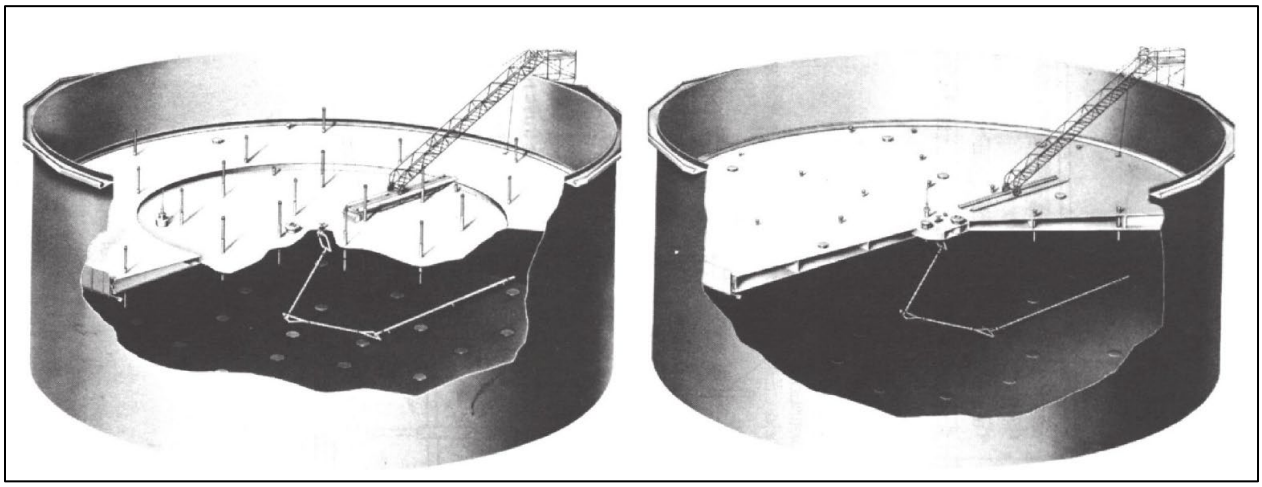
Figura 3. Tanques de techo fijo.



Fuente. (API 575 Inspection Practices for Atmospheric and Low/Pressure Storage Tanks, 2014)

5.4.1.2. Tanque atmosférico de techo flotante: a diferencia de los tanques de techo fijo, estos tanques, mantienen su techo flotando sobre el fluido almacenado, de esta forma se eleva o baja dependiendo el nivel del fluido eliminando así los espacios para vapores o gases generados (ver Figura 4). Esto cuando se almacenan productos volátiles, como petróleo crudo, gasolina y naftas entre otros.

Figura 4. Tanques de techo flotante.



Fuente. API 575 - 2014

5.4.2. Tanques a presión.

Son recipientes diseñados para contener fluidos en fase gaseosa o liquida a una presión superior a la presión atmosférica. En muchos de los casos su diseño se basa en el código ASME para recipientes a presión Sección VIII división 1, 2 y 3. Se pueden subdividir en 2 categorías. Por su uso y por su forma, respectivamente pueden ser usados para almacenamiento o para una línea de proceso donde cumpla una función específica (intercambiar calor, filtrar, separar) y por su forma, los más usados se fabrican en apariencia cilíndrica y esférica. Cuando son cilíndricos existen 2 diseños, específicamente, horizontales o verticales.

5.4.2.1. Recipientes cilíndricos: estos pueden fabricarse para funcionar de posición horizontal y vertical, cuando son verticales, el tanque se sitúa sobre un par de silletas (depende del largo del tanque pueden ser más) que se sujetan al tanque por medio de distintos métodos de soldadura. Es muy común encontrarlos como acumuladores, que principalmente proveen de flujo y, al contener fluidos a alta presión, compensan caídas de presión en una línea de proceso.

Cuando los recipientes cilíndricos son verticales se posicionan sobre cierto número de soportes, compuestos, generalmente, de acero en forma de ángulo soldado al cuerpo del tanque. La Figura 5 ilustra un tanque cilíndrico vertical.

Figura 5. Tanques cilíndricos verticales.



Fuente. (Plameresa, 2015)

5.4.2.2. Recipientes esféricos: son utilizados en plantas donde se ocupa llenar un gran volumen, principalmente de productos petroquímicos. Al tener una geometría esférica, su proceso de fabricación es más costoso, a diferencia de los demás tanques considerando su capacidad de almacenaje, pero en cuestión de eficiencia en funcionamiento es muy conveniente ya que puede abarcar un gran volumen gracias a que tiene mayor superficie o área por unidad de volumen. En la Figura 6 se ilustra un tanque esférico.

Figura 6. Tanques esféricos.



Fuente: (Tarsco, 2010)

5.5. TANQUES DE ALMACENAMIENTO CON ESTÁNDAR API 650.

Mundialmente uno de los códigos de diseño, en la industria petrolera, más utilizado para desarrollar tanques de almacenamiento de petróleo es el estándar API 650. Este código abarca el diseño y cálculo de los diferentes elementos que influyen directamente sobre el funcionamiento de tanques, gracias a su trazabilidad se basa en conocimientos y experiencia de clientes y fabricantes.

El principal objetivo de este estándar es, a través de los requisitos contenidos en sus diferentes secciones, facilitar la compra y construcción de tanques verticales apoyados uniformemente en el suelo, de fabricación soldada. En la norma se aclara su alcance y comprende tanques que se utilicen para almacenar fluidos en fase liquida a presión atmosférica y con temperaturas no superiores a 93° C. (API 650 Welded Tanks for Oil Storage, 2020)

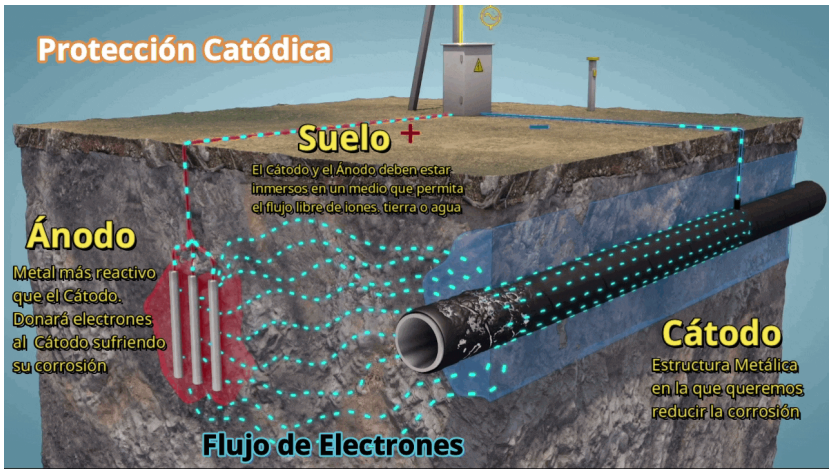
5.6. CORROSIÓN Y PROTECCIÓN CATÓDICA.

La degradación de los materiales se realiza por acción del medio que los rodea, a través de reacciones químicas o electroquímicas. La mayoría de los procesos de corrosión involucran reacciones de reducción – oxidación, donde para que se

realicen estos procesos, es necesaria la existencia de tres constituyentes: Un electrodo, un electrolito y una conexión eléctrica.
En el caso de materiales no metálicos, el término corrosión se refiere invariablemente a su deterioro por causas químicas, pero un concepto similar no es necesariamente aplicable a los metales. Muchas autoridades consideran que el término “corrosión metálica” abarca todas las interacciones de un metal o aleación (sólido o líquido) con su entorno, independientemente de que sea deliberado y beneficioso o adventicio y deletéreo (L.L. Shreir, 1994b).

La protección catódica es una técnica utilizada para controlar la corrosión de una superficie de un metal convirtiéndola en el cátodo de una celda electroquímica. El método más simple para aplicar este tipo de protección es conectar el metal a proteger con un trozo de otro “metal de sacrificio” que se corroe más fácilmente para actuar como el ánodo de la celda electroquímica. El metal de sacrificio se corroe en lugar del metal protegido.

Figura 7. Esquema común de protección catódica para tuberías.



Fuente. (Formacion Industrial, 2020)

La protección catódica es única entre todos los métodos de control de la corrosión en el sentido de que, si es necesario, puede detener la corrosión por completo, pero queda dentro de la elección del operador aceptar un nivel de protección menor, pero cuantificable. En principio, la protección catódica se puede aplicar a todos los denominados metales de ingeniería, pero en la práctica, se usa más comúnmente para proteger materiales ferrosos y principalmente aceros al carbono. (Bahadori, 2014)

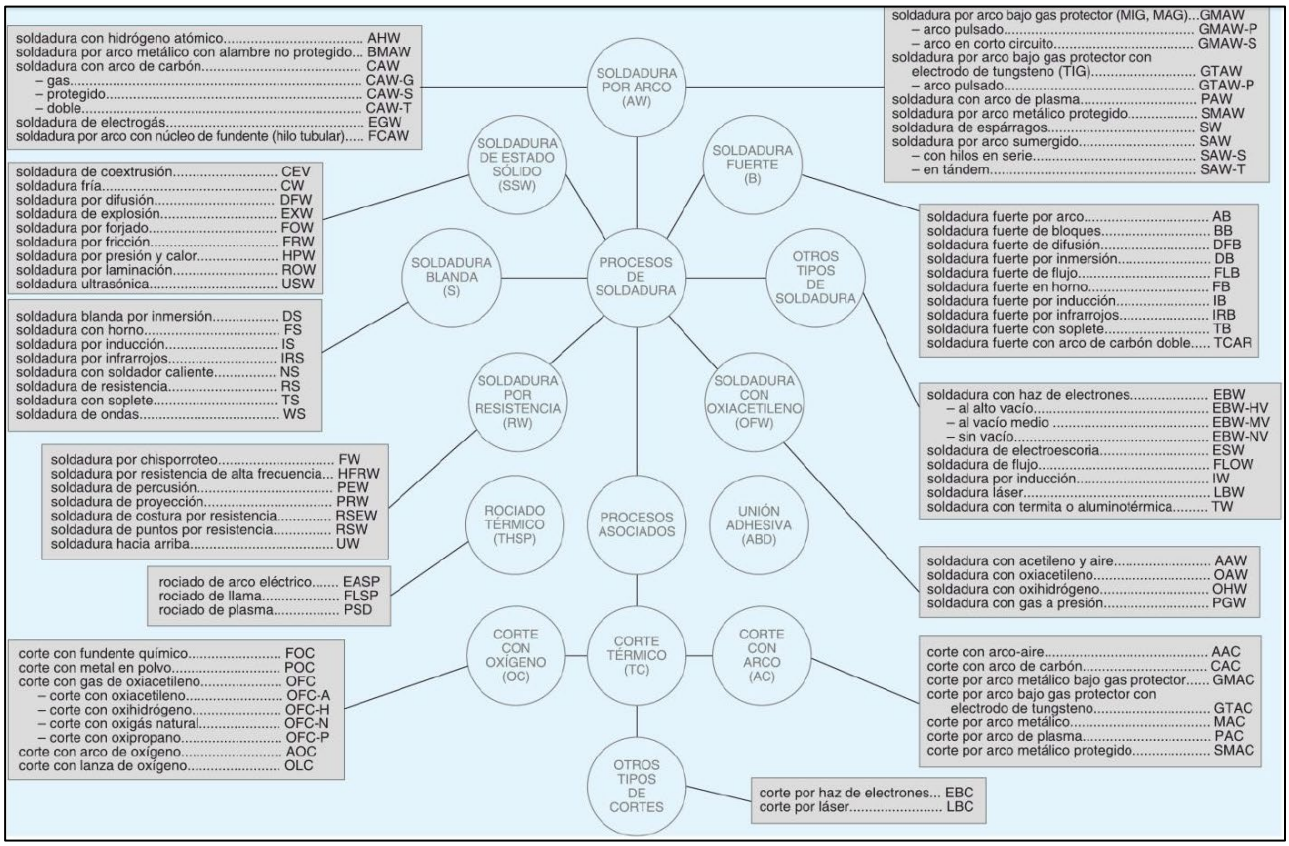
5.7. SOLDADURA.

La asociación americana de petróleos se apoya en el código ASME en la sección IX para determinar las condiciones que deben cumplir las uniones soldadas. El código establece que todo proceso en el que interviene la soldadura deberá contar con la calificación de soldadores, soldadores y operadores de soldadura fuerte, y también cada proceso deberá contar con los procedimientos que emplean en soldadura y soldadura fuerte de acuerdo con el Código ASME de Calderas y Recipientes a Presión y el Código ASME B31 para Tuberías a Presión. El código Se divide en dos partes: la Parte QW que es la que proporciona los requisitos para la soldadura y la Parte QB que contiene los requisitos para la soldadura fuerte.

La American Welding Society (AWS) define una soldadura como “una coalescencia localizada de metales y no metales producida mediante el calentamiento de los materiales a las temperaturas requeridas, con o sin ayuda de presiones externas y con el uso o no uso de materiales de aporte.

5.7.1. Procesos de soldadura: en los últimos años se han desarrollado algunos procesos de soldadura, los más populares son la soldadura con arco metálico protegido (SMAW), que también se llama soldadura con electrodo, este tipo de soldadura es el más común para unir metales, ya que se puede realizar con gran calidad y con una uniformidad excelente. la soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno (GTAW), la soldadura por arco bajo gas protector metálico (GMAW), la soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW) y la soldadura fuerte con soplete (TB). En la Figura 8 se presentan los diferentes procesos de soldadura.

Figura 8. Procesos de soldadura y las técnicas afines.



Fuente: (American Welding society, 1969)

5.8 RESISTENCIA DE MATERIALES

Es una rama de la ingeniería que estudia el efecto de las fuerzas sobre los cuerpos deformables y la interacción cuando son sometidos a distintos tipos de esfuerzos. De esta forma la mecánica de materiales permite presentar conceptos como la tensión, la deformación, ley de hooke que se relaciona directamente cola tracción, presión, torsión y flexión. Los principales esfuerzos analizados en el presente documento se listan a continuación:

5.8.1. Esfuerzo axial o normal.

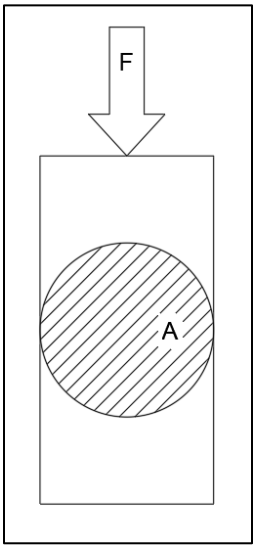
Es el resultante cuando se aplica una carga axial perpendicular a una superficie. Esta carga puede ser de compresión o tracción. Matemáticamente se define como la relación entre la carga aplicada perpendicularmente y el área de aplicación (véase la ecuación (1)).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:
σ Es el esfuerzo axial
F Es la fuerza aplicada perpendicularmente a la sección
A Es el área de aplicación

A continuación, en la Figura 9 se representa gráficamente el esfuerzo axial o normal sobre una sección circular.

Figura 9. Representación gráfica de un esfuerzo axial



Fuente: Elaboración propia.

5.8.2. Esfuerzo cortante.

Se define como esfuerzo cortante la acción de una fuerza paralela a la sección porque tiende a “cortar” el elemento mecánico por dicha sección. La fuerza aplicada a diferencia del esfuerzo normal es aplicada perpendicularmente al eje de la sección

Matemáticamente se define al esfuerzo cortante como la razón entre una fuerza paralela aplicada y el área de aplicación como expresa la ecuación (2)

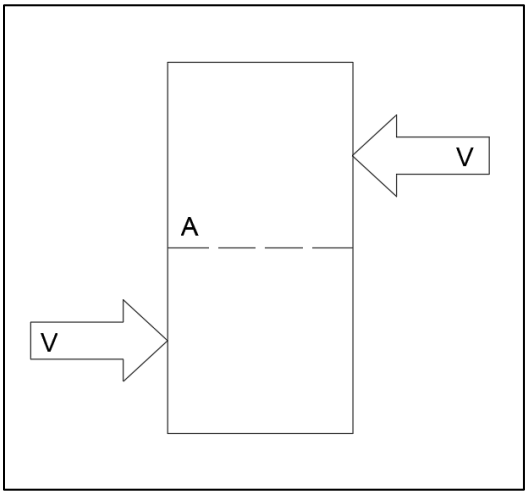
$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2)$$

Donde:

τ Es el esfuerzo cortante
V Es la fuerza aplicada paralelamente a la sección
A Es el área de aplicación

La Figura 10 se representa gráficamente el esfuerzo cortante sobre una sección circular.

Figura 10. representación gráfica de un esfuerzo cortante



Fuente: Elaboración propia.

5.8.3. Esfuerzo circunferencial

Es un tipo de esfuerzo mecánico que se manifiesta en elementos de forma cilíndrica o esférica, como resultado de una presión interna o externa. Los esfuerzos circunferenciales que actúan en la pared del recipiente de una unidad de longitud tienen una resultante igual a $2\ t\ \sigma$ donde t es el espesor de la pared. La fuerza resultante P_1 de la presión interna es igual a $2\ P\ R$, donde R es el radio interior del cilindro y t es el espesor requerido. (Roylance, 1999)

Así pues, se obtiene la ecuación (3) de equilibrio.

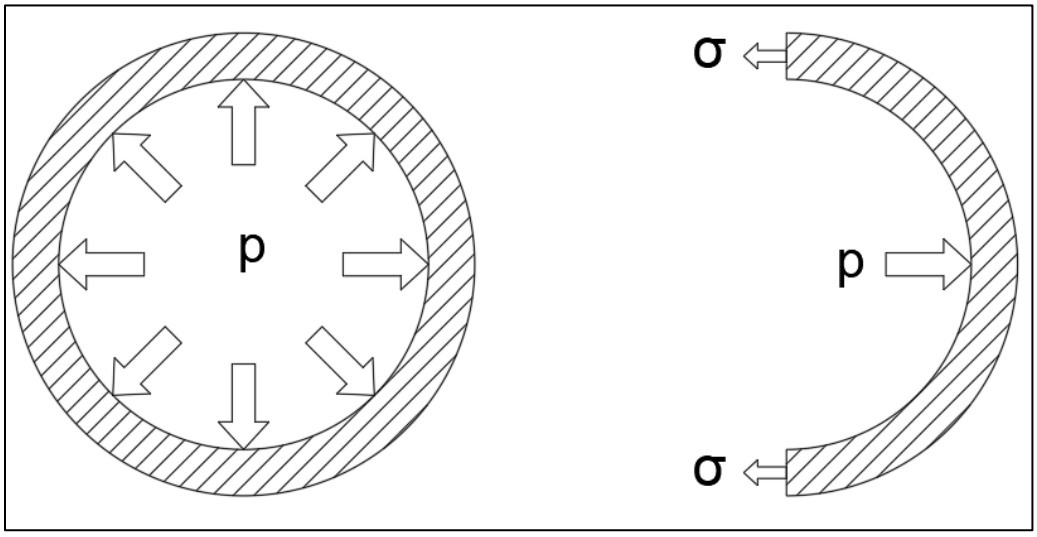
$$\sigma_1(2t) - 2P\ x\ R = 0 \text{ (3)}$$

Despejando y simplificando la expresión se obtiene la ecuación para el esfuerzo circunferencial.

$$\sigma_1 = \frac{P\ x\ R}{t} \text{ (3)}$$

La Figura 11 se representa gráficamente el esfuerzo cortante sobre una sección circular.

Figura 11. Representación gráfica de un esfuerzo circunferencial



Fuente: Elaboración propia.

6. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta para la elaboración y ejecución de este proyecto se basó en los objetivos, ya que se tiene como finalidad cumplir con estos de una manera secuencial.

- **Fase de planificación:** en esta etapa inicial se planificó el proceso a seguir y se recopiló la información necesaria para llevar a cabo los objetivos del proyecto y adicionalmente se recogió toda la información requerida para empezar el diseño, como lo fueron condiciones de operación, condiciones ambientales y características generales y especificas del terreno.

- **Fase de documentación:** en esta fase se recopiló la información técnica en bibliotecas, fuentes gubernamentales, sociedades profesionales internacionales y antecedentes en el diseño de recipientes, se seleccionó la información que aportara al desarrollo y a los requerimientos técnicos, además, se reunió las normas utilizadas en el desarrollo del proyecto, tal como API, AWS, ASME, ANSI y para temas estructurales la AISC.

- **Fase de diseño teórico:** Se determinaron los factores y las variables iniciales que condicionaron el desarrollo del diseño y de las cuales dependió la toma de decisiones, algunas de estos factores son el volumen, la temperatura, la presión entre otros. En ese orden de ideas, se realizó los cálculos iniciales para determinar geometría básica del tanque, se estableció un patrón de redondeo y a partir de estos datos se revisó el dimensionamiento para comprobar el volumen y la masa aproximada que ocupa el tanque y así estar seguros del volumen de fluido que finalmente podrá almacenar.

- **Fase de diseño detallado:** en esta fase se desarrolló el diseño en detalle de los subconjuntos del tanque (láminas de fondo, cuerpo, techo) se estableció boquillas necesarias (aperturas de cuerpo), geometrías específicas entre otros. También se diseñó los elementos estructurales que conectaran al tanque para su acceso como lo son escaleras y plataformas. Adicionalmente para su correcto funcionamiento se diseñó las tuberías necesarias que conecten al tanque con el proceso. Se especificó los procesos de soldadura aplicables a cada junta, lista de materiales, los planos correspondientes y entregables según la norma.

- **Fase final:** en esta etapa se presenta los resultados y análisis del trabajo de grado, además de anexar la documentación, los planos, lista de materiales y especificaciones de soldadura.

7. RESULTADOS - DISEÑO DE TANQUE BAJO ESTÁNDAR API 650

El tanque atmosférico se ubica en el campo Moqueta, localizado al sur de Colombia en la vereda las palmeras, jurisdicción del municipio de Mocoa, departamento del putumayo. Las condiciones ambientales más características del sitio se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones ambientales de Mocoa

Elevación:	**358 m.s.n.m**
Temperatura ambiente:	24 °C – 30 °C
Humedad Relativa:	75 % - 95%
Velocidad del Viento:	20 km/h
Caudal:	3900 BFPD

Fuente: Elaboración propia, información recopilada en la web.

Para el diseño de tanques de almacenamiento el comprador debe establecer la información necesaria para desarrollar el proyecto, la información mínima que debe suministrar es: volumen, temperatura, características de diseño, corrosión admisible entre otras. Los materiales también pueden ser especificados por el usuario, pero el diseñador puede aconsejar o sugerir los recomendados por la norma para cada aplicación (cuerpo, fondo, techo, estructura, boquillas) para que el comprador los apruebe.

7.1. CONDICIONES INICIALES DE DISEÑO

Para el diseño de este tipo de tanques se deben tener en cuenta condiciones de operación y características generales. El estándar API 650 establece unas condiciones de diseño que se definen de la siguiente manera:

- Presión externa de diseño: no menor a 0.25 kPa
- Presión interna de diseño: no mayor a 18 kPa
- Temperatura máxima de diseño: 93 °C
- Prueba Hidrostática: Agua ($p = \ 999.04\ kg/m^3 @\ 60\ °C$)
- Capacidad: 200000 Gal
- Fluido: Crudo Petróleo ($°API = 28.7\ \&\ sg = 0.8832$)
- Gravedad Específica: 1.0

Adicionalmente se establecieron las siguientes condiciones para la ejecución del diseño:

- La capacidad de almacenamiento es de 200.000 Galones
- Tipo de techo: Techo Fijo
- Diámetro del tanque: no mayor a 15 metros
- Fluido a almacenar: Crudo
- Tipo de fondo: Anular con fondo interno
- Boquillas solicitadas

7.2. DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE

7.2.1. Diámetro Y Altura

En este apartado se determinan las dimensiones del tanque para que cumpla con los requerimientos solicitados de modo que pueda almacenar la cantidad de fluido para la cual se diseña.

Para obtener las dimensiones preliminares el anexo A de la norma API 650, 13th Edición, Año 2020, en la tabla A.1a y en la tabla A.3a proporciona requerimientos para tanques montados en campo de capacidad relativamente pequeña, donde se muestran tamaños típicos y capacidades nominales en m^3.

El requisito de diseño en términos de almacenamiento son 200.000 galones, utilizando un factor de conversión de galones a m^3 de 274.17 se obtiene que el volumen equivale es 758 m^3.

Con el valor de volumen hallado se ingresa a la Tabla 4 donde se encuentra información extraída de la norma API 650, 13th Edición, Año 2020. Con lo anterior, se puede determinar diámetro, altura y el número de hileras a utilizar de 1.800 mm como medida sugerida. En la sección 5.6.1.2 de la norma se establece que a menos que el comprador acuerde lo contrario, las placas del cuerpo deberán tener un ancho nominal de 1800 mm (72 Pulgadas).

Para este caso se puede observar que desde el diámetro 7.5 m hasta 18m se puede encontrar la geometría para satisfacer el volumen requerido y los tamaños típicos. A modo de aclaración, la Tabla 4 muestra medidas típicas es informativa y da la libertad para seleccionar medidas distintas a las mostradas.

Tabla 4. Tamaños típicos y capacidades nominales de tanques con anillos de 1800 mm.

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10	Column 11
Tank Diameter m	**Capacity per m of Height m3**	**Tank Height (m)/ Number of Courses in Completed Tank**								
		3.6 / 2	5.4 / 3	7.2 / 4	9 / 5	10.8/ 6	12.6 / 7	14.4 / 8	16.2 / 9	18 /10
3	7,07	25	38	51	64	76	-	-	-	-
45	15,9	57	86	115	143	172	-	-	-	-
6	28,3	102	153	204	254	305	356	407	-	-
75	44,2	159	239	318	398	477	557	636	716	795
9	63,6	229	344	458	573	687	802	916	1,031	1,145
10.5	86,6	312	468	623	779	935	1,091	1,247	1,403	1,559
12	113	407	611	814	1,018	1,221	1,425	1,629	1,832	2,036
13.5	143	515	773	1,031	1.288	1,546	1,804	2,061	2,319	2,576
15	177	636	954	1.272	1.590	1,909	2.227	2,545	2.863	3,181
18	254	916	1,374	1,832	2.290	2.748	3.206	3,664	4,122	4,580

Fuente: Norma API650, anexo A Tabla A.1a

Las capacidades nominales dadas en la tabla están calculadas usando la ecuación (4).

$$C = 0.785D^2H \quad (4)$$

Donde

$C =$ Es la capacidad del tanque, en m³
$D =$ Es el diámetro del tanque en m
$H =$ Es la altura del tanque en m

La capacidad de operación del tanque debe ser de 758 m³. Al tabular las capacidades seleccionadas se obtienen os datos de la Tabla 5.

Tabla 5. Capacidades seleccionadas de la Tabla 4.

	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
	C (m3)	D (m)	H (m)	758/C
1	795	7,5	18	0,95253
2	802	9	12,6	0,94497
3	779	10,5	9	0,97197
4	814	12	7,2	0,92973

Fuente: Elaboración propia.

Las capacidades por encima del volumen de diseño 757.1 m³ seleccionadas son 794 (Columna 11), 802 (Columna 8), 779 (Columna 6), 814 (Columna 5), 773 (Columna 4).

En la Tabla 4 se contemplan las posibles opciones que ofrece la norma y que cumplen con las exigencias de diseño en términos de volumen. A pesar de que la norma expone algunos datos, estos son valores informativos y recomendados, por ende, se pueden modificar o se pueden seleccionar algunos otros, pero al ser valores obtenidos con elementos estandarizados se opta por no variar los recomendados por la norma y se seleccionaron 4 posibles tamaños para su análisis, en la Tabla 5 se tabularon los datos y se halló la relación entre la capacidad normal del tanque y su capacidad máxima, en la columna 4 se guardó este dato en términos de porcentaje. Al analizar las relaciones se escogió la opción 4 con un diámetro de 12 m y una altura de 7.2 m ya que tiene la relación 758/C más baja y por ende más segura. La columna 4 de la tabla representa la relación entre la capacidad normal del tanque y su capacidad máxima, si este valor es cercano a 1 representa que la altura efectiva está cerca del 100 % de la altura y de la capacidad total del tanque, lo cual representa un riesgo para la integridad de este.

7.3. PREVENCIÓN DE SOBRELLENADO

7.3.1. API 2350

El sobrellenado de los tanques es una de las principales preocupaciones de la industria petrolera. Por sus implicaciones laborales ambientales y hasta legales, por este motivo la industria ha trabajado conjuntamente para crear la Norma API 2350. La prevención de sobrellenado en tanques de almacenamiento es una medida importante de seguridad y de preocupación por el medio ambiente. El

funcionamiento seguro del almacenamiento de petróleo depende de la recepción del producto en el tanque dentro de su capacidad definida.

El riesgo en el sobrellenado del recipiente se puede reducir eficazmente mediante el desarrollo y la aplicación práctica de los procedimientos de funcionamiento seguro en las instalaciones de almacenamiento y de una cuidadosa selección y aplicación de los equipos, programas de mantenimiento programado y la formación de los trabajadores.

La práctica recomendada API 2350 reúne los requisitos mínimos necesarios para cumplir con las mejores prácticas modernas en esta aplicación específica. Obviamente, el objetivo principal es evitar el sobrellenado, pero otro resultado común de la aplicación de esta norma es el aumento de la eficiencia operativa y la mayor utilización de los tanques. En el estándar API Rp 2350 5th Edición se definen los niveles de preocupación (LOC) como MW, HH y CH.

Los niveles de preocupación son teóricos, es decir, no deben tener algún tipo de equipo relacionados a ellos. Se definen como posiciones de nivel de fluido que se registran en la documentación de los operadores, ya sea en pantallas de la sala de control o en los procedimientos o en tablas de aforo. (API 2350. Overfill Prevention for Storage Tanks in Petroleum Facilities, 2020)

7.3.2. Nivel máximo de trabajo (V. MW)

Es el nivel más alto al que se puede llenar el tanque de forma rutinaria, si el operador lo desea puede tener un sensor de nivel asociado y se puede utilizar una alerta. se establece a una distancia de 6 pulgadas por debajo del nivel Alto – Alto (HH)

7.3.3. Alta Alta (V. HH)

Se define como el nivel donde el operador tiene la oportunidad de terminar el flujo para prevenir un sobrellenado. Esta es el único nivel donde la norma exige la generación de una alarma o una alerta.

7.3.4. Alto critico (V. CH)

Se define como el nivel más alto al que puede llegar el fluido donde el tanque podría sufrir impactos perjudiciales como sobrellenado o exceso en el esfuerzo admisible de diseño en el cuerpo. Se define este nivel 2 pulgadas o más por debajo de la altura total del tanque.

A partir de estas premisas se definió como nivel alto-alto el volumen nominal del tanque (V. HH), es decir, 757 m³ y como volumen alto critico (V. CH) o altura critica el volumen máximo que puede contener el tanque con 12 metros de diámetro y 7.0 metros de altura, es decir 790.0 m³. La información se resume en la Tabla 6.

Tabla 6. Niveles establecidos para el tanque.

Diámetro	Altura	V. MW	V. HH	V. CH
12 m	7,2 m	739.9 m³	757.1 m³	790.0 m³

Fuente: Elaboración propia.

7.3.5. Altura Efectiva.

Con los datos volumétricos de la Tabla 6 se puede calcular la altura efectiva del fluido almacenado, reemplazando en la ecuación (5) los valores de diámetro y volumen.

$$H_e = \frac{V}{\pi/_{4*D^2}} \quad (5)$$

Así las alturas efectivas recomendadas se definen de la siguiente forma:

Altura de Nivel de trabajo máximo (MW): 6.55 metros
Altura de Capacidad Nominal (HH): 6.71 metros
Altura de Capacidad máxima (CH): 7.00 metros

La capacidad mínima, así como la altura mínima de trabajo se define en una sección posterior (sección de conexiones).

7.4. SELECCIÓN DE MATERIALES

Para obtener el mejor diseño y tener éxito en el proceso de manufactura es necesario seleccionar los materiales que mejor se ajusten al proceso, los materiales utilizados en la construcción de tanques atmosféricos deberán cumplir con las especificaciones nombradas en la sección 4 la norma API 650, 13th Edición, Año 2020.

Esta sección lista ciertos materiales aceptados, además cita especificaciones de institutos, organizaciones y asociaciones internacionales que establecieron estándares de materiales para su correcta creación y utilización. Entre estas organizaciones se encuentra la asociación americana de ingenieros mecánicos

(ASTM), la asociación de estándar canadienses (CSA), La organización Internacional de Normalización (ISO) y las normas europeas (EN).

En ese orden de ideas, hay 12 tipos de aceros al carbón bajo especificación ASTM permitidos para la construcción de tanques de almacenamiento. Para las placas el espesor máximo permitido es de 45 mm. (API 650 Welded Tanks for Oil Storage, 2020)

Los materiales más comunes para fabricar cuerpos de tanques de almacenamiento son: el acero ASTM A36, ASTM A283 Grado C, ASTM A516 en los grados 55, 60, 65 y 70 y el acero ASTM A131, aunque este último es más usado en el sector naval.

El acero A516 es un acero al carbono-manganeso, considerado como el material más popular para la fabricación de recipientes a presión, debido a su capacidad para resistir elevadas presiones a diferentes temperaturas y tiene buenos niveles de soldabilidad. Este material se utiliza en los grados 380, 415, 450 585/A516, 55, 60, 65, 70 para placas con un espesor máximo de 40 mm (1.5 in).

El acero A36 es una aleación de hierro (mínimo 98 %), con contenidos de carbono de máximo 0.29 % y otras pequeñas cantidades de minerales como manganeso y silicio, este material tiene grandes ventajas como lo son: la buena soldabilidad, su resistencia a la tracción y además que es un acero de bajo costo. La norma establece y limita su uso hasta espesores de 40 mm (1.5 in) o menores.

El acero A283 Grado C es un acero de baja y media resistencia para estructuras de uso moderado y alta soldabilidad, esta designación es usada ampliamente en la fabricación de tanques de almacenamiento y recipientes de baja presión, además es muy usado en la industria petroquímica. Este acero contiene un máximo de 0.24 % de carbono por lo que se facilita el proceso de rolado y de soldadura. La norma permite el uso de este material hasta un espesor máximo de 25mm (1 in).

Otro material importante solicitado específicamente para la fabricación del techo del tanque es el acero estructural ASTM A1011M, Gr33. Este es uno de los aceros más ampliamente utilizado en el diseño y la fabricación de estructuras metálicas. Su presentación principal es en lamina que es obtenida mediante un proceso de rolado en caliente. El acero A1011M pertenece a la familia de aceros de baja aleación y alta resistencia mecánica.

Para la tubería y accesorios forjados, la norma API 650, 13th Edición, Año 2020 establece que la tubería acoplada al cuerpo del tanque debe cumplir con ciertas especificaciones nombradas en la sección 4.5.1.

Para bridas en todas sus presentaciones la norma API 650 en la sección 4.6, indica que la selección de materiales debe estar de acuerdo con las características de los aceros nombradas en la especificación ASME B16.5. se pueden usar laminas como brida, pero sus propiedades deben ser iguales o mejores que las exigidas en la especificación ASME B16.5.

En la sección 4.7 se indica el material para pernos, tuercas y tornillería para propósitos estructurales, los materiales a usar que son aceptados bajo la norma para uso en bridas son el ASTM A193 B7 para pernos y ASTM A194 Grado 2H para tuercas estos últimos deben tener un patrón hexagonal pesado y deben estar roscados de acuerdo con ASME B1.13M (SI) o con ASME B1.1 (US).

Para fines estructurales los tornillos deben cumplir con el estándar A325M / A325. los anclajes pueden estar fabricados en acero A36 galvanizado o de acuerdo con ASTM F1554 Grado 36 o 55 galvanizado. Para otro tipo de propósitos se pueden usar los aceros ASTM A307 o A193M / A193.

Para el presente diseño, en la selección de material para fabricación del cuerpo, fondo y placas anulares se seleccionó el acero fabricado bajo la especificación ASTM A283 en el grado C. ya que es perfecto para la aplicación porque tiene una buena conformabilidad, alta soldabilidad y la relación resistencia / precio lo hace un acero muy competitivo. Entre sus propiedades mecánicas más características se encuentra su límite elástico mínimo con un valor de 205 Mpa y su resistencia a la tracción mínima de 380 Mpa.

Para el techo, como lo exige la norma API 650, 13th Edición, Año 2020. en su sección 4.3 se utilizó el acero ASTM A1011M Gr33. Siendo homónimo del acero A36 se encuentra dentro del grupo I de materiales. Para tuberías, se eligieron 2 tipos de aceros tomando en cuenta que se encuentran fácilmente en el mercado. El acero ASTM A53 como tubos de acero negro y además conformado por medio de proceso al caliente sin costura grados A y B aplicable para usos generales y el acero A106 que es un acero al carbono sin costura para tuberías usadas a altas temperaturas de servicio grado A y B. Para las bridas el material comercial mas usado es el ASTM A105.

7.5. DISEÑO DE ENVOLVENTE

Existen 2 formas aprobadas por el estándar API 650 para calcular los espesores de las láminas que conforman el cuerpo circunferencial de los tanques atmosféricos. El método de 1 pie y el método de diseño por punto variable.

7.5.1. Método de un pie.

El método de un pie se admite para ser usado en tanques con un diámetro de hasta 61 m, como principales características se tiene que es un cálculo directo fácil de usar, ignora las fuerzas de corte y las deflexiones elásticas resultantes, los diámetros de tanques están limitados por criterios de espesor máximo, el cálculo de tensiones es conservativo comparado con el método de punto variable.

7.5.2. Método de punto variable.

El método de punto variable se utiliza para tanques de más de 61 metros de diámetro, es un método complejo e iterativo, pero gracias a esto calcula la ubicación más exacta de la tensión máxima en cada anillo y la tensión calculada se acerca más a la tensión circunferencial real, además incluye la fuerza de corte y la deflexión elástica resultante, así que permite tanques de mayor diámetro para el mismo espesor máximo.

Para hallar el espesor de las planchas se utiliza la sección 5.6.3.2 de la norma API 650 Ed. 12, en esta sección se detalla el cálculo de espesores mínimos de láminas circunferenciales para condiciones de prueba hidrostática y para condiciones específicas de diseño.

Para el cálculo se utilizó el método de 1 pie, este es un método simplificado usado para determinar el espesor de las láminas que componen el cuerpo circunferencial. El método asume que el esfuerzo en cada anillo es uniforme a lo largo del perímetro en función de la gravedad especifica del fluido almacenado, la altura del líquido y otros parámetros de diseño.

Se procedió a calcular el espesor requerido en puntos de diseño localizados 0.3 m (1 ft) por encima del borde inferior de cada anillo del cuerpo. Ver figura 12.

La norma permite el uso de este método solo para tanques con un diámetro menor a 61 m (200 ft). Utilizando este método se logró hallar el espesor de cada anillo que conforma la envolvente del tanque.

Figura 12. Método de 1 pie. Descripción grafica



Fuente. (Sismica Institute, 2022)

El espesor mínimo requerido para cada anillo del cuerpo deberá ser el mayor valor entre los calculados por las ecuaciones (6) y (7).

$$t_d = \frac{4.9D(H-0.3)G}{S_d} + CA \quad (6)$$

$$t_t = \frac{4.9D(H-0.3)}{S_t} \quad (7)$$

Donde:
$t_d =$ El espesor de diseño del cuerpo, en mm
$t_t =$ El espesor de prueba hidrostática del cuerpo, en mm
$D =$ El diámetro nominal del tanque, en m
$H =$ El nivel de diseño del líquido, en m
$G =$ Gravedad especifica de diseño del líquido a ser almacenado
$CA =$ La tolerancia para la corrosión
$S_d =$ El esfuerzo admisible para la condición de diseño, en Mpa
$S_t =$ El esfuerzo admisible para la condición de prueba hidrostática, en Mpa

7.5.3. Tolerancia a la corrosión.

La tolerancia a la corrosión de cada anillo se establece por el comprador. Esta se determina dependiendo de la cantidad de años que se espera que el tanque este en servicio con un factor de seguridad también establecido por el cliente. Para cada zona de trabajo del tanque se establece la misma tolerancia a la corrosión. (Groysman, 2014) Con un adecuado mantenimiento se estima una tasa de

corrosión máxima de 0.05 mm por año que equivale a 1.969 MPY (milésimas de pulgada de penetración anual).
Las 4 zonas donde se evidencia un mayor ataque corrosivo son diferenciadas en el interior de los tanques como:

a. Zona de vapor. Es la parte superior de la superficie interna del tanque que tendría contacto con el vapor generado por el hidrocarburo, el agua y el aire existente debido a los venteos montados en el techo.

b. Zona de salpicadura. Es la interfaz entre un combustible líquido y una fase de vapor. Este contorno no es constante y la ubicación de la zona de salpicadura cambia durante las operaciones de llenado y vaciado del tanque.

c. Zona húmeda. O también llamada zona mojada es la superficie interior del tanque que siempre estará en contacto con el líquido. El tamaño de esta zona cambia durante las operaciones de llenado y vaciado del tanque.

d. Zona inferior (Fondo). También se incluye aproximadamente 1 metro (3 ft) del primer anillo que compone el cuerpo del tanque son zonas que están en contacto con soluciones electrolíticas y lodos (depósitos orgánicos e inorgánicos).

7.5.4. Cálculo de los anillos

La norma exige que se calcule bajo condición de diseño y bajo condición de prueba hidrostática ya que, aunque se almacenan una variedad de fluidos con una baja gravedad especifica, se debe tener en cuenta que la prueba hidrostática se realiza con agua por ende producirá mayor esfuerzo.

a. Cálculo del anillo #1.

Para este cálculo en condiciones de diseño se utiliza la ecuación (6). La altura del tanque es de 7.2 metros y su diámetro es de 12 metros, ya que las pruebas se hacen con agua se utilizó la gravedad especifica de la misma (G=1). Así pues, reemplazando en la ecuación (6) se tiene:

$$t_d = \frac{4.9(12m)(7.2m - 0.3)(1)}{137} + 3.175\ mm$$

$$t_d = 6.13 \approx 6.35\ mm \approx \frac{1}{4}"$$

Cálculo en condición de prueba hidrostática, reemplazando en la ecuación (7):

$$t_t = \frac{4.9(12m)(7.2m - 0.3)}{154}$$

$$t_t = 2.63 \approx 3\ mm$$

b. Cálculo del anillo #2.

Calculo en condición de diseño, reemplazando en la ecuación (6):

$$t_d = \frac{4.9(12m)(7.2m - 1.8m - 0.3)(1)}{137} + 3.175\ mm$$

$$t_d = 5.40 \approx 6\ mm$$

Cálculo en condición de prueba hidrostática, reemplazando en la ecuación (7):

$$t_t = \frac{4.9(12m)(7.2m - 1.8m - 0.3)}{154}$$

$$t_t = 1.94 \approx 2.5\ mm$$

c. Cálculo del anillo #3.

Calculo en condición de diseño, reemplazando en la ecuación (6):

$$t_d = \frac{4.9(12m)(7.2m - (2 * 1.8m) - 0.3)(1)}{137} + 3.175\ mm$$

$$t_d = 4.60 \approx 4.76\ mm \approx \frac{3}{16}"$$

Cálculo en condición de prueba hidrostática, reemplazando en la ecuación (7):

$$t_t = \frac{4.9(12m)(7.2m - (2 * 1.8m) - 0.3)}{154}$$

$$t_t = 1.26\ mm \approx 1.5\ mm$$

d. Cálculo del anillo #4.

Calculo en condición de diseño, reemplazando en la ecuación (6):

$$t_d = \frac{4.9(12m)(7.2m - (3 * 1.8m) - 0.3)(1)}{137} + 3.175\ mm$$

$$t_d = 3.80\ \approx 4\ mm$$

Cálculo en condición de prueba hidrostática, reemplazando en la ecuación (7):

$$t_t = \frac{4.9(12m)(7.2m - (3 * 1.8m) - 0.3)}{154}$$

$$t_t = 0.57\ mm \approx 0.6\ mm$$

El resultado de los cálculos anteriores se resume en la Tabla 7.

Tabla 7. Cálculo de anillos. Elaboración propia

N°	Material	Espesor de diseño	SI	USC
1	A283 Gr C	6,15 mm	6,35 mm	1/4"
2	A283 Gr C	5,40 mm	6 mm	1/4"
3	A283 Gr C	4,60 mm	4,76 mm	3/16"
4	A283 Gr C	3,80 mm	4 mm	3/16"

Fuente: Elaboración propia.

El espesor de las planchas que componen el cuerpo del tanque debe ser el mayor de los espesores de diseño calculados incluyendo la tolerancia a la corrosión, adicionalmente la norma API 650, 13th Edición, Año 2020 en la sección 5.6.1 determina, con el diámetro nominal del tanque, el espesor mínimo de las planchas del cuerpo incluido la tolerancia a la corrosión y no debe ser menor que los valores de la Tabla 8.

Tabla 8. Espesores mínimos de las planchas del cuerpo.

Nominal Tank Diameter		Nominal Plate Thickness	
(m)	(ft)	(mm)	
< 15	< 50	5	3/16
15 to < 36	50 to < 120	6	1/4
36 to 60	120 to 200	8	5/16
> 60	> 200	10	3/8

Fuente: la norma API 650.

Para tanques con diámetros entre que 15 metros (50 ft) y 3.2 metros (10.5 ft) el espesor nominal de la lámina más baja no debe ser menor que 6 mm (1/4”). De acuerdo con la Tabla 8 podemos ver el diseño de espesores está dentro de los rangos establecidos.

7.5.5. Dimensiones de láminas.

Las láminas de acero A283 Gr C existen comercialmente en presentación 4 ft x 8 ft, 6 ft x 20 ft y 8 ft x 20 ft, al determinar el espesor por el método de un pie se seleccionaron láminas de 1.8 m de altura (6 ft) que corresponde a 6 m (20 ft) de largo. Para hallar el número de láminas necesarias por cada anillo se halla la dimensión necesaria para cubrir una circunferencia del tanque por medio de la ecuación (8).

$$p = 2\pi \mathrm{r} \quad (8)$$

Donde:

$p =$ Distancia circunferencial del tanque, en m
$r =$ El radio del tanque, en m

Reemplazando, se obtuvo:

$$p = 2\pi(6\ m)$$

$$p = 37{,}7\ m$$

Para saber cuántas láminas de 6 m son necesarias para cubrir en su totalidad cada amillo del tanque (n) se divide el valor de p en el largo de la lámina como se expresa en la ecuación (9).

$$n = \frac{p}{largo\ de\ lámina} \quad (9)$$

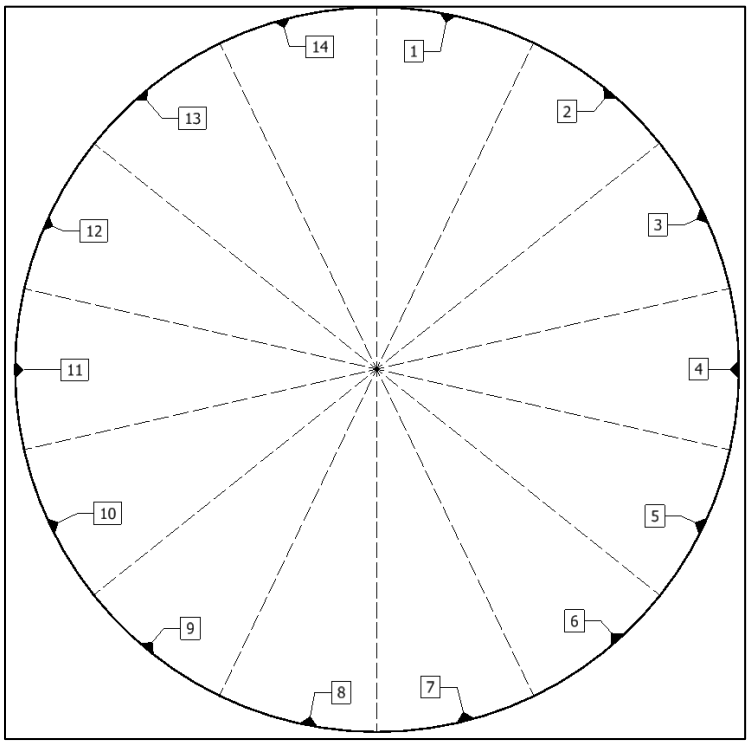
$$n = \frac{37.7}{6}$$

$$n = 6.28\ laminas$$

En este caso se necesitarían 6 láminas de 6 metros y una de 1.7 m de longitud, pero para hacerlo más simétrico, proporcional y eficiente, aprovechar la mayor cantidad de material de cada lamina de 6 metros se decide dejar cada sección que constituye los anillos de 2.69 metros, para así obtener 2 secciones por lamina y de esta forma con 14 partes se completaría la circunferencia total. De igual manera por la dificultad en el acceso al sitio de montaje es mejor tener partes lo más pequeñas posibles.

Se puede observar la distribución circunferencial de secciones en la Figura 13, el resumen de las dimensiones de las láminas se muestra en la Tabla 9.

Figura 13. Conformación de anillos.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Dimensiones de láminas.

N°	Material	Espesor de diseño	SI	USC	Cantidad	Longitud
1	A283 Gr C	6,21 mm	6,35 mm	1/4"	14	2.69 m
2	A283 Gr C	5,50 mm	6,00 mm	1/4"	14	2.69 m
3	A283 Gr C	4,72 mm	4,76 mm	3/16"	14	2.69 m
4	A283 Gr C	3,80 mm	4,00 mm	3/16"	14	2.69 m

Fuente: Elaboración propia

7.5.6. Orientación y distribución de lamina

Para determinar las orientaciones de cada nivel de anillo la norma API 650, 13th Edición, Año 2020 en la sección 5.1.5.2 establece que las juntas verticales entre cada anillo del cuerpo no deben estar alineadas y deben estar desfasadas mínimo una distancia de 5t donde t es el espesor de la lámina más gruesa a unir. De esta forma, a criterio de diseñador, se estableció un ángulo de desfase de 10° entre cada anillo del cuerpo. para calcular la distancia perimetral entre cada junta vertical de cada anillo se utilizó la ecuación (10):

$$A = \theta R \quad (10)$$

Donde:

A = es la distancia (mm)
θ = es el ángulo de desfase (Rad)
R = es el radio del cuerpo del tanque (mm)

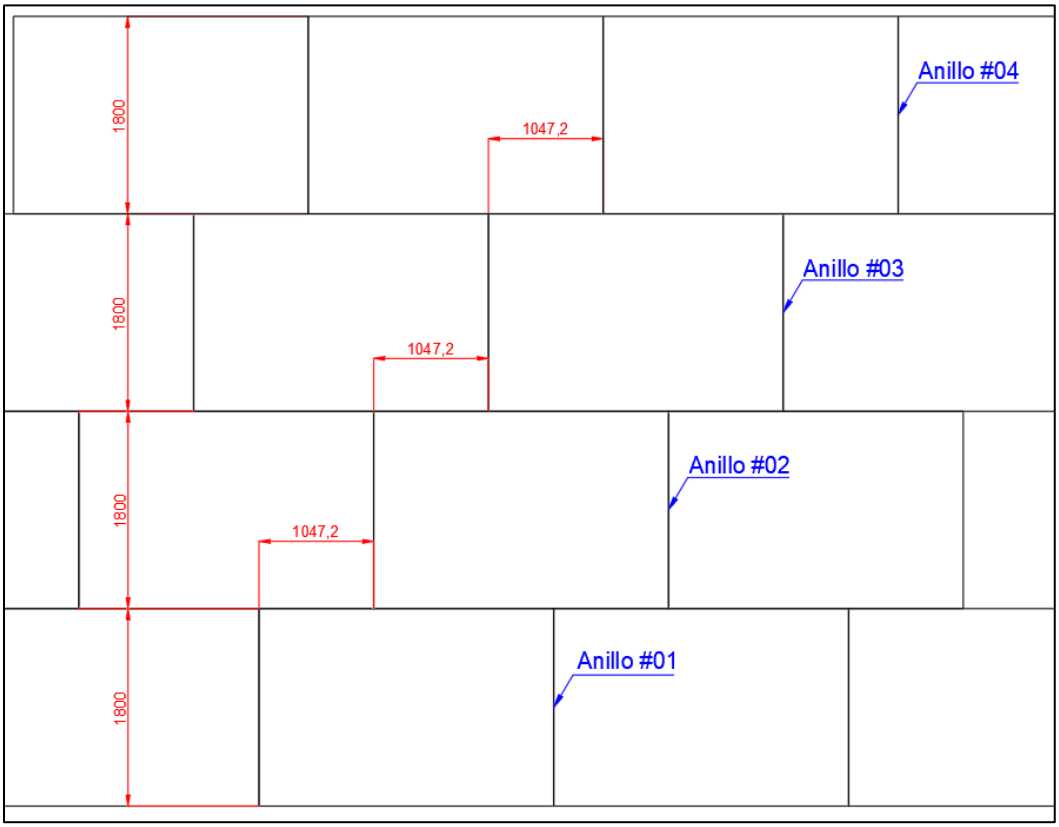
Reemplazando los valores se obtuvo:

$$A = \left(\frac{\pi}{18}\right) * 6000\ mm$$

$$A = 1047.2\ mm$$

En este caso específico, la distancia mínima (en ambos sentidos) entre juntas verticales de cada anillo de la envolvente del tanque es de 31.75 mm (5t), por ende, se determinó que la distancia A calculada anteriormente está en el rango aceptable de diseño. La distribución y orientación, con un ángulo de desfase de 10°, de juntas verticales se puede ver en la Figura 14.

Figura 14. Ubicación de Juntas verticales.



Fuente: Elaboración propia

7.5.7. Masa de la envolvente.

Luego, se procedió a calcular el peso de cada hilera con la ecuación (11) y para determinar el peso total del cuerpo del tanque se suman los resultados de cada hilera como expresa la ecuación (12)

$$m_h = \left((h_{lámina} * L_{lámina} * SI) \ * \rho_{material}\right) * Cantidad \quad (11)$$

Donde:

m_h es la masa de la hilera
$h_{lámina}$ es la altura de la lámina
$L_{lámina}$ es la longitud de la lámina
SI es el espesor de diseño de la lámina
$\rho_{material}$ es la densidad del material de la lámina que para el caso es $7850\,\frac{kg}{m^3}$

Así pues, los cálculos realizados se presentan a continuación.

$$m_{h1} = \left((1.80 * 2.69 * 0.00635)\, m^3 * 7850 \frac{kg}{m^3} \right) * 14 = 3380\ kg$$

$$m_{h2} = \left((1.80 * 2.69 * 0.00635)\, m^3 * 7850 \frac{kg}{m^3} \right) * 14 = 3380\ kg$$

$$m_{h3} = \left((1.80 * 2.69 * 0.00476)\, m^3 * 7850 \frac{kg}{m^3} \right) * 14 = 2535\ kg$$

$$m_{h4} = \left((1.80 * 2.69 * 0.00476)\, m^3 * 7850 \frac{kg}{m^3} \right) * 14 = 2535\ kg$$

La sumatoria del peso de las 4 hileras es el peso total del cuerpo que se calcula con la ecuación (12), los resultados se presentan a continuación.

$$\sum m_c = m_{h1} + m_{h2} + m_{h3} + m_{h4} \quad (12)$$

$$\sum m_c = 11830\ kg$$

Los detalles de diseño se muestran en el anexo D del presente documento.

7.6. DISEÑO Y CÁLCULO DEL FONDO

En la Norma API 650, 13th Edición, Año 2020, Sección 5, punto 5.4 se establecen los principales criterios para diseñar el fondo del tanque. Como primeras consideraciones el estándar establece que el espesor de las láminas no debe ser menor a 6 mm (1/4”) y las láminas donde va a descansar el cuerpo circunferencial del tanque no debe tener un ancho menor a 1800 mm (72”).

Como segunda medida la norma en la sección 5.4.2 especifica que se deben ordenar las láminas del fondo de tamaño suficiente para que cuando sean ensambladas sobre una proyección de al menos 50 mm (2 in) hacia afuera del cuerpo. Adicionalmente laminas del fondo deberán ser soldadas de acuerdo con la sección 5.1.5.4 y 5.1.5.5.

En la sección 5.1.5.4.1 la norma específica el tipo de juntas soldadas para fondos de tanques, dando una breve introducción de la constitución y distribución de los fondos. Según la norma API 650, 13th Edición, Año 2020 el fondo se divide en 2 partes diferentes llamadas placa anular y placa inferior.

El conjunto de placas anulares forma un anillo perimetral sobre el cual descansara el cuerpo del tanque con el objetivo de reducir el número de conexiones soldadas entre el fondo y el cuerpo del tanque. El conjunto de placas inferiores forma el interior del anillo perimetral y aunque no se especifica en la norma, generalmente para estas placas se utiliza el mismo espesor que tienen las placas anulares. Las placas soldadas a tope deben tener bordes paralelos y preparados con ranuras cuadradas o ranuras en V.

7.6.1. Fondo Anular.

Para determinar el espesor del fondo anular la norma establece en la sección 5.5 ciertas condiciones de diseño entre las cuales se muestra la **Tabla 10**, donde a partir del esfuerzo al que está expuesto el primer anillo del cuerpo del tanque y a su espesor se puede determinar fácilmente el espesor de la placa anular que compondrá el fondo anular

Para hallar el esfuerzo en el primer anillo que conforma el cuerpo del tanque se utilizó la ecuación (13).

$$S_d = \frac{4.9D(H-0.3)G}{t_d - CA} \quad (13)$$

Donde:

$t_d =$ El espesor de diseño del cuerpo, en mm
$D =$ El diámetro nominal del tanque, en m
$H =$ El nivel de diseño del líquido, en m
$G =$ Gravedad especifica de diseño del líquido a ser almacenado
$CA =$ La tolerancia para la corrosión
$S_d =$ El esfuerzo admisible para la condición de diseño, en Mpa

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación (13), se tiene que:

$$S_d = \frac{4.9(12)(7.2-0.3)(1)}{6.35-3.175}$$

$$S_d = 127.8\ MPa$$

Tabla 10. Espesores para fondo anular.

Plate Thickness *a* of First Shell Course (mm)	Stress b in First Shell Course (MPa)			
	≤190	≤210	≤ 220	< 250
t≤ 19	6	6	7	9
19<t≤25	6	7	10	11
25 <t≤ 32	6	9	12	14
32 <t≤ 40	8	11	14	17
40 <t≤ 45	9	13	16	19

***a*.** Plate thickness refers to the corroded shell plate thickness for product design and nominal thickness for hydrostatic test design.
b. The stress to be used is the maximum stress in the first shell course (greater of product or hydrostatic test stress). The stress may be determined using the required thickness divided by the thickness from "a" then multiplied by the applicable allowable stress:

Product Stress = ((t_d-CA) / corroded t) (S_d)
Hydrostatic Test Stress = (t_t / nominal t) (S_t)

NOTE: The thicknesses specified in the table, as well as the width specified in 5.5.2, are based on the foundation providing uniform support under the full width of the annular plate. Unless the foundation is properly compacted, particularly at the inside of a concrete ringwall, settlement will produce additional stresses in the annular plate.

Fuente: Adaptada del estándar API 650. “Criterios tomados de la sección 5.5 - tabla 5.1a.“

Con el esfuerzo encontrado y con el espesor del primer anillo que conforma el cuerpo del tanque y gracias a la Tabla 10 se concluyó que el espesor necesario para las láminas que conformaran el fondo anular debe ser de 6 mm, pero adicionalmente se agregara una tolerancia a la corrosión de 3.175 mm (1/8”) para finalmente usar en el fondo anular del tanque láminas de 3/8” de espesor.

Para este tipo de fondos en la sección 5.4.2 se establece que debe existir una distancia de al menos 50 mm o 2 pulgadas desde el borde exterior del fondo anular hasta superficie exterior de la pared del tanque y para determinar la distancia desde la parte interna de la pared del tanque a la unión soldada más cercana se utiliza la ecuación (14). La distancia debe ser mínimo de 600 mm.

$$L = 2\, t_b \sqrt{\frac{F_y}{2\, Y\, G\, H}} \quad (14)$$

Donde:

L es la distancia radial mínima medida desde el borde interior de la carcasa hasta el borde de la placa en el resto de la parte inferior, en mm
t_b es el espesor nominal de la placa anular, en mm
F_y es el límite elástico mínimo de la placa anular a temperatura ambiente, en MPa
Υ es el factor de densidad del agua. MPa por metro, SI: 9,81 / 1000
H es el nivel máximo de líquido de diseño, en m
G es Gravedad especifica de diseño del líquido a ser almacenado

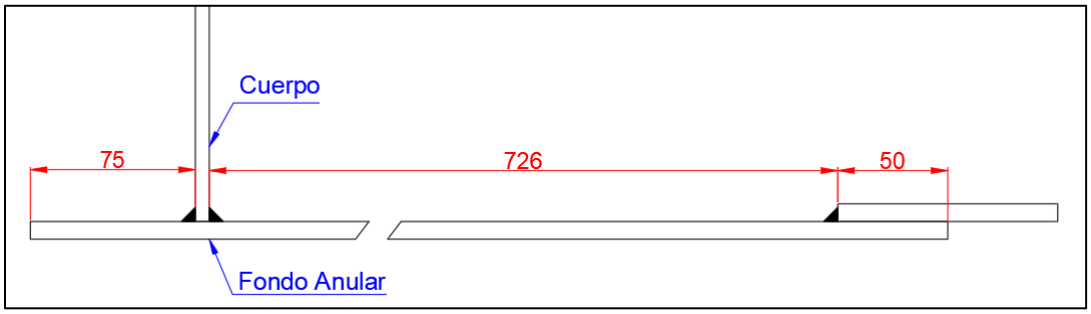
Como se nombró anteriormente se utilizó el acero ASTM 283 Grado C para el diseño, este acero tiene un límite elástico de 205 MPa. Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación (14) se obtuvo lo siguiente:

$$L = 2\ (9.5mm)\sqrt{\frac{205\ MPa}{2 * \frac{9.81}{1000} * 1 * 7.2m}}$$

$$L = 725.7\ mm > 600\ mm$$

Ya que el valor es mayor a 600 mm se conserva el resultado obtenido y con los valores hallados y determinados por la norma se establecen unas medidas finales como se muestran en la Figura 15. Para el mejor aprovechamiento del material se determinó una distancia igual a 75 mm de placa sobresaliente del cuerpo del tanque.

Figura 15. Fondo anular.



Fuente: Elaboración propia

7.6.2. Fondo interior.

Para el diseño de la parte restante del fondo (placas interiores) la norma determina un espesor mínimo de 6mm y estas laminas deben estar unidas a través de juntas soldadas de traslape, estas son esencialmente una versión modificada de la junta a tope y se forman cuando las piezas a unir se colocan en un patrón superpuesto uno encima del otro y se utilizan comúnmente para unir dos piezas con diferentes espesores.

Las soldaduras se pueden realizar en uno o ambos lados. En este sentido la norma API 650, 13th Edición, Año 2020 en la sección 5.1.3.4 permite soldaduras traslapadas simples, solo para laminas en fondo y el techo. Para este tipo de junta soldada la norma en la sección 5.1.3.5 determina que para soldaduras traslapadas con doble soldadura la distancia de traslape debe ser de al menos 5 veces el espesor nominal de la lámina más delgada o 50mm (2 in) cualquiera que sea más pequeño. Para este caso, las placas inferiores, como ya se determinó gracias a la norma, tienen un espesor de ¼”.

Finalmente, se consideró que las planchas interiores al fondo anular deben ser distribuidas uniformemente en ambas direcciones y la distancia traslapada entre cada placa del fondo es de 50 mm (2 in) que es un valor mayor a 5t, adicionalmente, tomando en cuenta la sección 5.1.5.5 de la norma API 650, donde se establece una distancia mínima de 300 mm (12in) entre cada unión de 3 placas (unión resultante cuando se necesitan soldar 3 láminas traslapadas). (Véase la Figura 16)

7.6.3. Distribución de láminas.

Finalmente, para completar el diseño del fondo se recurrió a una distribución de placas interiores usada generalmente en tanques de diámetros pequeños como se muestra en la Figura 17.
Se seleccionaron láminas de acero A283 Grado. C de 6 ft x 20 ft como lo exige la norma en el literal 5.4.1. a continuación se puede ver el ensamble del fondo anular y la distribución del fondo interno cumpliendo con el traslape de 50 mm y respetando la distancia mínima entre juntas.

Figura 16. Espaciamiento mínimo entre juntas del fondo.

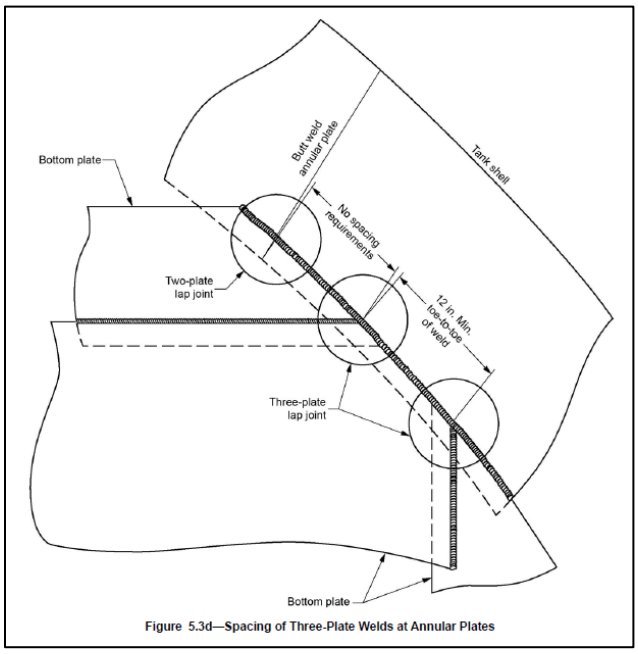
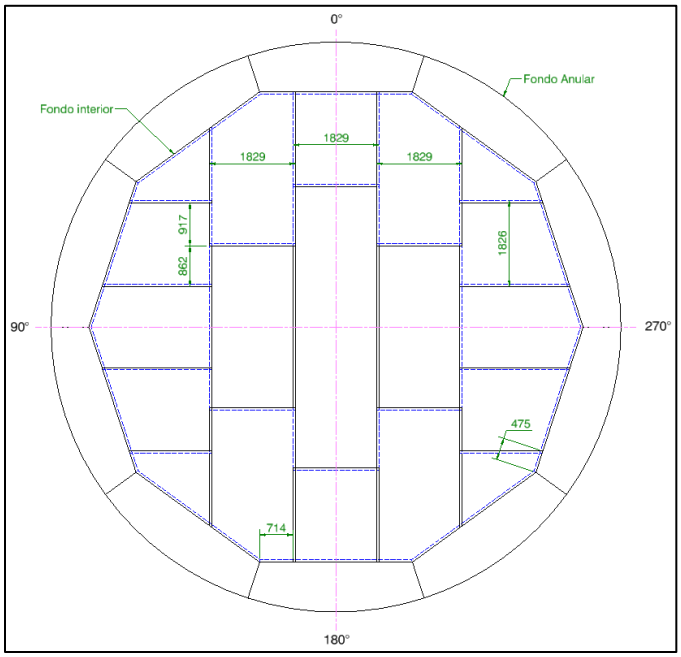


Figure 5.3d—Spacing of Three-Plate Welds at Annular Plates

Fuente: Norma API 650 sección 5.1., Fig. 5.3d.

Figura 17. Distribución de fondo seleccionada.



Fuente: Elaboración propia

7.6.4. Masa del fondo del tanque.

Utilizando software de modelación 3D se puede hallar el peso del fondo de una manera eficiente. Considerando el fondo anular (m_{fa}) y el fondo interior (m_{fi}), la ecuación (15) permite calcular la masa total del fondo del tanque.

$$\sum m_f = m_{fa} + m_{fi} \quad (15)$$

Donde:
$m_{fa} = 2690\ kg$
$m_{fi} = 3392\ kg$

Por lo que la masa total del fondo del tanque es:

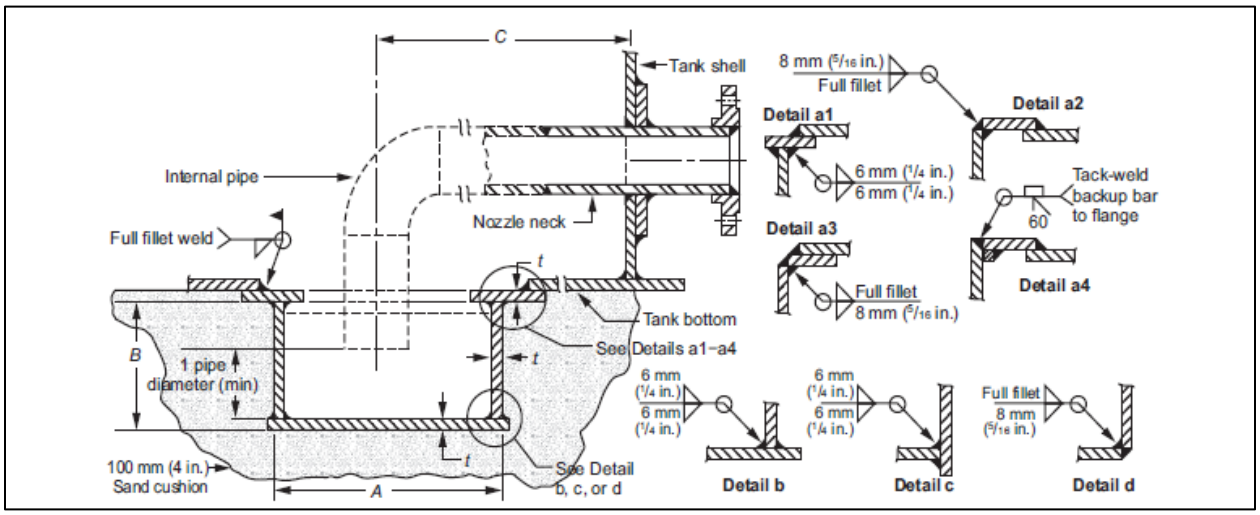
$$\sum m_f = 6682\ kg$$

7.6.5. Sumideros.

En los tanques de almacenamiento se contemplan formas de drenar el fluido restante para realizar mantenimientos e inspecciones periódicas, la implementación de sumideros de extracción se planea, además, para que el agua que contiene el fluido almacenado cuando asiente en el fondo del tanque, producto de la diferencia de densidades, pueda ser drenada.

Se pueden ver en la Figura 18 los parámetros de diseño de sumideros según la norma API650 (sección 5.8. Fig 5.21), en la Tabla 11 se pueden observar los valores asignados en cada variable de la Figura 18.

Figura 18. Sumidero de extracción.



Fuente: Norma API 650 sección 5.8., Fig. 5.21.

Tabla 11. Dimensiones de sumideros de extracción.

NPS	Diameter Of Sump mm A	Depth Of Sump mm B	Distance from Center Pipe to Shell m C	Thickness Of Plates in Sump mm t	Minimum Internal Pipe Thickness mm	Minimum Nozzle Neck Thickness mm
2	610	300	1.1	8	5.54	5.54
3	910	450	1.5	10	6.35	7.62
4	1220	600	2.1	10	6.35	8.56
6	1520	900	2.6	11	635	10.97

Fuente: Adaptado de la tabla 5.16 de la norma API 650.

En este caso se escogió implementar 3 drenajes de extracción NPS 3, cada uno con un diámetro interno de $0.890\,\mathrm{m}$ y una altura de $0.440\,m$. La ecuación (16) permite hallar su capacidad.

$$V_s = \left(\frac{\pi}{4} * {d_i}^2 * h\right)\ [m^3] \quad (16)$$

Donde:
V_s es el volumen de los sumideros
d_i es el diámetro interno
h es la altura

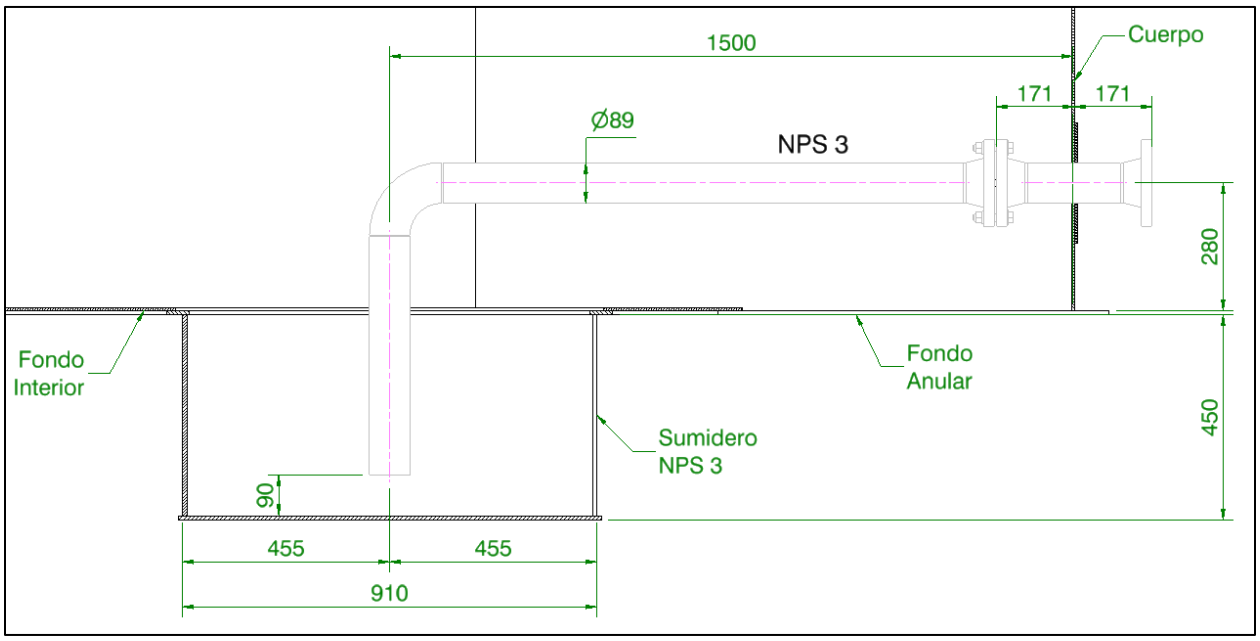
Así pues, remplazando en la ecuación (16), se tiene que V_s es:

$$V_s = \left(\frac{\pi}{4} * (0.890^2) * 0.440\right) \, m^3$$

$$V_s = 0.2730 \, m^3$$

Utilizando 3 sumideros se tiene una capacidad total de $0.8211 \, m^3$, cada sumidero se ubicó a una distancia de $4.5 \, m$ del centro y cada uno se ubicó a $0°, 110° \, y \, 250°$. En la Figura 19 se puede ver el detalle de diseño con medidas finales. El diseño de las conexiones se muestra posteriormente en la sección correspondiente. Los detalles de diseño se muestran en el anexo D del presente documento.

Figura 19. Posición de los sumideros.



Fuente: Elaboración propia.

7.7. DISEÑO DEL TECHO

7.7.1. Techo Tipo Domo

Se selecciono un techo auto soportado, estos techos son generalmente limitados a tanques con un diámetro de 18 m (60 ft) o menos y ya que el fluido a almacenar es un líquido no volátil o de bajo contenido de productos livianos (no inflamables), el tipo de techo escogido para el tanque será domo tipo sombrilla auto soportado que descansará en todo el perímetro de la pared del tanque sobre un anillo rigidizador.

La norma dictamina, en su sección 5.10.6, para techos de domo auto soportados, que las placas que lo conforman deben tener un espesor nominal no inferior a 4.8 mm (3/16 in), adicionalmente cualquier tolerancia de corrosión requerida para las placas de techos autoportantes se agregará al espesor calculado a menos que el comprador especifique lo contrario.

Como nota importante los techos auto soportados cuyas placas están reforzadas por secciones soldadas a las placas no necesitan cumplir con el espesor nominal calculado, pero no deben tener un espesor menor a 5 mm (3/16 in). Los techos tipo domo deben tener un radio mínimo correspondiente a 0.8D o en su defecto un radio máximo de 1.2D. El espesor nominal no debe ser menor que el resultado más grande de las ecuaciones (17) y (18). El espesor corroído no debe ser menor a 13 mm.

$$4x1000\, r_r \sqrt{\frac{B}{1000xE}} + CA \quad (17)$$

$$4x1000\, r_r \sqrt{\frac{U}{1.33x1000E}} + CA \text{ o 5 mm} \quad (18)$$

Donde:

D es el diámetro nominal del tanque, en metros
E es el módulo de elasticidad, en MPa
B es la mayor de las combinaciones de carga 5.2.2 (e) (1) y (e) (2) con carga de nieve equilibrada S_b, en kPa
U es la mayor de las combinaciones de carga 5.2.2 (e) (1) y (e) (2) con carga de nieve desequilibrada S_u, en kPa
r_r es el radio del techo, en metros

7.7.2. Cargas.

Para determinar las cargas del techo del tanque la norma API 650, 13th Edición, Año 2020 en la sección 5.2.2.e.1 y 5.2.2.e.2, provee la combinación de cargas gravitatorias mediante las ecuaciones (19) y (20).

$$B,U = DL + (Lr\ or\ Su\ or\ Sb) + Fpe\ Pe \quad (19)$$

$$B,U = DL + Pe + 0.4(Lr\ or\ Su\ or\ Sb) \quad (20)$$

Donde:

DL es el peso por unidad de área del componente del tanque a analizar, en kPa.
Lr es la carga viva mínima que considerar por unidad de área, en kPa.
Su, Sb es la carga de nieve desequilibrada y equilibrada respectivamente, en kPa.
Fpe es el factor de combinación de presión externa, se define como la relación entre la presión externa de funcionamiento y la presión externa de diseño, el valor mínimo es de 0.4. en kPa.
Pe es la presión externa de diseño, en kPa.

Se diseño el techo con 16 secciones iguales con un radio (R) de rolado de $1.2 * D$, donde (D) es el diámetro del tanque, se estableció de 12 m, de esta forma el radio de rolado de cada lamina que conforma el techo se determinó de 14.4 m. El diseño se muestra en la Figura 20.

Para hallar el peso muerto DL del techo primero debemos hallar su volumen por lo que se simplifico el cálculo del área de un domo simple. El área se halla siguiendo la ecuación (21)

$$A_{domo} = 2\pi Rh \quad (21)$$

Para hallar h_{domo} que es la altura del domo se utiliza la ecuación (22).

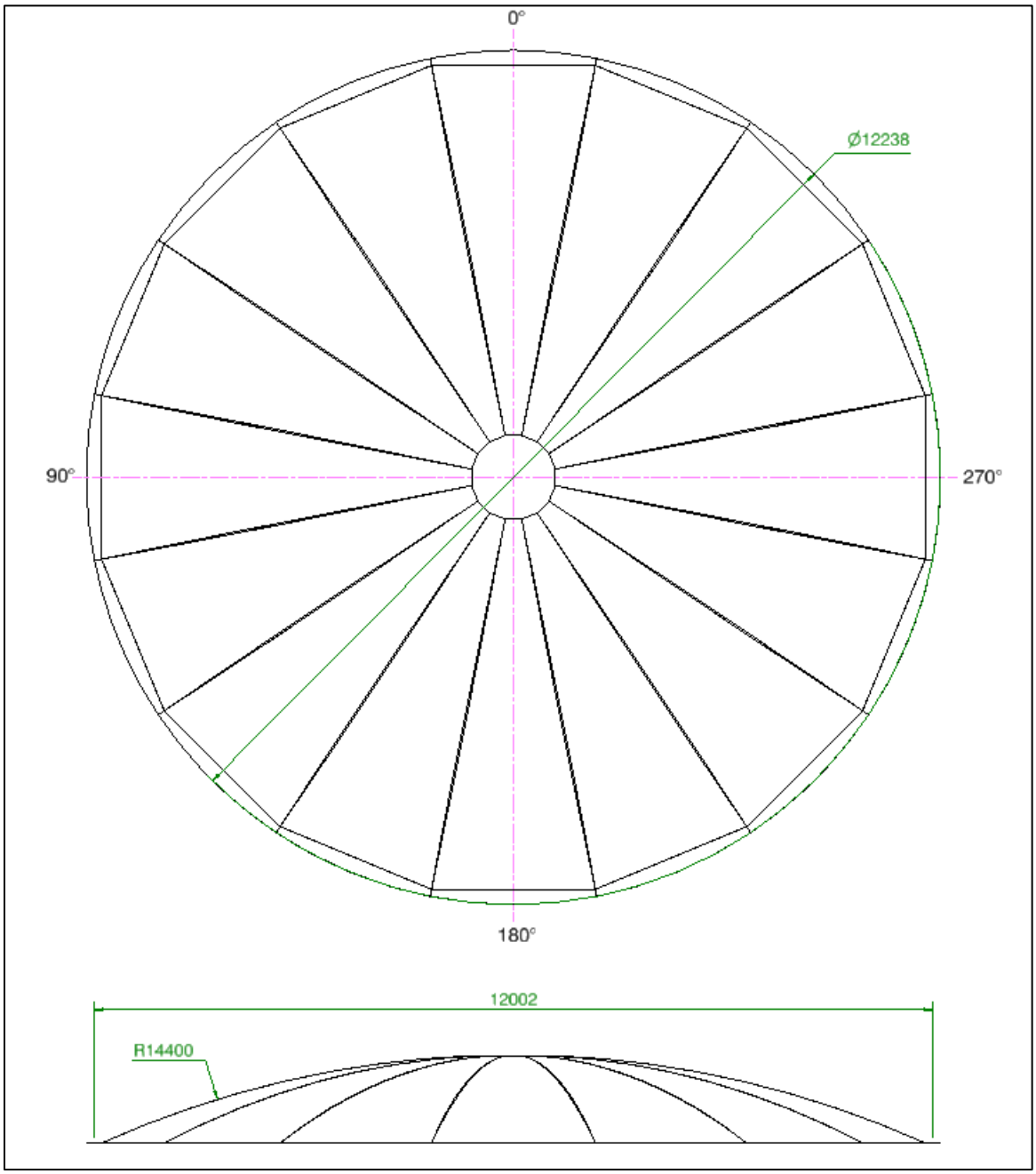
$$h_{domo} = R - \left(R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2\right)^{0.5} \quad (22)$$

Reemplazando valores de R y D en la ecuación (21) se obtiene una altura $h = 1.310\ m$. Así pues, el área es:

$$A_{domo} = 2\pi(14.4\ m)(1.31\ m)$$

$$A_{domo} = 118.5\ m^2$$

Figura 20. Diseño del techo domo - tipo sombrilla. Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Para hallar el volumen se seleccionó el espesor mínimo permitido por la norma para las placas a usar en el techo, que es de 5 mm (t_{domo}) (3/16 in), de esta manera el volumen del domo se calcula con la ecuación (23).

$$V_{domo} = A_{domo} * t_{domo}$$

Por lo que, remplazando los valores conocidos en la ecuación (23) se tiene que el volumen del domo V_{domo} es:

$$V_{domo} = 118.5\ m^2 * 0.005\ m = 0.564\ m^3$$

Luego, conociendo que la densidad del acero es $7850\frac{kg}{m^3}$ se puede hallar la masa aproximada del domo con la ecuación (24).

$$m_{domo} = \rho_{acero} * V_{domo} \quad (24)$$

Remplazando los valores conocidos en la ecuación (24), se tiene que la masa del domo m_{domo} es:

$$m_{domo} = 0.564\ m^3 * 7850\frac{kg}{m^3} = 4429.6\ kg$$

En ese orden de ideas, la carga muerta (Dl) se expresa en términos peso por cada unidad de área. Se utiliza un factor divisor para obtenerla en [kPa] usando la ecuación (25).

$$Dl = \frac{\frac{m_{domo}}{1000} * g}{A_{domo}} \quad (25)$$

Donde g es la gravedad con un valor aproximado de $9.8\frac{m}{s^2}$. Remplazando los datos conocidos en la ecuación (25) se tiene que la carga muerta Dl es:

$$Dl = \frac{\frac{4429.6}{1000}\ kg * 9.8\frac{m}{s^2}}{118.5\ m^2}$$

$$Dl = 0.3663\frac{kN}{m^2}$$

Por otro lado, Lr se define como la carga viva mínima, esta equivale a cargas producidas durante ciclos de mantenimiento por los trabajadores, equipamiento, materiales u objetos que actúen de forma efectiva en el ciclo de vida estructural.

La norma ASCE 7 – 22 define valores mínimos y máximos de cargas vivas en techos, respectivamente $0.58\ kPa\ y\ 0.96\ kPa$. Para realizar el cálculo de la carga se utiliza la ecuación (26).

$$B = Dl + Lr + Su + Sb + (P_{ext} * Fpe) \quad (26)$$

Donde:
Dl es la carga muerta
Lr es el peso vivo
Su son las cargas balanceadas
Sb son las cargas no balanceadas
P_{ext} es la presión externa
Fpe es el factor de combinación

La norma API650 define valores de carga viva entre $0.72\ kPa\ y\ 1.0\ kPa$. Para un diseño más seguro se seleccionó un valor de $1.0\ kPa$. No se contemplaron cargas de nieve, por ende, la carga balanceada y no balanceada es nula, por ende:

$$Su, Sb = 0$$

La presión externa seleccionada, la mínima sugerida por la norma es de $0.25\ kPa$, con un factor de combinación, mínimo recomendado por la norma, $Fpe = 0.4$ este factor se obtiene de la relación entre la presión de operación y la presión de diseño

Reemplazando en la ecuación (26), se obtiene que:

$$B_1 = (0.3663\ +\ 1.0\ +\ 0.4 * 0.25)\ kPa$$

$$B_1 = 1.466\ kPa$$

$$B_2 = \left(0.3663 + 0.25 + 0.4(1.0)\right)\ kPa$$

$$B_2 = 1.016\ kPa$$

Se selecciona el valor mayor entre $B_2\ y\ B_1$ para utilizarlo en las ecuaciones generales de espesor. El módulo de elasticidad del acero A1011M es de $E = 200\ GPa$ y se estableció una tolerancia a la corrosión de $\frac{1}{16} in$ reemplazamos valores en las ecuaciones (17) y (18) para determinar el espesor

$$4x1000\ (14.4\ m)\sqrt{\frac{1.466\ kPa}{1000\ x\ 200000\ MPa}} + 1.5875\ mm = 6.52\ mm$$

$$4x1000\ (14.4\ m)\sqrt{\frac{1.466\ kPa}{1.33x1000(200000\ MPa)}} + 1.5875\ mm = 5.86\ mm$$

Se selecciono el espesor mayor evaluado de 6.520 mm, este se comparó con el espesor seleccionado al hallar el volumen y peso del domo cuyo valor fue de 4.7625 mm. En este caso se obtuvo que el valor hallado es mayor al seleccionado.

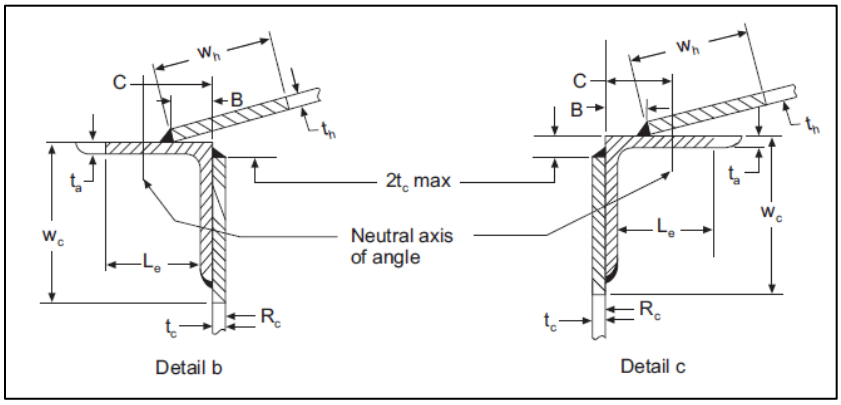
$$4.7625\ mm\ <\ 6.520\ mm\ ; Diseño\ autosoportado\ deficiente$$

Realizando iteraciones se puede mejorar el criterio de diseño aumentando el espesor seleccionado inicialmente a $6.35\ mm\ (\frac{1}{4}in)$ y aumentando el ángulo del domo con la horizontal, lo cual requiere un incremento en el radio de este, pero este nuevo diseño podría incrementar el peso en un 30 % lo cual sería poco efectivo en términos presupuestales. La mejor solución es utilizar secciones soldadas a las placas, lo cual es aprobado por la norma y de esta forma, aunque no cumpla con el espesor mínimo calculado, el diseño seria seguro y funcional.

7.7.3. Anillo superior.

Se procedió a diseñar el anillo superior, este es un ángulo de lados iguales, el cual se une a la parte superior del tanque para rigidizar, además de brindar soporte al techo con el fin de evitar deformaciones del cuerpo, la norma API 650 en su sección 5.1.5.9, establece tamaños mínimos de ángulo superior y le permite al techo tener brida para que pueda descansar de una forma uniforme contra el ángulo superior (Ver Figura 21) logrando mejores condiciones de soldadura.

Figura 21. Detalle conexión.



Fuente: Extraído de la norma API 650.

Para tanques de diámetros mayores a 11 m y menores que 18 m, el ángulo a usar no puede ser más pequeño que un estándar 2" x 2" x ¼". En el anexo F.2 de la norma se muestran detalles permitidos para el diseño de anillos de compresión, para determinar el valor máximo de Wc se utiliza la ecuación (27).

$$Wc = 0.6(Rc * t)^{1/2} \quad (27)$$

Donde:

$Wc =$ es el ancho máximo de participación, en mm
$Rc =$ es el radio interno del tanque, en mm
$t =$ es el espesor calculado mediante $ta + tc$, en mm
$tc =$ es el espesor de la lámina que conforma el cuerpo del tanque, en mm
$ta =$ es el espesor del ángulo, en mm

Cuando el ángulo se sitúa con el fin de soldar por filete como se muestra en la Figura 21 la norma permite que se sumen los espesores el detalle b. Así pues, reemplazando en la ecuación (27), se obtuvo:

$$Wc = 0.6\left(6000 * (\left(\frac{3}{16} + \frac{5}{16}\right) * 25.4)\right)^{1/2}$$

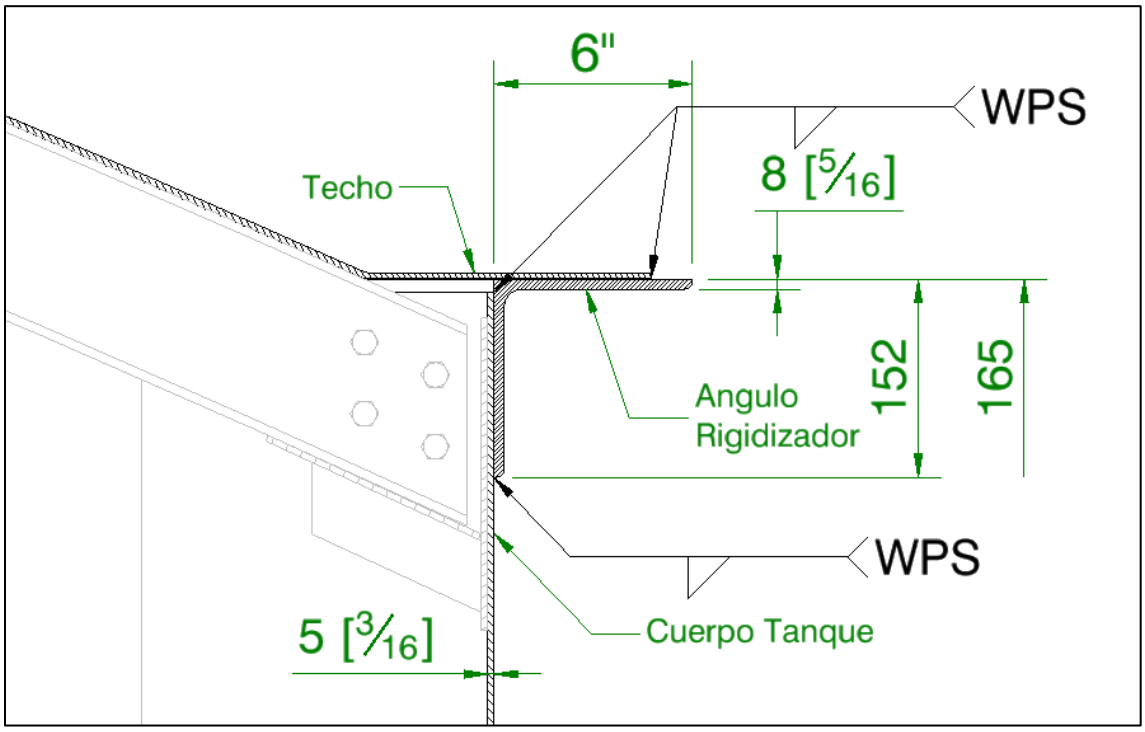
$$Wc = 165.6\, mm$$

El desfase entre el cuerpo del tanque y el ángulo como se muestra en la Figura 19 es $2tc$, es decir, 10 mm. Debido a que se decidió diseñar el techo con una pestaña como brida, es necesario utilizar un ángulo que tenga una buena proyección externa, por ende, se seleccionó un ángulo de $6\ \text{pulg} \times 6\ \text{pulg} \times \frac{3}{8}\ \text{pulg}$ con una densidad lineal de $22.2\frac{kg}{m}$ comercialmente fácil de encontrar en la industria. Comprobando que el tamaño seleccionado cumpla los requisitos de la norma, analizamos la siguiente desigualdad:

$$165.6\, mm > 10mm + 152mm; Diseño\ optimo$$

Cumpliéndose esta, se conservó el tamaño seleccionado él cual se puede observar en detalle en la Figura 22. Por otra parte, La norma no especifica una zona adecuada para realizar la soldadura entre el techo y el ángulo superior cuando el tipo de unión es cara plana contra otra cara plana, por esta razón, se decidió colocar cartelas al ángulo para darle más rigidez al ángulo mejorando la posición del eje neutro.

Figura 22. Detalle Preliminar unión techo – Angulo superior (sección Transversal).



Fuente: Elaboración propia.

7.7.4. Masa del Techo del tanque

Para determinar el peso total del techo del tanque (m_t), al peso de las laminas (m_{domo}) calculado le sumamos el 3% para compensar el peso del borde horizontal que actuara como brida (m_l), además, se tomó en cuenta el peso del ángulo superior (m_a), según catálogos este cuenta con un peso linear (m_b) de $22.20\ kg$. Por último, se suma el peso de la estructura (m_e), de esta forma (m_t) se calculó así:

$$m_l = m_{domo} + 3\% m_{domo} \quad (28)$$

Remplazando los valores conocidos en la ecuación (28) se tiene que

$$m_l = 4429.6 + (4429.6 * 3\%) = 4562.9\ kg$$

Luego, calculando el peso del ángulo superior con la ecuación (29) se tiene que

$$m_a = m_{b*} 2\,\pi * 6.05 \quad (29)$$

Remplazando los valores conocidos en la ecuación (29) se tiene que

$$m_a = 22.20\ kg * 2\,\pi * 6.05 = 843\ kg$$

Con ayuda del software de modelación 3D se pudo determinar el peso de la estructura, el cual tienen un valor de $m_e = 764\ kg$. Por último, el peso total del techo del tanque se calculó usando la ecuación (30).

$$m_t = m_l + me$$

Remplazando los valores conocidos en la ecuación (30) se tiene que m_t es

$$m_t = 4562.9 + 764 = 5327\ kg$$

Los detalles de diseño se muestran en el anexo D del presente documento.

7.8. DISEÑO DE VIGAS DE REFUERZO

Los anillos de refuerzo, en tanques, son usados para mantener la redondez cuando este se encuentra sujeto a fuerzas debido al viento y fuerzas debió a presiones de vació. los parámetros para el diseño de los anillos de refuerzo para contrarrestar cargas debido al viento se detallan en la norma API650 y todos los tanques deben ser reforzados cuando así lo requiera la sección 5.9.6. esta metodología de diseño también se aplica a los tanques de techo flotante cubiertos en el anexo C de la norma. la viga superior y las vigas de viento intermedia deben cumplir, en material y tamaño, con los requisitos expuestos en la norma.

Estos refuerzos pueden ser fabricados a partir de secciones estructurales comerciales o pueden ser realizados con combinaciones de varios tipos de secciones ensambladas por soldadura, la periferia de los refuerzos no necesariamente debe ser circular, la norma permite construcciones poligonales.

En caso de utilizar secciones angulares, la norma establece un tamaño mínimo de $65mm$ x 65mm $x\ 6mm$, en caso de uso de placas para anillos de refuerzo fabricados el espesor nominal mínimo de 6 mm (0.236 Pulg). Los anillos de refuerzo que puedan atrapar fluidos deben estar provistos de orificios de drenaje adecuados. El diámetro de estos no debe tener un tamaño menor a 25 mm (1 Pulgada).

Como estos refuerzos rodean por completo la periferia del cuerpo del tanque, las uniones soldadas que unen los anillos a la carcasa del tanque se cruzan con las uniones verticales del tanque, se establece en la norma que cualquier unión soldada de empalme en el anillo debe ubicarse a un mínimo de 150 mm (6 Pulgadas) de cualquier junta vertical. El método más común para diseñar estos cruces es con el uso de un agujero “pasa ratón” en el anillo justo en la costura vertical del tanque. Cabe recalcar que cuando se usa este método se debe mantener el módulo de sección requerido y el espaciamiento entre uniones soldadas.

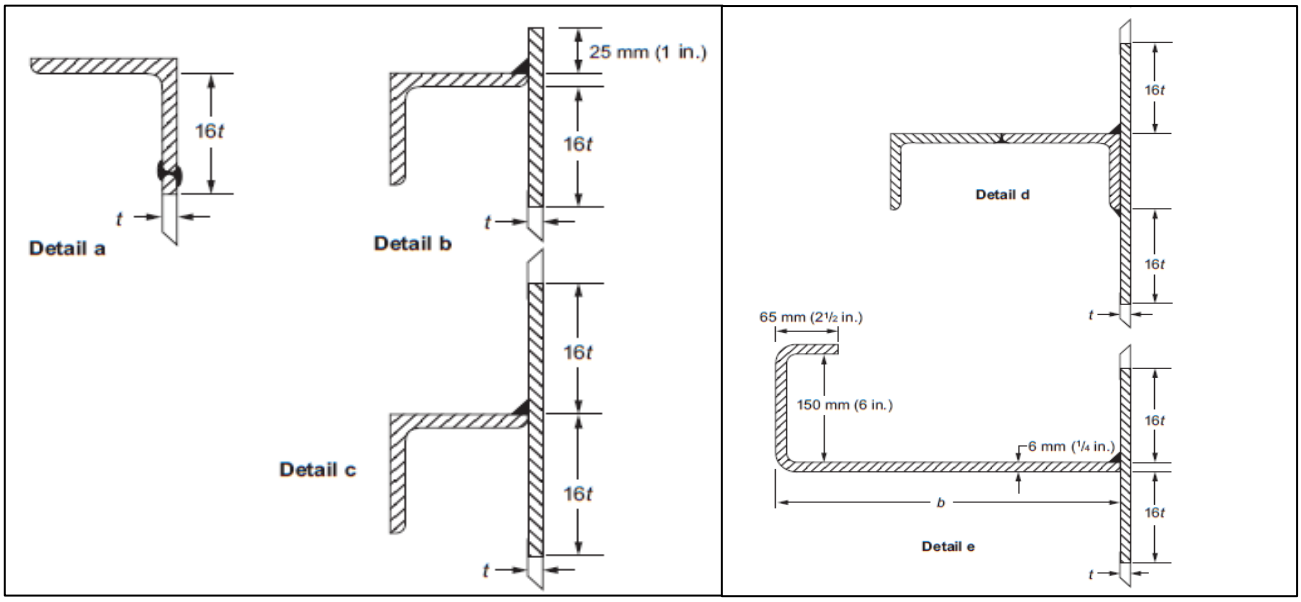
El módulo de sección mínimo requerido de la viga de viento intermedia deberá ser determinado con la ecuación (31).

$$Z = \frac{6\,h_1 D^2}{0.5F_y}\left(\frac{P_{wd}}{1.72}\right) \quad (31)$$

Donde:
Z es el módulo de sección mínimo requerido, en cm^3
D es el diámetro nominal del tanque, en metros
h_1 es la distancia vertical entre la viga de viento intermedia y el ángulo superior, en metros
F_y es el límite elástico mínimo del cuerpo del tanque y del anillo de refuerzo o 210 MPa, el que sea menor
P_{wd} es la presión de diseño del viento, esta incluye un arrastre interno, $P_{wv} + 0.24$, en kPa
P_{wv} es la presión del viento, a 10 metros sobre el suelo, según el código de construcción aplicable esta incluye un arrastre interno, o, $P_{wv} = 1.48 * \left(\frac{V}{190}\right)^2$ en kPa, donde la velocidad de diseño del viento es usada.
V es la velocidad de diseño del viento (3-sec gust). En km/h

Normativamente se utilizan soportes para estos anillos de refuerzo cuando la dimensión del horizontal soldado al tanque supere en 16 veces su espesor. Estos soportes deben estar espaciados en intervalos requeridos para la carga viva y la carga muerta, sin embargo, este espacio no debe exceder en 24 veces el ancho del ala de compresión exterior (véase la Figura 23).

Figura 23. Módulos de sección en vigas de refuerzo. Fuente: Tomado de la norma API 650 sección 5.9., Fig. 5.24.



Fuente: Elaboración propia.

7.8.1. Altura no Reforzada

Para verificar la necesidad del uso de estas secciones intermedias de refuerzo tomamos en cuenta la velocidad del viento en la zona donde se construirá el tanque que es de 20 km/h. Se utilizo la ecuación (32) para calcular la altura reforzada.

$$H_1 = 9.47t\sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} * \frac{1.72}{P_{wd}} \quad (32)$$

Donde:

H_1 es la altura máxima del cuerpo no rigidizado, en metros
t es el espesor nominal, a menos que se especifique lo contrario, de la parte mas delgada del cuerpo, en milímetros
D es el diámetro nominal del tanque, en metros
P_{wd} es la presión de diseño del viento, esta incluye un arrastre interno en kPa, se calcula con la ecuación (33)

$$P_{wd} = P_{wv} + 0.24 \quad (33)$$

P_{wv} es la presión del viento, a 10 metros sobre el suelo, según el código de construcción aplicable esta incluye un arrastre interno en kPa, donde la velocidad de diseño del viento es usada. Se calcula usando la ecuación (34).

$$P_{wv} = 1.48 * \left(\frac{V}{190}\right)^2 \quad (34)$$

Reemplazando los valores en las ecuaciones (33) y (34) se obtiene:

$$P_{wv} = 1.48 * \left(\frac{30}{190}\right)^2 (33)$$

$$P_{wv} = 0.01639\ kPa$$

$$P_{wd} = 0.01639 + 0.24\ (34)$$

$$P_{wd} = 0.2563\ kPa$$

Para obtener una mayor seguridad los compradores establecen que se use el espesor sin la tolerancia a la corrosión, de este modo:

$$t = \left(\frac{3}{16} - \frac{1}{8}\right) * 25.4 = 1.5875\ mm$$

Reemplazando en la ecuación (32).

$$H_1 = 9.47 * (1.587)\sqrt{\left(\frac{1.58}{12}\right)^3} * \frac{1.72}{0.2563}$$

$$H_1 = 4.8526\ m$$

7.8.2. Altura Transformada.

Después de obtener la altura máxima del cuerpo no reforzado, Se procede a calcular la altura del cuerpo del tanque transformada mediante la ecuación (35).

$$W_{tr} = W\sqrt{\left(\frac{t_{uniform}}{t_{actual}}\right)^5} \quad (35)$$

Donde:

W_{tr} es el alto transformado de cada hilera del cuerpo del tanque, en milímetros.
W es la altura actual de cada hilera que compone el tanque, en milímetros.
$t_{uniform}$ es el espesor nominal, a menos que se especifique lo contrario, de la hilera del cuerpo del tanque más delgada, en milímetros.
t_{actual} es el espesor nominal, a menos que se especifique lo contrario, de la hilera del cuerpo para el que se calcula la altura traspuesta, en milímetros.

Reemplazando valores para cada hilera del cuerpo del tanque en la ecuación (35) se obtiene el alto transformado de cada hilera del cuerpo del tanque, los resultados se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12. Alturas del cuerpo del tanque transformada por hileras y total.

Hilera	$\boldsymbol{W(mm)}$	$\boldsymbol{t_{actual}(mm)}$	$\boldsymbol{t_{uniform}(mm)}$	$\boldsymbol{W_{tr}(mm)}$
1	1800	6,35	4,7625	876,8507
2	1800	6,35	4,7625	876,8507
3	1800	4,7625	4,7625	1800
4	1800	4,7625	4,7625	1800
			$\boldsymbol{Ht(mm)}$	5353,7014

Fuente: Elaboración propia

La suma de las alturas transformadas de cada hilera da como resultado la altura del cuerpo transformada. Esto se expresa en la ecuación (36).

$$Ht = \sum W_{tr} = W_{tr1} + W_{tr2} + W_{tr3} + W_{tr4} \quad (36)$$

$$Ht = 5353.70\, mm$$

Si la altura del cuerpo transformada es mayor que la altura máxima sin refuerzo, se requiere una viga de viento intermedia.

$$Ht > H_1$$

$$5.3537\, m > 4.8526\, m$$

Como la desigualdad se cumple, se procedió a agregar al diseño una viga intermedia; para hallar la altura a la cual se coloca este refuerzo (h_2), la norma establece que para obtener una estabilidad igual por encima y por debajo de la

viga de viento intermedia, esta debe ubicarse en la altura media de la altura del cuerpo transformado (h_{2t}).

La viga de refuerzo, en el cuerpo real del tanque, debe estar ubicada en la misma hilera y posición relativa que la ubicación de la viga en el cuerpo transformado.

$$h_{2t} = \frac{5353.70}{2} = 2676.85\ mm$$

Con esta cota, la viga de refuerzo quedaría ubicada $923.15\ mm$ sobre la junta de la 2da y 3ra hilera del cuerpo del tanque transformado, relativamente, esta altura equivale a $4523.15\ mm$ en el tanque real.

7.8.3. Módulo de sección y selección de perfil.

Para calcular el módulo de sección mínimo requerido se necesita la distancia que existe entre la viga de viento intermedia y el ángulo superior, como se diseñó anteriormente el ángulo superior se ubica 10 mm por sobre la altura del tanque, recordando que la altura del tanque son 7.2 metros, de esta forma se obtiene:

$$h_1 = 7.210\ m - 4.523\ m = 2.687\ mm$$

reemplazando en la ecuación (31) se obtiene que el módulo de sección es:

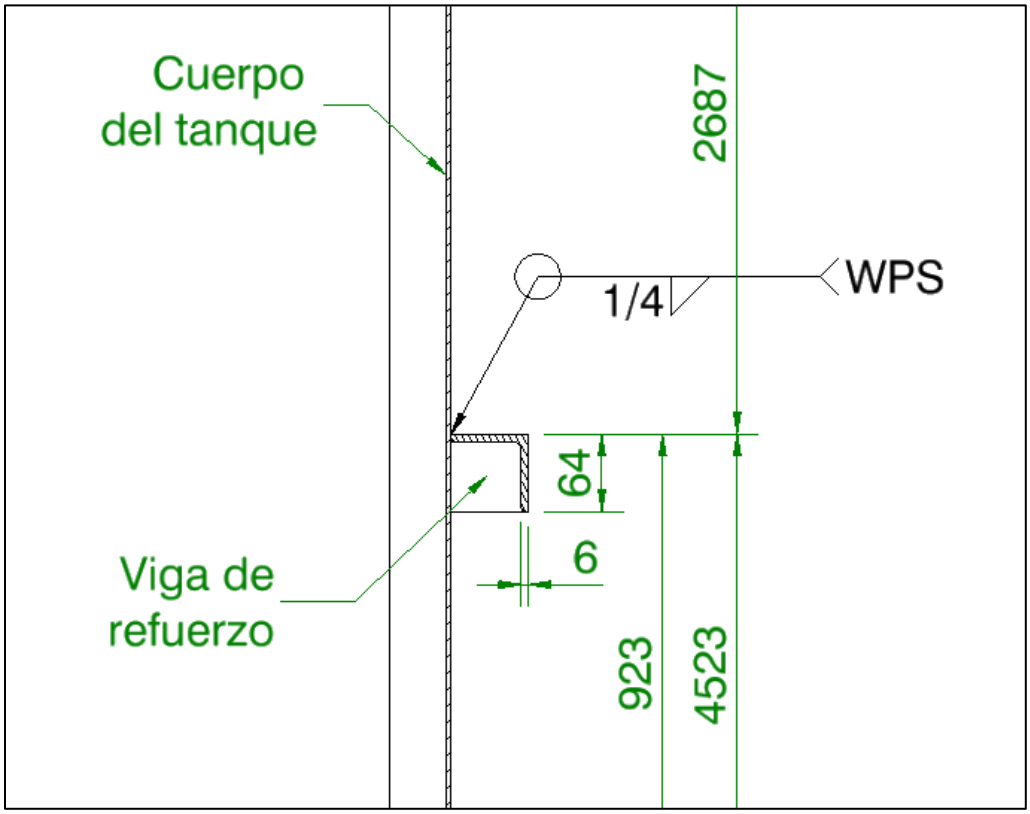
$$Z = \frac{6 * 2.687 * 12^2}{0.5 * 205}\left(\frac{0.2563}{1.72}\right)$$

$$Z = 3.376\ cm^3$$

Este módulo de sección se puede satisfacer mediante el uso de cualquier arreglo estructural mostrado en la Figura 23. De las posibles soluciones se optó por seleccionar el detalle C.

Es común encontrar en catálogos y manuales de perfilería las propiedades mecánicas y geométricas de secciones comerciales, como se nombró anteriormente el tamaño mínimo para el uso de perfiles angulares permitidos por la norma es de $65\text{mm x } 65\text{mm x } 6\text{mm}$, este tiene un módulo de sección de $6.4\ cm^3$. Este valor supera en casi 100 % al requerido, así que es perfecto para usar. La posición se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Ubicación viga de refuerzo.



Fuente: Elaboración propia

7.8.4. Masa de viga de refuerzo.

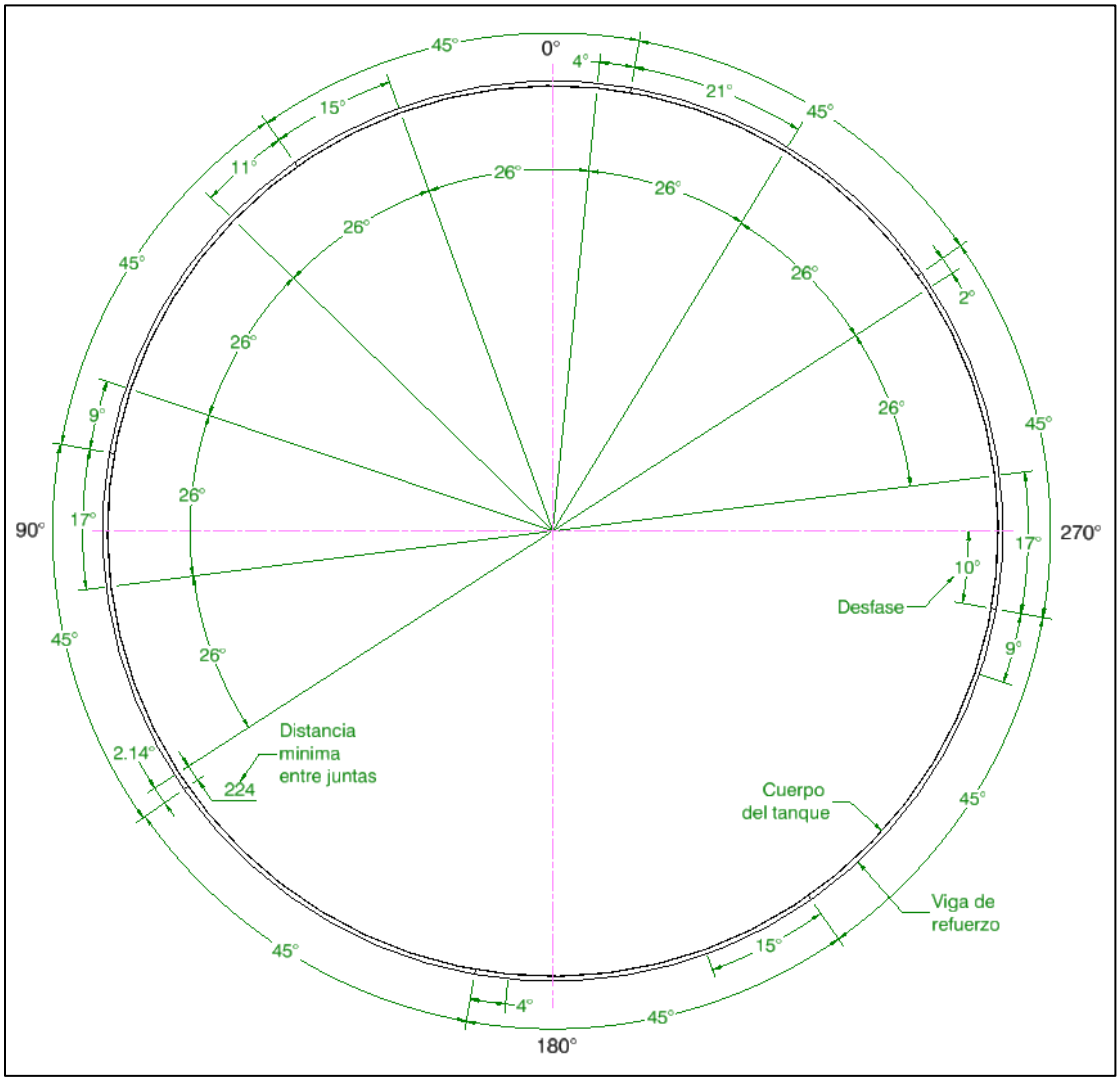
El peso de la viga de refuerzo se calculó con la ayuda de catálogos estructurales donde se define su peso linear de $6.10\ kg$ al multiplicar por el diámetro obtenemos su peso total.

$$m_v = 6.10 * 2\,\pi * 6.0 = 230\ kg$$

7.8.5. Distribución y orientación.

Se escogió dividir circunferencialmente a la viga de refuerzo en 8 partes iguales. Como se describió anteriormente las juntas soldadas a tope no deben estar a menos de $150\ mm$ de cada junta vertical del cuerpo del tanque, de esta forma se decidió rotar en $-10°$ la primera junta de la viga de refuerzo con respecto a la horizontal como se muestra en la Figura 25.

Figura 25. Distribución angular de viga de refuerzo con respecto a la 3ra hilera del tanque.



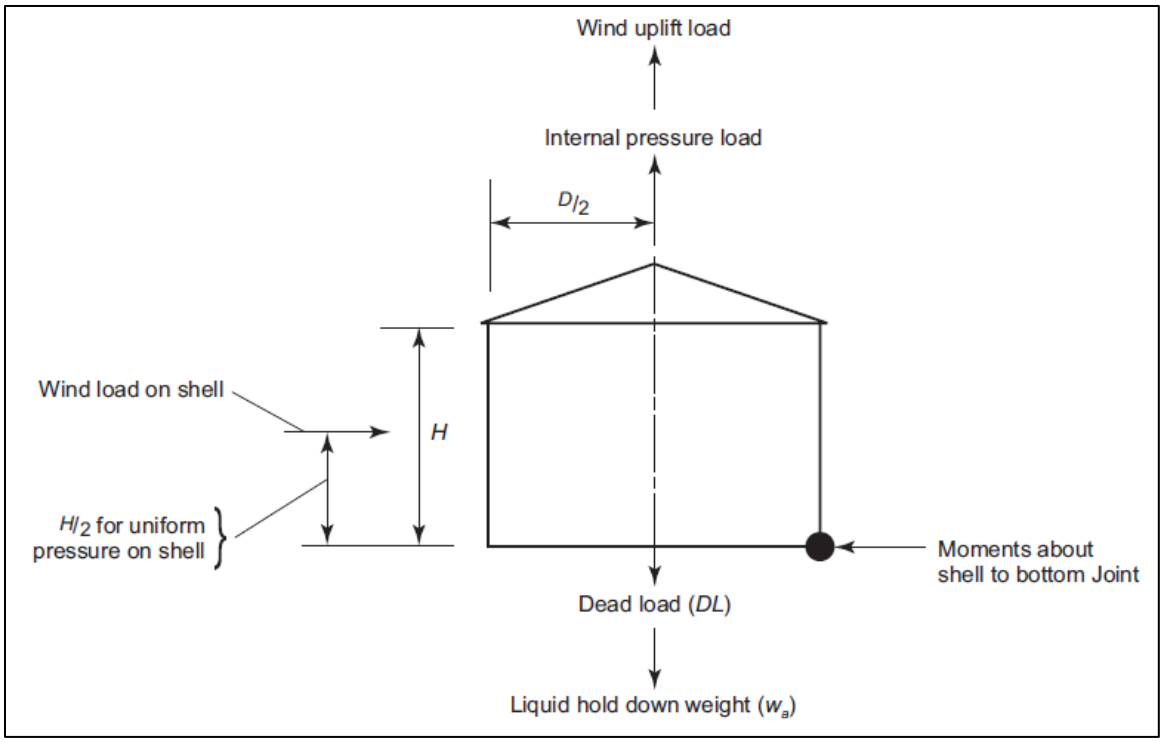
Fuente: Elaboración propia

Cada parte de la viga comprende un ángulo de $45°$ (8 partes iguales), por otra parte, cada sección de la 3ra hilera del tanque, como se detalló anteriormente, comprende un ángulo de $26°$. Como se muestra en la imagen, el menor desfase entre estas dos distribuciones es de $2.14°$ que equivale a una longitud de $224\ mm$, de esta forma se garantizó que la distancia entre cada junta de la viga de refuerzo con las juntas verticales de la tercera hilera del tanque no tenga una distancia menor a $150\ mm$.Para más detalles de diseño ver el anexo D del presente documento.

7.9. ESTABILIDAD DE VOLTEO

En esta sección se estudió la capacidad de los tanques para permanecer estables frente a las cargas generadas por la presión del viento, estas se aplican directamente al cuerpo del tanque y por ende se producen momentos en él, la Figura 26 ilustra las cargas mencionadas.

Figura 26. Verificación de vuelco para tanques auto anclados.



Fuente: Norma API 650 sección 5.11., Fig. 5.27

El correcto análisis de estas fuerzas aplicadas ayuda a establecer la estabilidad frente al volteo del tanque. Para continuar con los demás cálculos del tanque es necesario calcular el peso total del tanque.

7.9.1. Masa total del tanque.

Para determinar el peso del cuerpo del tanque (m_s) al calculado (masa de la envolvente (m_c) se adiciona el peso del ángulo superior (m_a) y de la viga de refuerzo (m_v). Reuniendo los resultados anteriores obtenemos la ecuación (37).

$$Masa\ Cuerpo\ (M_s) = m_c + m_v + m_a \quad (37)$$

$$Masa\ Cuerpo\ (M_s) = 11830\ kg + 843\ kg + 230\ kg = 12903\ kg$$

$$Masa\ Fondo\ (M_b) = 6682\ kg$$

$$Masa\ Techo\ (M_r) = 5327\ kg$$

7.9.2. Criterios de estabilidad.

Los tanques no anclados deben cumplir los requisitos del punto 5.11.2.1 y 5.11.2.2 de la norma API 650 13th ed. De acuerdo con la sección 5.11.2.1 los tanques auto anclados deben satisfacer los siguientes criterios:

1. $0.6M_w + M_{Pi} < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR}$
2. $M_w + F_P(M_{Pi}) < (\frac{M_{DL}+M_F}{2}) + M_{DLR}$
3. $M_{ws} + F_P(M_{Pi}) < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR}$

Donde:

F_P es el factor de combinación de presión.
M_{Pi} Es el momento sobre la junta del cuerpo y el fondo debido a la presión interna de diseño.
M_w Es el momento de vuelco alrededor de la junta del cuerpo y el fondo debido a la presión del viento en sus 2 componentes.
M_{DL} Es el momento sobre la junta del cuerpo y el fondo debido al peso del cuerpo más la estructura del techo.
M_F Es el momento sobre la junta del cuerpo y el fondo debido al peso del fluido almacenado.
M_{DLR} Es el momento sobre la junta del cuerpo y el fondo debido al peso de las láminas del techo más cualquier estructura adjunta.
M_{ws} Es el momento de vuelco sobre la junta del cuerpo y el fondo debido a la presión del viento horizontal.

7.9.3. Cálculo de cargas y momentos.

7.9.3.1. Momento de vuelco por carga sobre la envolvente.

Para hallar los datos necesarios para cumplir los criterios indicados en la sección 5.11.2.1 de la norma tenemos primero se tuvo que verificar el punto 5.2.1. la presión del viento, a 10 metros sobre el suelo es:

$$P_{ws} = 0.89 * \left(\frac{V}{190}\right)^2 kPa \quad (38)$$

Donde:
$V =$ es la velocidad de diseño del viento (3-sec gust). En km/h

La velocidad de diseño del viento se estableció en $20\frac{km}{h}$, reemplazando esta información en la ecuación (38) se obtuvo:

$$P_{ws} = 0.89 * \left(\frac{20}{190}\right)^2$$

$$P_{ws} = 0.0098615\ kPa$$

Segundo, se procedió a hallar el área del cuerpo expuesta a la dirección del viento, esta se halla calculando el área de la envolvente, sabiendo que el radio es de $6\ m$ y la altura $7.2\ m$, se tiene que:

$$A_1 = \pi * 12 * 7.2 = 135.7\ m^2$$

Para fines prácticos el área adicional que involucra el área de escaleras, conexiones y accesorios se asume como el $15\ \%$ del área calculada A_1, finalmente obtenemos el área total expuesta:

$$A_1 + (0.15 * A_1) = 156.1\ m^2$$

Con los datos obtenidos se procedió a hallar la carga de viento sobre el cuerpo del tanque multiplicando la presión estática aplicada sobre el cuerpo por el área expuesta con ayuda de la ecuación (39).

$$F_{ws} = A_1 *\ P_{ws} \quad (39)$$

$$F_{ws} = 156.1m^2 *\ \ 0.0098615\ kPa$$

$$F_{ws} = 1.55\ kN$$

Con esta fuerza se puede hallar el momento de vuelco por carga sobre la envolvente del tanque, según la Figura 26, asumiendo que existe una presión uniforme sobre el cuerpo, la fuerza se aplica al medio de la altura total. De esta forma el momento de vuelco sobre la junta del cuerpo y el fondo debido a la presión del viento horizontal es:

$$M_{ws} = 1.55\ kN * \left(\frac{7.2\ m}{2}\right) = 5.55\ kNm$$

7.9.3.2. Momento de vuelco por succión en el techo.

Se hallo la presión por succión del techo según parámetros vistos en la sección 5.2.1 de la norma API 650 13th edición mediante la ecuación (40).

$$P_{wr} = 1.48 * \left(\frac{V}{190}\right)^2 kPa \quad (40)$$

Donde:

$V =$ es la velocidad de diseño del viento (3-sec gust). En km/h

La velocidad de diseño del viento se estableció en $20\ \frac{km}{h}$, reemplazando se obtuvo que la presión por succión del techo es:

$$P_{wr} = 1.48 * \left(\frac{20}{190}\right)^2$$

$$P_{wr} = 0.01639\ kPa$$

Para encontrar la fuerza de levantamiento del techo por succión se definió el área donde actúa la presión como el área que ocupa el tanque en el suelo, establecido esto la fuerza obtenida se puede calcular con la ecuación (41)

$$F_{wr} = P_{wr} * \pi * r^2 \quad (41)$$

$$F_{wr} = 1.85\ kN$$

Con esta fuerza se puede hallar el momento de vuelco por succión en el techo del tanque, según la Figura 26 la fuerza se aplica al centro del tanque. De esta forma:

$$M_{wr} = F_{wr} * r = 11.13\ kNm$$

El momento total de vuelco por acción del viento se calcula sumando los 2 momentos hallados anteriormente:

$$M_w = M_{wr} + M_{ws} = 16.67\ kNm$$

7.9.3.3. Momento resistente por pesos.

Primero se calculó el momento resistente de envolvente que es el momento generado en el tanque debido al peso del cuerpo y la estructura que está unida a él y se calcula con la ayuda de la ecuación (42).

$$M_{DL} = M_s * g * r = 12903\ kg * 10\frac{m}{s^2} * 6 \quad (42)$$

$$M_{DL} = 774.18\ kNm$$

Luego se calculó el momento resistente de techo y accesorios que es el momento generado en el tanque debido al peso del techo y se calcula con la ayuda de la ecuación (43).

$$M_{DLR} = M_r * g * r = 5327\ kg * 10\frac{m}{s^2} * 6 \quad (43)$$

$$M_{DLR} = 320\ kNm$$

Luego se procedió a calcular el momento resistente que provoca el fluido almacenado que es el momento generado en el tanque debido al peso del fluido por unidad de longitud circunferencial basado en la gravedad especifica de 0.7 o en la del fluido actual (cualquiera sea mejor) y con una altura de la mitad de la altura de diseño H.

w_L debe ser menor de $70.4 * H * D$ y se calcula con la ayuda de la ecuación (44).

$$w_L = 59(t_b - CA)\sqrt{(F_{by}H)} \quad (44)$$

De este modo el valor seleccionado será el mínimo calculado a partir de la ecuación (45).

$$w_L = Min\left(70.4 * HD; 59(t_b - CA)\sqrt{\left(F_{by}H\right)}\right) \quad (45)$$

Donde:

F_{by} es el límite elástico mínimo especificado de las placas inferiores debajo de la envolvente del tanque, en MPa
G es la gravedad especifica del fluido almacenado o 0.7
H es la altura de diseño del líquido, en metros
D es el diámetro del tanque, en metros
t_b es el espesor corroído requerido del fondo anular, el cual resistirá el volteo provocado por el viento, en milímetros.

Reemplazando los valores, se obtiene:

$$w_L = 70.4 * 7.15 * 12 = 6040.32\ N/m$$

$$w_L = 59(9.525 - (2 * 3.175))\sqrt{(205 * 7.15)} = 7171.75\ N/m$$

Seleccionando el menor valor, se calculó el momento debido al peso del fluido con la ecuación (46).

$$M_F = \frac{w_L * H * D}{2} \quad (46)$$

$$M_F = 260941.8\ Nm$$

Se considera el momento debido a la presión interna del tanque nulo $M_{Pi} = 0$

7.9.4. Anclajes.

Reemplazando los valores hallados se procede a evaluar los criterios establecidos por la norma.

1. $0.6M_w + M_{Pi} < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR} = 0.6 * (16.67\ ) + 0 < \frac{774.18}{1.5} + 320$
$$10\ kNm < 836\ kNm$$

2. $M_w + F_P(M_{Pi}) < \left(\frac{M_{DL}+M_F}{2}\right) + M_{DLR} = 16.67 + 0 < \left(\frac{774.18+261}{2}\right) + 320$
$$16.67\ kNm < 837\ kNm$$

3. $M_{ws} + F_P(M_{Pi}) < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR} = 5.55 + 0 < \frac{774.18}{1.5} + 320$
$$5.55\ kNm < 836\ kNm$$

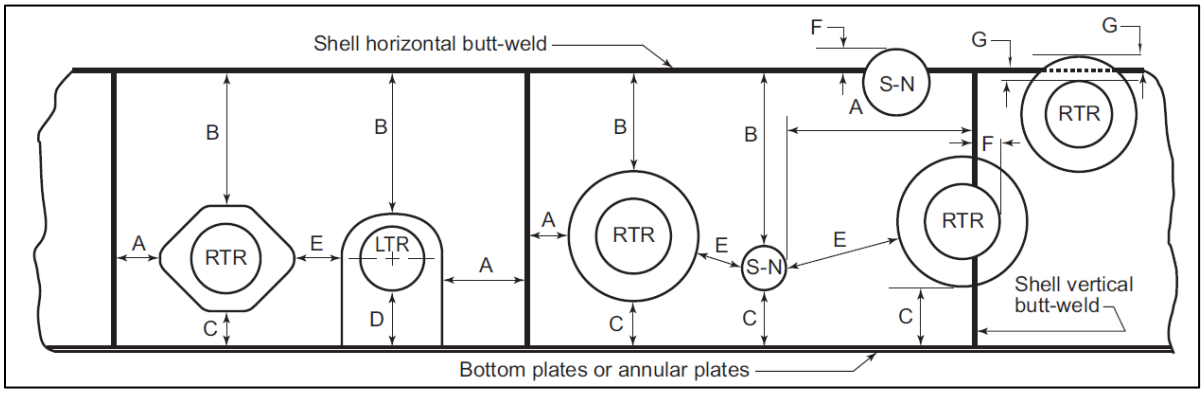
Como los criterios establecidos en la sección 5.11.2.1 de la norma API650 13th edición se cumplen se concluye que el tanque no necesita anclajes. Para más detalles de diseño ver el anexo D del presente documento.

7.10. CONEXIONES.

La norma API 650 13th Edición 2020 en su sección 5.7 expone los requerimientos generales y específicos sobre el diseño de conexiones. Las boquillas son orificios ubicados en el cuerpo del tanque cuya funcionalidad es la facilitar la funcionalidad y mantenimiento del tanque, donde se incluyen sistemas de entrada y salida de fluido, instalación de dispositivos para el correcto control de presión, inspección visual y almacenado.

Para el diseño de boquillas se recurre a la Figura 27 donde se describen las distancias mínimas y máximas que se consideran para la ubicación de las aberturas en el cuerpo del tanque.

Figura 27. Requisitos mínimos para soldaduras de boquillas en el cuerpo.



Fuente: Extraída de la norma API650. Sección 5.7. Fig. 5.6.

Existen 3 tipos de boquillas listadas en el código API650 las cuales son las siguientes:

1. RTR: Abertura reforzada tipo regular (Boquilla o Manhole) con placa de refuerzos de forma circular o de diamante.
2. LTR: Abertura reforzada a nivel de piso (Boquilla o Manhole) con placa de refuerzo tipo lapida.
3. S-N: Aberturas de cuerpo sin placas de refuerzo ni con placa de inserción engrosada.

7.10.1. Condiciones para la ubicación de boquillas.

La asignación para los valores A, B, C, D, E, F, G mostrada en la Figura 27, se muestran en la Tabla 13. El espesor mayor al cual se le hará alguna conexión es de 6.35 mm, como se diseñó anteriormente, por ende, nos fijamos solo en la primera fila de laTabla 13 extraída de la norma de la sección 5.7 Fig 5.6 de la norma API650.

De esta forma se remitió a los parágrafos de referencia citados por la misma, los cuales son: parágrafo 5.7.3.2, 5.7.3.3 y 5.7.3.4. idealmente las boquillas y las bocas de acceso no deben colocarse en las juntas verticales ni horizontales del cuerpo del tanque, así mismo las placas de refuerzo no deben superponerse con estas juntas.

En caso de que no exista alguna otra opción factible para la ubicación de estas boquillas y el comprador tenga pleno conocimiento estas aberturas se pueden ubicar en una junta horizontal y vertical, siempre y cuando se cumplan los requisitos de separación mínima mostrados en la Tabla 13 y se realicen exámenes radiográficos de acuerdo con la sección 8.1.3 hasta el numeral 8.1.8.

A continuación, se presentan 6 notas aclaratorias de la Tabla 13 traducidas de la norma de la sección 5.7 Fig 5.6 de la norma API 650:

- ***NOTA 1:*** Si se dan dos requisitos, el espacio mínimo es el valor mayor, a menos que se indique lo contrario.
- ***NOTA 2:*** Los espaciamientos de soldadura se miden hasta la punta de una soldadura de filete, la línea central de una soldadura a tope de inserto o placa de inserto engrosada, o la línea central de una soldadura a tope de carcasa.
- ***NOTA 3:*** t= espesor nominal de la carcasa; r = radio de apertura
- ***NOTA 4:*** "t"= el tamaño de soldadura más grande alrededor de la periferia de los accesorios: para soldaduras en ángulo, la longitud de la pata a lo largo del armazón del tanque, para soldaduras a tope, el espesor de la placa de inserción en la junta soldada.
- ***NOTA 5:*** D= distancia de espaciamiento establecida por elevación mínima para aberturas reforzadas de tipo bajo de la Tabla 5.6a y Tabla 5.6b, columna 9.
- ***NOTA 6:*** Opción del comprador de permitir que las aberturas del armazón se ubiquen en soldaduras a tope horizontales o verticales del armazón. Ver Figura 5.9.

Tabla 13. Requisitos mínimos para soldaduras de boquillas en el cuerpo.

Variables		Reference	Minimum Dimension Between Weld Toes or Weld Centerline (Notes 1, 2, 3, and 4)						
Shell f	**Condition**	**Para-graph Number**	**A**	**B**	**C**	**D (5 only)**	**E**	**F (6)**	**G (6)**
t≤ 13 mm (t≤ 1/2 in.)	As Welded or PWHT	5.7.3.2 5.7.3.3 5.7.3.3 5.7.3.3 • 5.7.3.4 • 5.7.3.4	150 mm (6 in.)	75 mm (3 in.)	75 mm (3 in.)	Table 5.6a and Table 5.6b	75 mm (3 in.)	Lesser of 8t or 1/2 r	8t
t> 13 mm (t> 1/2 in.)	As Welded	5.7.3. 1.a 5.7.3.1. b 5.7.3.3 5.7.3.3 5.7.3.3 • 5.7.3.4 • 5.7.3.4	8Wor 250 mm (10 in.)	8Wor 250 mm (10 in.)	8Wor 250 mm (10 in.) 75 mm (3in) for S-N	Table 5.6a and Table 5.6b	8Wor 150 mm (6 in.)	Lesser of 8t or 1/2 r	8t
t> 13 mm (t> 1/2 in.)	PWHT	5.7.3.2 5.7.3.3 5.7.3.3 5.7.3.3 • 5.7.3.4 • 5.7.3.4	150 mm (6 in.)	75 mm (3 in.) or (21/2) r	75 mm (3 in.) or (21/2) r 75 mm (3 in.) for S-N	Table 5.6a and Table 5.6b	75 mm (3 in.) or (21/2) t	Lesser of 8t or 1/2 r	8t

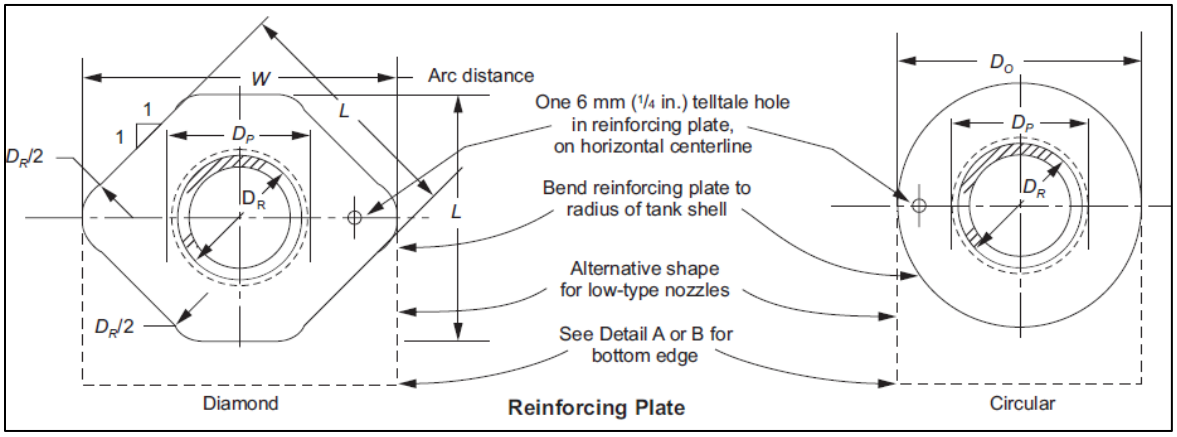
Fuente: API650. Sección 5.7. Fig. 5.6.

7.10.2. Diseño de conexiones.

Para determinar las medidas necesarias para el diseño de las conexiones nos remitimos a la norma Api 650, sección 5.7 en la figura 5,8. Allí se muestran las medidas recomendadas, como regla general las boquillas de tamaño NPS 3 o mayores requieren placa de refuerzo, incluyendo las conexiones de acoplamiento.

Las boquillas con un tamaño de NPS 2 o menor no requieren placa de refuerzo. En la Figura 28 se pueden ver las variables para tener en cuenta en el diseño de placas de refuerzo.

Figura 28. Layout para medidas recomendadas para placas de refuerzo de boquillas.

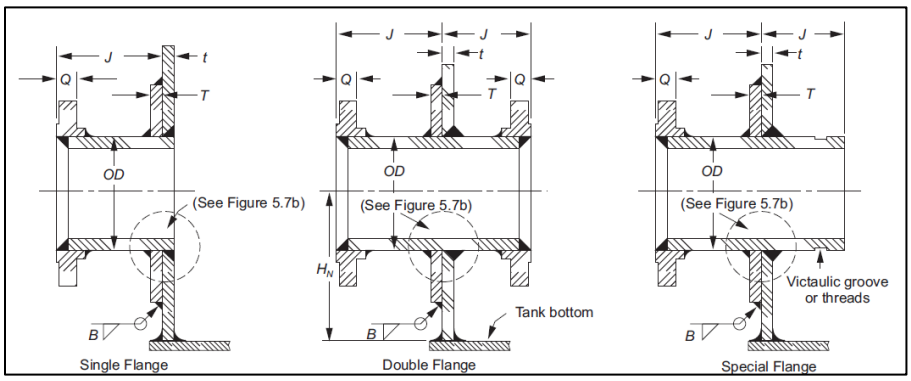


Fuente: Extraída de la norma API650. Sección 5.7. Fig. 5.8

Como se puede observar en la Figura 28, se pueden usar refuerzos de forma circular o diamante, la cual tiende a tener forma de rombo. La norma recomienda 3 detalles para el diseño de conexiones, brida simple, doble brida y brida especial los cuales se ilustran en la Figura 29.

Los valores para cada variable mostrada en la Figura 29 se establecen en la Tabla 14 donde originalmente se muestran desde NPS 60 hasta NPS ¾, para un uso practico de la norma se omitirán los valores más grandes a NPS 28 y se mostraron solo los menores los cuales se usarán en el diseño de las boquillas necesarias.

Figura 29. Detalles Típicos de conexiones bridadas.



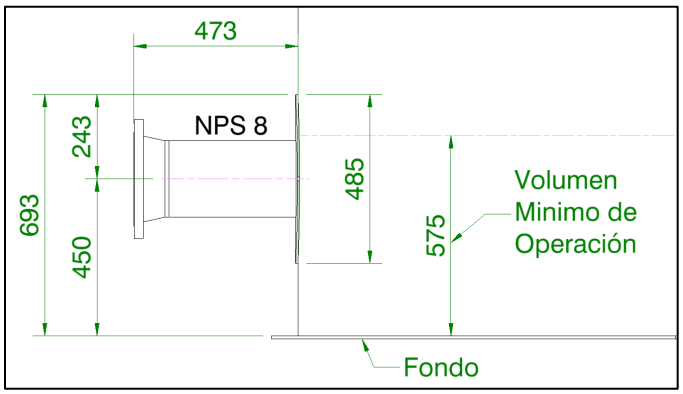
Fuente: API650. Sección 5.7. Fig. 5.8

7.10.2.1. Nivel mínimo de operación.

Se estableció que las boquillas de entrada y salida se ubican en la parte baja del tanque, en la columna 8 de la Tabla 14 se encuentra la distancia mínima al fondo, para boquillas NPS 8 la distancia mínima es de 349 mm. Se decidió ubicar las boquillas a una distancia de 400 mm al fondo, de esta forma se establece un nivel de operación mínimo del tanque de 575 mm de fluido con un total de 65 metros cuadrados, sobre este nivel se ubicará el sensor de nivel para controlar el volumen mínimo de operación.

Adicionalmente, como se pudo observar, para este tamaño de boquillas (NPS 8) la placa de refuerzo tiene un diámetro de 485mm. El detalle lateral de la boquilla de entrada de fluido se muestra en la Figura 30

Figura 30. Detalle conexión boquilla N1.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Dimensiones para boquillas sobre el cuerpo del tanque.

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9c
NPS (Size of Nozzle)	Outside Diameter of Pipe	Nominal Thickness of Flanged Nozzle Pipe Wall *a*	Diameter of Hole in Reinforcing Plate	Length of Side or Reinforcing Plate *b* or Diameter	Width of Reinforcing Plate	Minimum Distance from Shell- to - Flange Face	Minimum Distance from Bottom of Tank to Center of Nozzle	
	OD	fn	Dr	L=Do	W	J	Regular Type *d Hn*	Low Type C
28	711.2	e	714	1440	1745	300	826	720
26	660.4	e	664	1340	1625	300	776	670
24	609.6	12.7	613	1255	1525	300	734	630
22	558.8	12.7	562	1155	1405	275	684	580
20	508.0	12.7	511	1055	1285	275	634	525
18	457.2	12.7	460	950	1160	250	581	475
16	406.4	12.7	410	850	1035	250	531	425
14	355.6	12.7	359	750	915	250	481	375
12	323.8	12.7	327	685	840	225	449	345
10	273.0	12.7	276	585	720	225	399	290
8	219.1	12.7	222	485	590	200	349	240
6	168.3	10.97	171	400	495	200	306	200
4	114.3	8.56	117	305	385	175	259	150
3	88.9	7.62	92	265	345	175	239	135
2f	60.3	5.54	63	-	-	150	175	h
1 1/2f	48.3	5.08	51	-	-	150	150	h
1f	33.4	6.35	-	-	-	150	150	h
3/4f	26.7	5.54	-	-	-	150	150	h

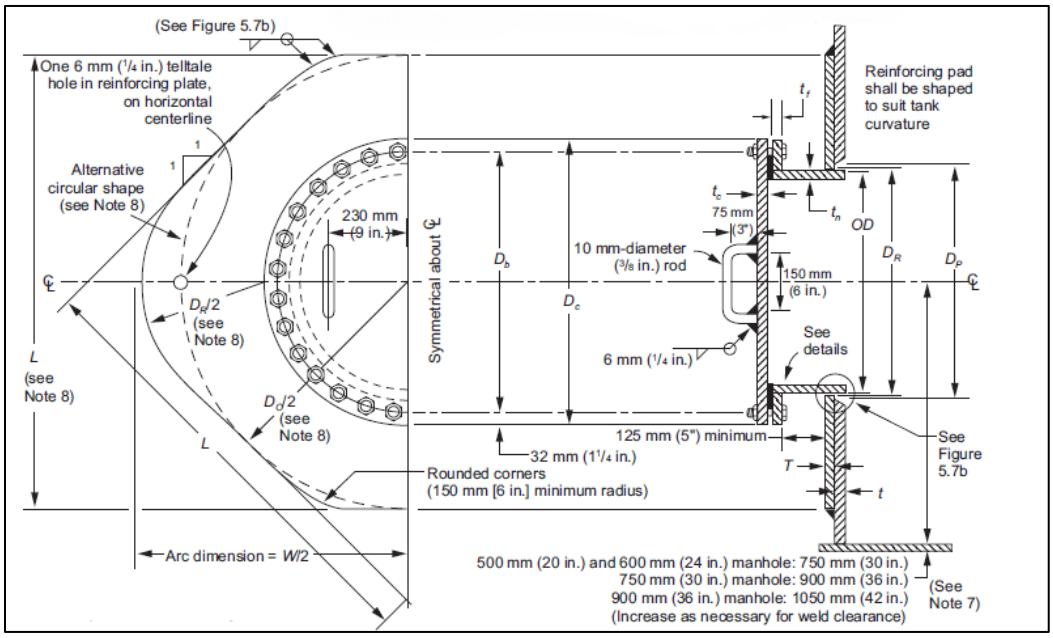
Fuente: API650. Sección 5.7. Tabla. 5.6

7.10.2.2. Diseño de Manhole de Cuerpo.

Las entradas de hombre o manhole son aquellas aberturas que se realizan en el tanque y pueden estar ubicadas en la envolvente del tanque o en el techo y sirven, como su nombre indica, para el ingreso del personal al interior del tanque con el fin de realizar su respectiva limpieza o mantenimiento cuando así sea requerido.

Para realizar el diseño de estas aberturas especiales la norma API 650 en la sección 7.2 en la figura 5.7 muestra los detalles para el diseño de manhole ubicados en el cuerpo del tanque. Las consideraciones de diseño se presentan en la Figura 31.

Figura 31. Detalle manhole lateral.



Fuente: API650 sección 5.7 Figura 5.7.

Para determinar el diámetro y el espesor mínimo de la tapa cubierta (t_c) y de la brida de empernado (t_f) del manhole es preciso remitirse a la Tabla 15 y Tabla 16, las cuales fueron extraídas de la norma API 650, 13th Edición, Año 2020, Sección 5.7, Tablas 5.5a y 5.3a, donde se indican las medidas requeridas de acuerdo con el diámetro nominal de la entrada de hombre o manhole y el nivel de diseño máximo de fluido que se considera soportara la abertura. Se escogió previamente el uso de un manhole de 600 mm.

Tabla 15. Diámetros necesarios para diseño de manhole.

Column 1	Column 2	Column 3
Manhole Diameter *OD*	**Bolt Circle Diameter Db**	**Cover Plate Diameter *Dc***
500	667	730
600	768	832
750	921	984
900	1073	1137

Fuente: API650, tabla 5.5a, dimensiones en milímetros.

Tabla 16. Espesor de tapa cubierta y brida para manhole.

Max. Design Liquid Level m H	**Equivalent Pressure *a kPa***	**Minimum Thickness of Cover Plate *b (tb),* mm**				**Minimum Thickness of Bolting Flange After Finishing *b (tf),* mm**			
		500 Manhole	**600 Manhole**	**750 Manhole**	**900 Manhole**	**500 Manhole**	**600 Manhole**	**750 Manhole**	**900 Manhole**
5	49	8	10	12	13	6	7	9	10
6.5	64	10	11	13	15	7	8	10	12
8.0	78	11	12	14	17	8	9	11	14
9.5	93	12	13	16	18	9	10	13	15
11	108	12	14	17	20	9	11	14	17
13	128	13	15	18	21	10	12	15	18
16	157	15	17	20	23	12	14	17	20
19	186	16	18	22	26	13	15	19	23
23	225	18	20	24	28	15	17	21	25

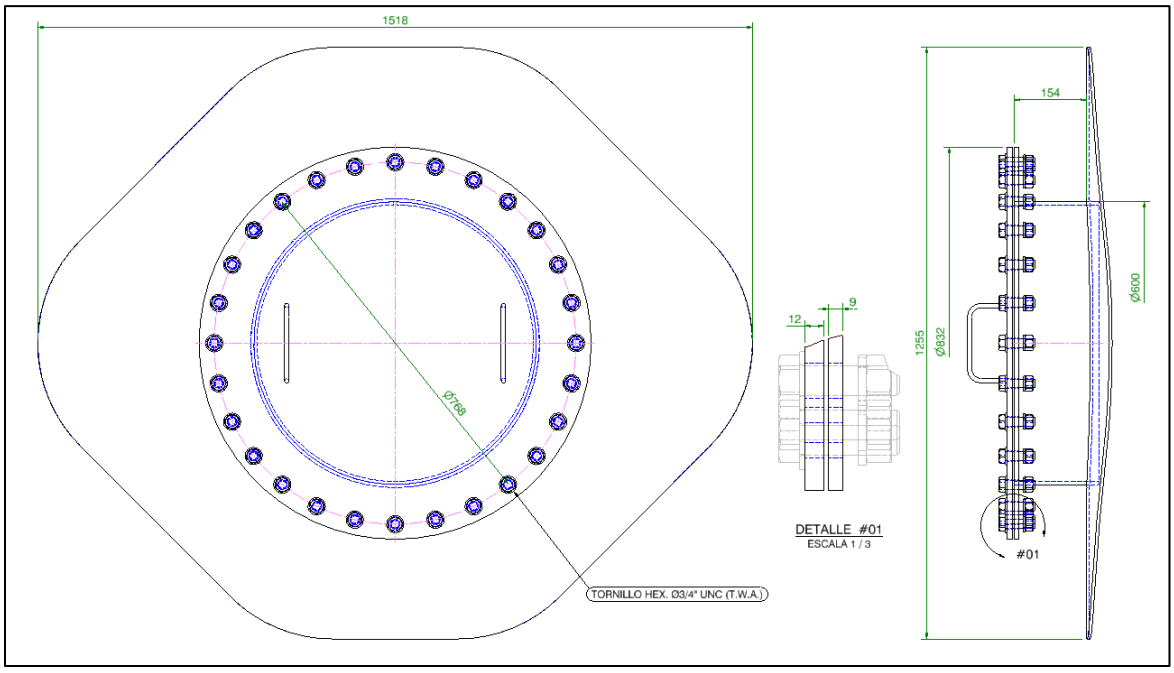
Fuente: API650 Sec. 5.7 tabla 5.3.

Para iniciar con la selección de datos, se escogió en primera medida el nivel de diseño máximo superior a la altura total del tanque, es decir, 7.2 m, como no se encuentra se recurre al valor superior en la tabla 604, el cual es de 8.0 m con este valor se estableció un espesor de la tapa de 12 mm y de 9 mm la brida.

Como cumple con los requisitos de abertura, en la Tabla 15, se encuentran las medidas necesarias para diseñar su placa de refuerzo (NPS 24), para este caso, por su tamaño, se escogió en forma de diamante. Las medidas y detalles básicos, además de un detalle general del manhole seleccionado para usar en el presente diseño se pueden ver en la Figura 32.

Adicionalmente, la norma exige el uso de 28 pernos de ¾ pulgada para el ajuste de un sello gasket de 3 mm. Es importante nombrar que las dimensiones de la junta, cuando se usan junto con las bridas de placa delgada descritas en la Figura 32, han demostrado ser efectivas cuando se usan con gasket blandos, los llamados gaskets no metálicos. Cuando se utilizan gaskets duros, como metal sólido, las dimensiones del gasket, la brida y la tapa del manhole deben diseñarse de acuerdo con la Norma API 620. Adicionalmente, las bridas deben tener un acabado y debe cumplir con tolerancias de rugosidad establecidas en la norma ASME PCC-1.

Figura 32. Medidas Generales Manhole de cuerpo.



Fuente: Elaboración propia.

7.10.2.3. Diseño de boquillas.

Para el correcto funcionamiento del tanque se plantea el uso de las boquillas SO = Slip On y WN = Welding Neck. Las características principales de estas se listan en la Tabla 17.

Tabla 17. Listado de boquillas TK-001.

Marca	Tamaño	Descripción	Elevación	Orientación	Tipo	Clase
N1	NPS 8	Entrada	450	180	WN, RF	150
N2	NPS 8	Salida	450	210	WN, RF	150
N3	NPS 3	Drenaje	300	0	WN, RF	150
N4	NPS 3	Drenaje	300	110	WN, RF	150
N5	NPS 3	Drenaje	300	250	WN, RF	150
N6	NPS 6	Sobrellenado	6800	270	WN, RF	150
N7	NPS 10	Mixer	1400	154	SO, RF	150
N8	NPS 6	Sensor	Techo	158	SO, FF	150
N9	NPS 6	Sensor	Techo	203	SO, FF	150
N10	NPS 6	Sensor	Techo	203	SO, FF	150
N11	NPS 6	Venteo	Techo	---	SO, FF	150
M1	24"	Shell Manhole	750	230	---	---
M2	24"	Roof Manhole	Techo	158	---	---

Fuente: Elaboración propia.

7.10.2.3.1. Diseño de boquillas en la envolvente.

Para el diseño de las boquillas de la envolvente se usa el mismo principio que se utilizó en el diseño de las boquillas de entrada y salida de fluido. Los resultados obtenidos se consignan en la Tabla 18.

Tabla 18. Medias generales boquillas cuerpo. Elaboración propia

NPS	D	A	B	C	E
3"	88,9	92	265	175	239
6"	168,3	171	400	200	306
8"	219,1	222	485	200	349
10"	273	276	585	225	399

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

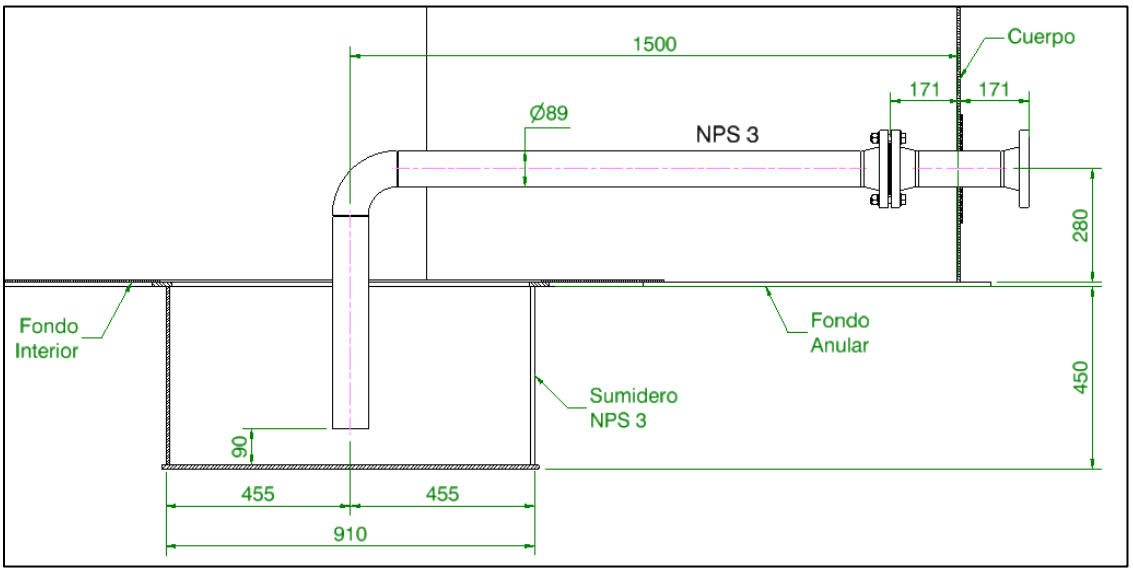
D es el diámetro externo de la tubería, en mm
A es el diámetro del agujero de la placa de refuerzo, en mm
B es el diámetro de la placa de refuerzo, en mm
C es la proyección mínima hacia afuera de cada boquilla, en mm
E es la distancia mínima del centro de la boquilla al fondo del tanque, en mm

Cabe aclarar que se seleccionaron tuberías de acuerdo con el estándar ASME B36.10M el cual establece medidas específicas para diferentes tamaños de tubería avalada por la Norma ASME B31.3. Con los datos obtenidos de la Tabla 17 y Tabla 18, se pueden determinar las distancias necesarias que separan una boquilla de las demás, así como de juntas verticales y horizontales.

7.10.2.3.2. Drenaje.

Para drenar el fluido, como se determinó en la sección del diseño del fondo, se seleccionó el uso de sumideros, estos fueron diseñados para tubería NPS 3, en este caso se utilizó un extensor de tubería para facilitar el mantenimiento y el reemplazo de partes. El detalle de los soportes requeridos no es del alcance del presente capitulo, sin embargo, se podrán analizar en el anexo planos. las medidas seleccionadas para el arreglo de boquillas para drenaje se pueden observar en la Figura 33.

Figura 33. Boquilla para drenaje con arreglo de tubería.



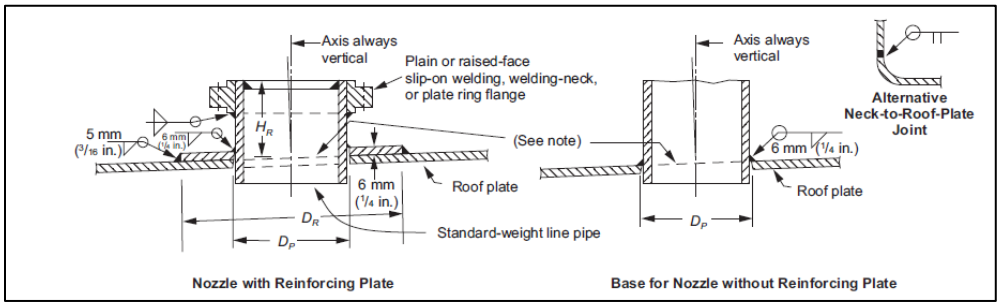
Fuente: Elaboración propia

7.10.2.3.3. Boquillas de techo.

La norma API 650 también contempla un apartado para el diseño de boquillas en el techo del tanque en su sección 5.8. esencialmente el proceso de diseño es igual para boquillas de cuerpo y de techo, con la diferencia de que no se permite el uso de placas de refuerzo con forma de diamante (mayormente con fines estéticos).

Estas boquillas son utilizadas para colocar válvulas de venteo, bocas de aforo o sensores. Las boquillas de techo se clasifican en bridadas y roscadas y bocas de inspección (manhole). En la Figura 34 se establecen parámetros de diseño generales para boquillas ubicadas en el techo. Se planeó usar 4 boquillas, los valores para las medidas aceptadas de cada boquilla del techo se muestra en la Tabla 19. Se restringe su uso a boquillas hasta una medida NPS 12.

Figura 34. Boquillas Bridadas de techo,



Fuente: norma API650, figura 5.19.

Tabla 19. Dimensiones para boquillas bridadas de techo.

Nozzle NPS	Outside Diameter of Pipe Neck	Diameter of Hoe in Roof Plate Reinforcing Plate DP	Minimum Height of Nozz• HR	Diameter of Reinforcing Platea DR
1 1/2	48,3	50	150	125
2	60.3	65	150	175
3	88.9	92	150	225
4	1143	120	150	275
6	168.3	170	150	375
8	219.1	225	150	450
10	273.0	280	200	550
12	3238	330	200	600

Fuente: API 650, tabla 5.14a

Para el diseño de las boquillas del techo se usa el mismo principio que se utilizó en el diseño de las boquillas de entrada y salida de fluido. Reuniendo los resultados se obtienen los datos de la Tabla 20.

Tabla 20. Medias generales boquillas techo.

NPS	D	A	B	H
6"	168,3	170	375	150

Fuente: Elaboración propia

Donde:
A es el diámetro del agujero de la placa de refuerzo, en mm
B es el diámetro de la placa de refuerzo, en mm
H es altura mínima de cada boquilla, en mm

7.10.2.4. Manhole de techo.

Las bocas de acceso del techo deben cumplir con la Tabla 21 y Figura 35. Este tipo de aberturas ubicadas en la parte superior del tanque facilita el mantenimiento, la medición manual de nivel, temperatura y extracción de muestras.

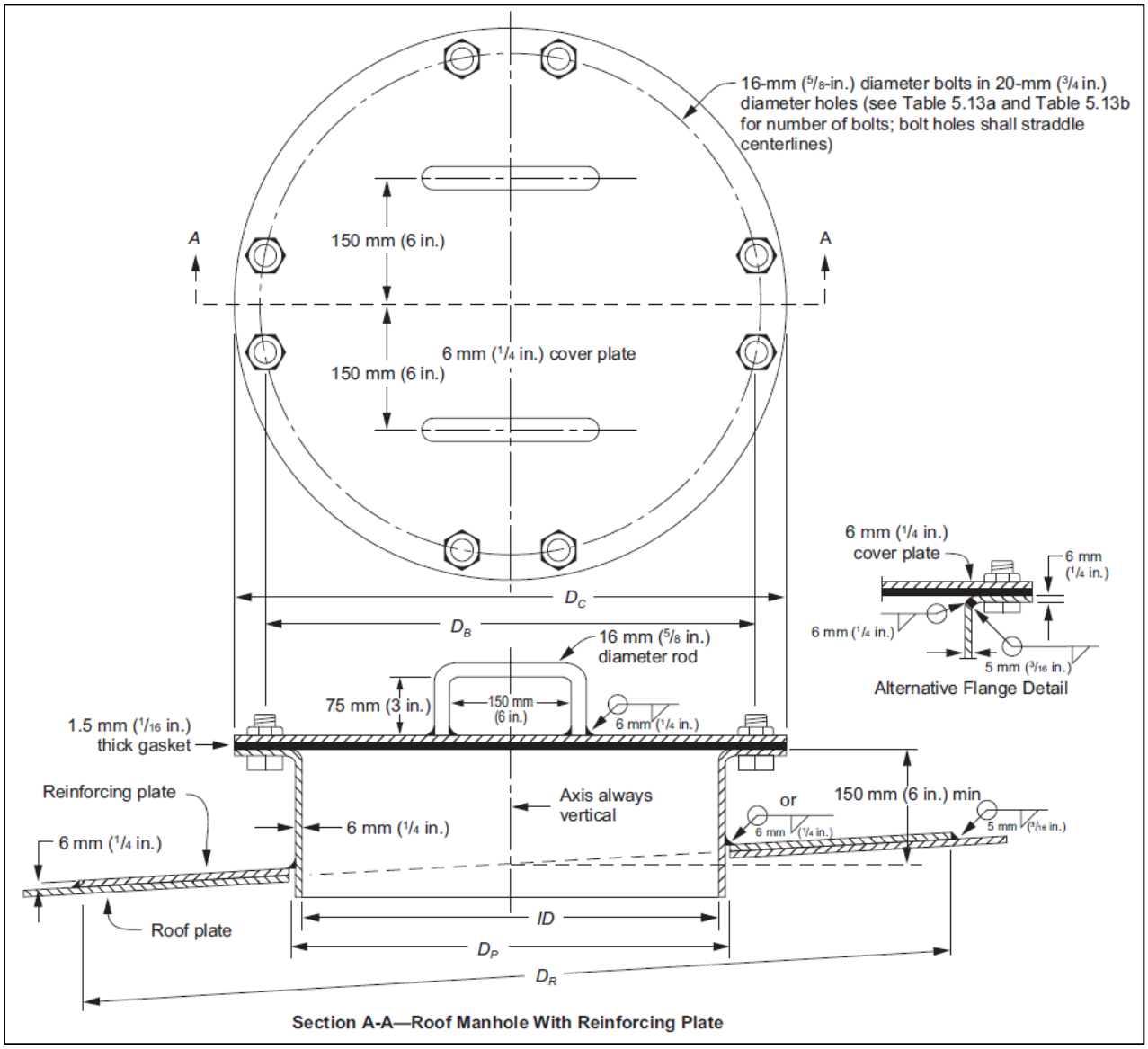
En la Tabla 21 se encuentran las medidas necesarias para manhole de techo dependiendo su tamaño. Para aberturas más grandes que las indicadas están deben ser diseñadas por un ingeniero con experiencia en el diseño de tanques de acuerdo con la norma API650.

Tabla 21. Dimensiones para manhole de techo.

Size of Manhole	Diameter of neck ID	Diameter of cover Plate	Diameter of Bolt Circle	Number of Bolts	Diameter Of Gasket		Diameter of Hole in Roof Plate or Reinforcing Plate Dp	Outside Diameter of Reinforcing Plate Dr
					Inside	Outside		
500	500	660	597	16	500	660	524	1050
600	600	762	699	20	600	762	625	1150

Fuente: Norma API650. Tabla 5.13.

Figura 35. Esquema para manhole de techo.

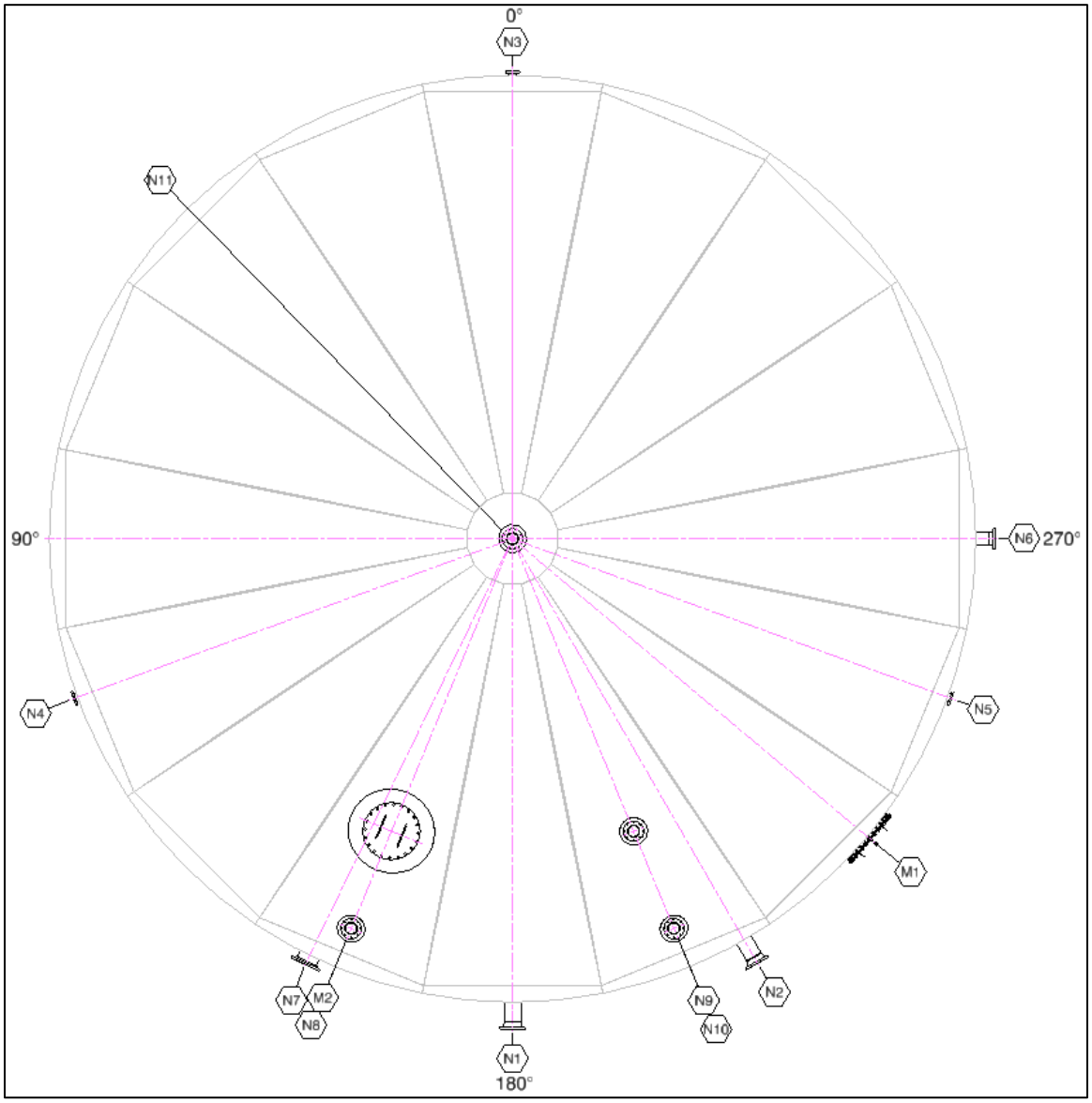


Fuente: Norma API 650 Figura 5.16 - Dimensiones para Manholes.

7.10.2.5. Distribución general de boquillas.

En la Figura 36 se muestra un esquema de la distribución de las boquillas en la envolvente y techo del tanque. Para más detalles de diseño ver el anexo D del presente documento.

Figura 36. distribución de las boquillas en la envolvente y techo del tanque.



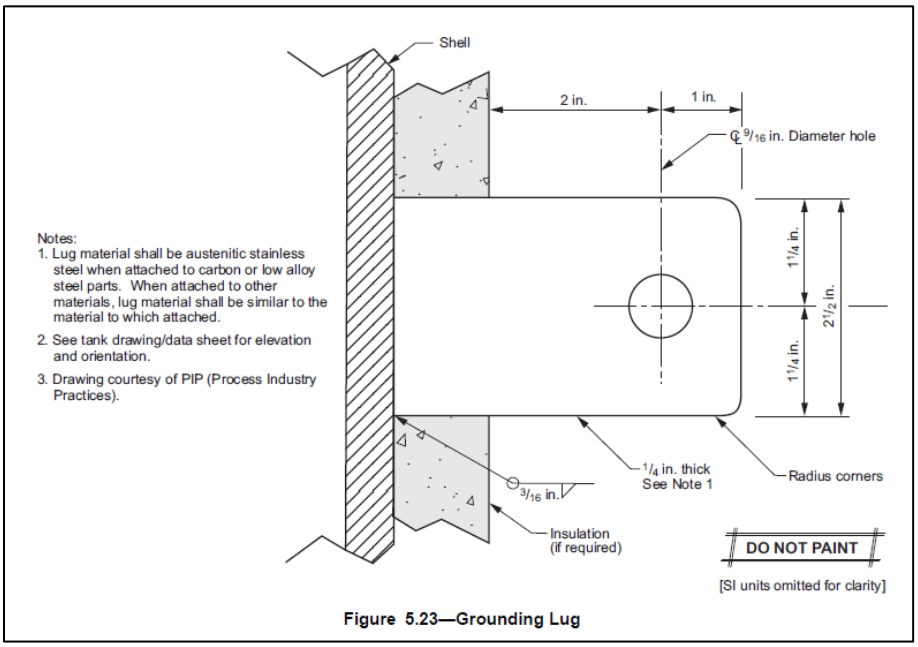
Fuente: Elaboración propia.

7.11. ACCESORIOS

7.11.1. Terminal de conexión a tierra.

Las terminales a tierra deben cumplir con la norma API 650 sección 5.8.11.3. deben ser fabricadas en acero inoxidable y no deben ser pintadas y se deben colocar mínimo 4 unidades uniformemente distribuidas. En la Figura 37 se muestran las consideraciones generales que se tuvieron en cuenta para diseñar este elemento.

Figura 37. Terminal de conexión a tierra detalle.



Fuente: norma API 650 Sección 5.8.

7.11.2. Plataformas.

La norma API650 establece que las plataformas y pasillos deben estar de acuerdo con las siguientes condiciones:

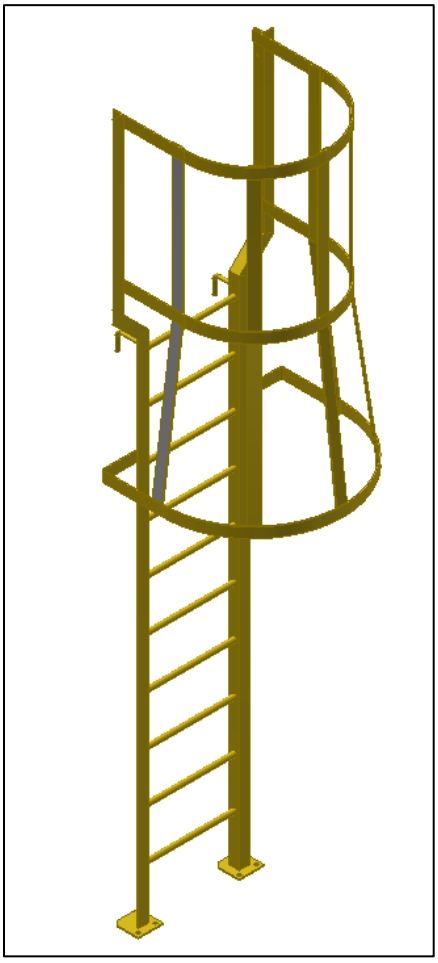
- Fabricadas de metal
- Ancho mínimo de 610 mm
- El piso debe estar fabricado en rejilla o material antideslizante
- Protegida por baranda en los lados expuestos.
- La estructura debe ser capaz de soportar 4450 N

En caso de que las plataformas unan 2 o más tanques, estructuras entre otros, se debe asegurar el libre movimiento en uno de los extremos de la plataforma, la norma aprueba que se pueden usar normas nacionales de seguridad o internacionales como OSHA.

7.11.3. Escalera.

Para optimizar espacios se decidió utilizar escaleras verticales con jaula fija también conocidas como escalera tipo gato. La escalera con jaula fija de acero cumple o supera la mayoría de los códigos de construcción y proporciona fácil acceso a techos y plataformas. El diseño final se presenta en la Figura 38.

Figura 38. Escalera vertical con jaula fija.

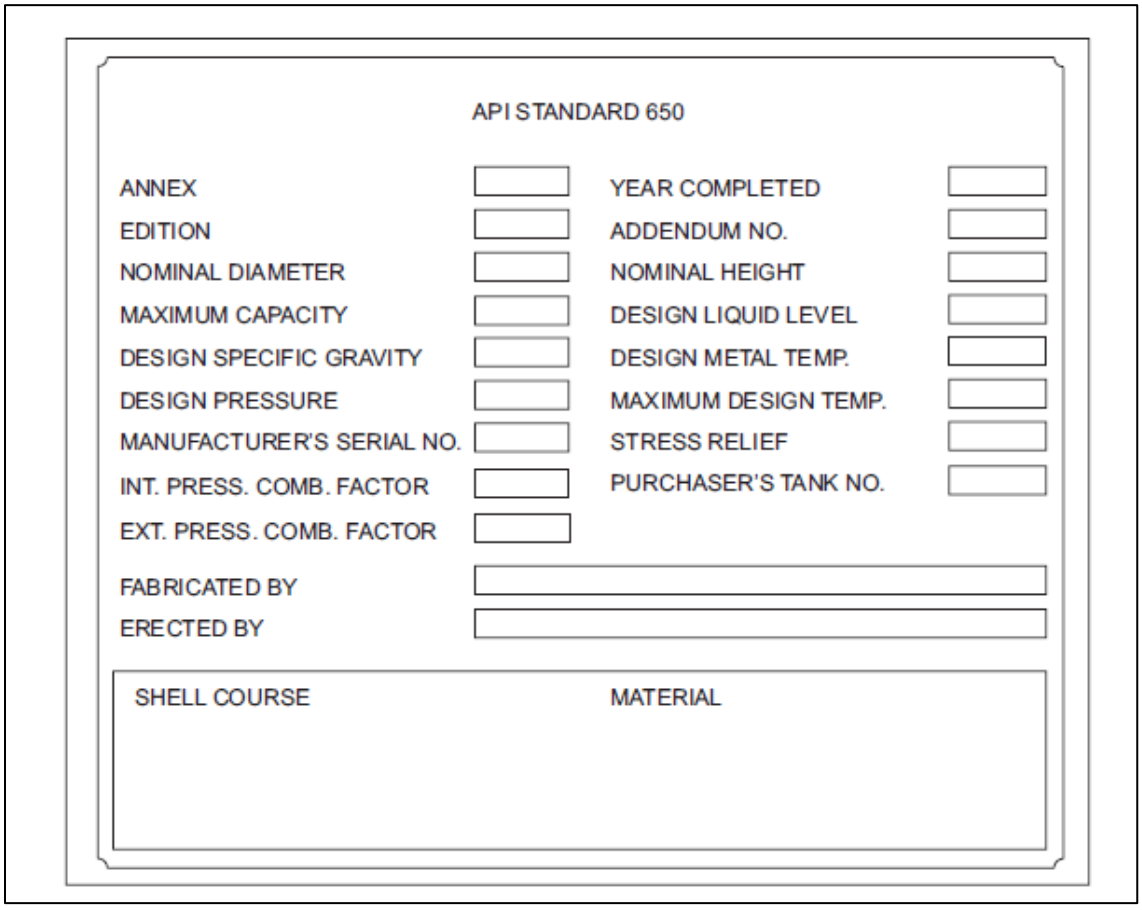


Fuente: Elaboración propia.

7.11.4. Placa de Identificación.

Un tanque fabricado de acuerdo con la norma API 650 debe identificarse con una placa de identificación similar a la que se muestra en la Figura 39. La placa de identificación indicará, mediante letras y números, de no menos de 4 mm (5/32 pulg.) de alto, la siguiente información: a pedido del comprador, o a discreción del fabricante del montaje, se puede mostrar información adicional pertinente en la placa de identificación, el tamaño de la placa de identificación puede aumentarse proporcionalmente de acuerdo con lo solicitado. Para más detalles de diseño ver el anexo D del presente documento.

Figura 39. Placa de identificación.



Fuente: norma API 650 Sección 10.1

7.12. JUNTAS SOLDADAS.

El estándar API 650 aclara que los términos relacionados con la soldadura se deben interpretar como se definen en la sección IX del código ASME BPVC que es una norma con reconocimiento internacional relativa a la construcción de recipientes a presión, tuberías y componentes para instalaciones nucleares.

Además, se establece que se deberán preparar las especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) y realizar las pruebas documentadas por los registros de calificación del procedimiento para respaldar las especificaciones, según lo requiere la misma Sección IX de la norma ASME BPVC. Por otra parte, los procedimientos de soldaduras para los conjuntos estructurales de escaleras, pasamanos, plataformas entre otros deben cumplir con el estándar AWS D1.1, AWS D1.6 o la Sección IX de la norma ASME BPVC incluido el uso de WPS estándar.

En la construcción de tanques de almacenamiento apoyados uniformemente al suelo, se pueden usar varios y diferentes procesos de soldadura, el proceso SMAW (por sus siglas en ingles Shield Metal Arc Welding) o mejor conocida como soldadura de varilla (arco) fue el proceso de soldadura líder y hoy en día es muy común su uso para la construcción de tanques y estructuras, además, el proceso SMAW es versátil y muy adecuado para el entorno de trabajo de campo.

En el presente proyecto como ya se estableció previamente se usaron para el diseño los siguientes aceros ASTM A283 Grado C, ASTM A36, ASTM A1011M Grado 33, ASTM A53, ASTM A105.

7.12.1. Especificación del Procedimiento de Soldadura.

Existen algunos lineamientos para tener en cuenta al momento de diseñar una especificación del procedimiento de soldadura, la norma ASME BPVC Sec. IX 2023 - QW contiene reglas que se aplican a la preparación de la especificación del procedimiento de y la calificación de esta, también la calificación de soldadores y operadores para todos los tipos de proceso de soldadura manuales.

Una especificación del procedimiento de Soldadura conocida como WPS (por sus siglas en ingles Welding Procedure Specification) es un procedimiento de soldadura que sirve como guía para la creación efectiva de una soldadura que cumpla con todos los requisitos del código y los estándares de producción aplicables según se determine por el cliente y reúne los parámetros necesarios para la correcta ejecución por parte del operador.

Este procedimiento calificado en forma escrita deberá describir todas las variables esenciales, no esenciales y, cuando se requiera, esenciales complementarias para cada proceso de soldadura utilizado en la WPS. Estas variables se listan para cada proceso en la Sección QW-250 del código.

La WPS puede incluir cualquier otra información que pueda ser útil para hacer una junta de soldadura. Se pueden realizar cambios en las variables no esenciales de una WPS para adaptarse a los requisitos necesarios sin recalificación siempre que dichos cambios estén debidamente documentados con respecto a las variables esenciales y no esenciales, esto se puede hacer mediante una enmienda al WPS actual o mediante el uso de una nueva especificación.

La información requerida en la WPS puede estar en cualquier formato, puede ser escrito o en tablas, con la finalidad de adaptarse a las necesidades de cada organización siempre que se incluyan todas las variables, descritas en la sección QW-250 del código, esenciales, no esenciales y, cuando se requieran, las esenciales complementarias.

7.12.2. Variables.

Cada variable de soldadura descrita en el código ASME BPVC Sec. IX, Artic. IV - QW-400 se subdivide en variable esencial, esencial complementaria o no esencial para la calificación del procedimiento para cada proceso de soldadura especifico.

Las variables esenciales son aquellas en las que se considera que un cambio afecta las propiedades mecánicas de la soldadura y, por lo tanto, requerirá la recalificación de la WPS. Las variables no esenciales son aquellas en las que se puede realizar un cambio sin necesidad de hacer la recalificación.

Existen algunos lineamientos para tener en cuenta al momento de diseñar una especificación de procedimiento de soldadura, la norma ASME BPVC Sec. IX 2023 en su parte QW contiene reglas que se aplican a la preparación de la especificación y la calificación de esta, también la calificación de soldadores y operadores para todos los tipos de proceso de soldadura manuales y semiautomáticos.

Los lineamientos, que son los datos suministrados en la especificación de soldadura, incluyen las variables agrupadas en juntas, metales base, metales de aporte, posición, precalentamiento, tratamiento térmico posterior a la soldadura, gas, características eléctricas y la técnica usada. Cada una de estas variables se subdivide en varias y según el proceso de soldadura a aplicar se establece su importancia como esencial, no esencial y complementaria.

7.12.3. Soldadura Por Arco Metálico Protegido (SMAW).

El proceso de soldadura por arco es uno de los más usados y comprende diversas técnicas. Una de esas técnicas es el proceso de soldadura comúnmente conocido como SMAW por sus siglas en inglés (Shielded Metal Arc Welding) se define como el proceso en el que se unen dos metales mediante una fusión localizada, producida por un arco eléctrico entre un electrodo metálico y el metal base que se desea unir, a este proceso también se le conoce como soldadura por arco con electrodo recubierto o revestido. Todos los elementos que participan en la soldadura SMAW cumplen una función importante.

El arco es el comienzo de todo proceso de soldadura por arco, una vez que este se genera, su fuerza es la encargada de la penetración que se desea obtener y, adicionalmente, cuando se genera el arco el metal de aporte y el fundente que recubre este comienzan a consumirse.

El metal de aporte es al que al derretirse forma gotas que se van uniendo al metal base generando un charco de soldadura que, precisamente, es el que ocupa el espacio que une las piezas en la junta.
El fundente se derrite al mismo tiempo con el metal de aporte seleccionado, formando un gas que protege del oxígeno y el nitrógeno al arco y el charco de soldadura generado con el fin de reducir la fragilidad y los poros en el metal soldado, además, el fundente tiene la capacidad de suministrar elementos aleados a la soldadura (según se requiera), limpia la superficie metálica, protege contra la oxidación y estabiliza el arco.

7.12.4. WPS

En la Tabla 22 se visualizan las variables que aplican (desde el punto de vista de procedimiento) en el proceso SMAW, tabla QW-253 extraída de la norma ASME BPVC sección IX y traducida para su mejor interpretación, en adición, en la Tabla 23 se establecen las propiedades químicas y mecánicas de los materiales seleccionados anteriormente. (Section IX. Welding, Brazing, and Fusing Qualifications, 2023)

Tabla 22. Variables para especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) – SMAW. (Section IX. Welding, Brazing, and Fusing Qualifications, 2023)

Variables para especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) - SMAW					
Parágrafo		Resumen de variables	Esencial	Complementaria esencial	No esencial
QW-402 Juntas	.1	Diseño de ranura			**X**
	.4	Respaldo			**X**
	.10	Espaciado de raíz			**X**
	.11	Retenedores			**X**
QW-403 Metales Base	.5	Numero de grupo		**X**	
	.6	T Limites de tenacidad		**X**	
	.8	T Calificado	**X**		
	.9	t Pasos > 13 mm (1/2 pulg)	**X**		
	.11	P-No. Calificado	**X**		
QW-404 Metal de aporte	.4	Numero F	**X**		
	.5	Numero A	**X**		
	.6	Diámetro			**X**
	.12	Clasificación		**X**	
	.30	t	**X**		
	.33	Clasificación			**X**
QW-405 Posiciones	.1	Posición			**X**
	.3	Soldadura vertical			**X**
QW-406 Precalentamiento	.1	Disminución > 100°F (55°C)	**X**		
	.2	Precalentamiento sostenido			**X**
	.3	Aumentar 100°F (55°C) (IP)		**X**	
QW-407 PWHT	.1	PWHT	**X**		
	.2	PWHT (Rango T&T)		**X**	
QW-409 Características eléctricas	.1	Entrada de calor		**X**	
	.4	Corriente o polaridad			**X**
	.8	Rango I & E			**X**
	.30	Corriente o polaridad		**X**	
QW-410 Técnica	.1	Oscilado o recto			**X**
	.5	Método de limpieza			**X**
	.6	Método de vaciado posterior			**X**
	.25	Manual o automático			**X**
	.64	Uso de procesos térmicos	**X**		
	.87	Múltiple a una sola pasada/lado		**X**	

Tabla 23. Propiedades de materiales seleccionados.

Acero	Grado	Numero P	Grupo	C	Manganeso	Fosforo	Azufre	Silicio	Cobre	Resistencia a Tracción Mpa (Ksi)	Limite Elástico Mpa (Ksi)
SA-283	C	1	1	0,24	0,9	0,03	0,03	0,4	0,2	380 (55)	205 (30)
SA-36	-	1	1	0,25	-	0,03	0,03	0,4	0,2	400 (58)	250 (36)
SA-1011	33	1	1	0,25	0,9	0,035	0,04	-	0,2	360 (52)	230 (33)
SA-53	A	1	1	0,25	0,95	0,05	0,045	-	0,4	330 (48)	240 (35)
SA-105	-	1	2	0,35	0,6	0,035	0,04	0,1	0,4	485 (70)	250 (36)

Fuente: Elaboración propia.

En ese orden de ideas, se establecen los rangos para las variables necesarias para el WPS. Para crear el documento donde se ubica la información necesaria para la especificación se utilizó el formato QW-482 proporcionado por la norma ASME BPVC Sección IX.

7.12.4.1. QW-402 Juntas.

Las variables de la sección QW-402 tomadas en cuenta para el proceso SMAW Son:

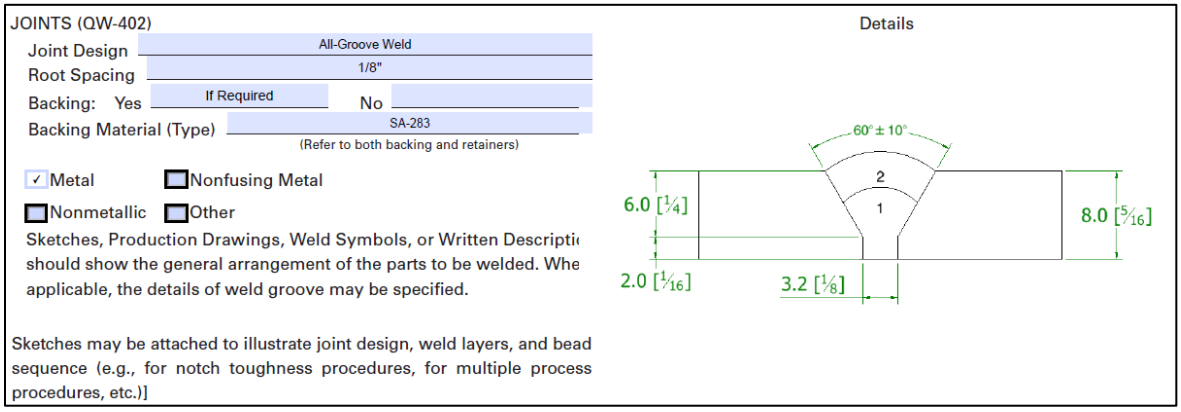
- QW-402.1: Un cambio en el tipo de ranura (ranura en V, ranura en U, bisel simple, bisel doble, etc.), la mayoría de las veces no afectara las propiedades mecánicas de la soldadura, es por esta razón que se considera una variable no esencial en el proceso.

- QW-402.4: La eliminación del respaldo en soldaduras de ranura de soldadura simple. Las juntas de ranura de doble soldadura se consideran soldaduras con respaldo y se considera no esencial ya que, si el procedimiento está calificado con respaldo, puede soldar sin respaldo, siempre que el soldador este calificado sin respaldo.

- QW-402.10: Un cambio en el espaciado de raíz especificado se considera variable no esencial dado que un cambio en el espaciado de raíz no afectara las propiedades mecánicas, aunque es necesario tener en cuenta que el uso de una raíz demasiado ancha podría aumentar la probabilidad de defectos en la soldadura.
-
- QW-402.11: La adición o eliminación de retenedores no metálicos o retenedores de metal que no se fusionan se considera no esencial ya que al no fusionarse al retirarlo la soldadura mantiene sus propiedades mecánicas.

Para el proceso de soldadura SMAW la norma ASME BPVC Sección IX no exige que se contemplen más variables adjuntas a QW-402 juntas. En la Figura 40 se puede ver los resultados obtenidos para la variable QW-402 juntas.

Figura 40. QW-402 Juntas



Fuente: Elaboración Propia

7.12.4.2. QW-403 Metales Base.

Las variables de la sección QW-403 tomadas en cuenta para el proceso SMAW Son:

- QW-403.5 Las especificaciones del procedimiento de soldadura deben calificarse utilizando, en este caso, el mismo metal base (incluido el Tipo y Grado) o un metal base listado en el mismo número de grupo de numero P.

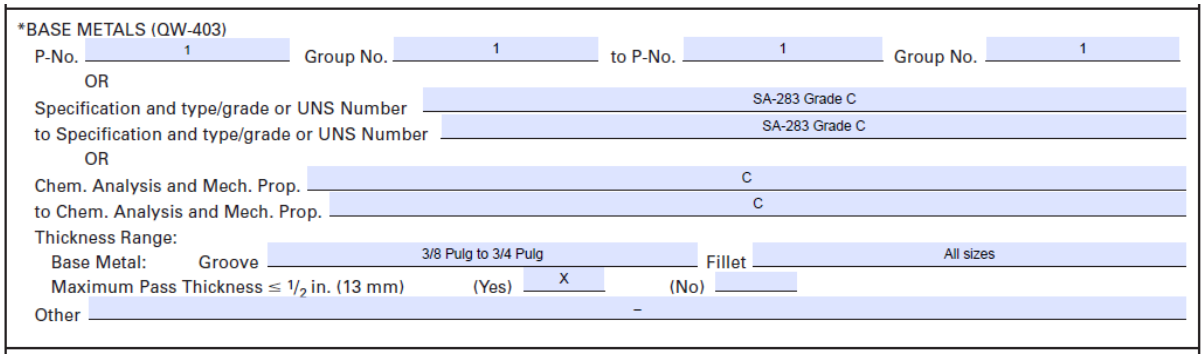
- QW-403.6 El espesor mínimo del metal base calificado es el espesor de la probeta de prueba T o 5/8 pulg, el que sea menor. Sin embargo, donde T= ¼ pulg o menos, el espesor mínimo calificado es ½ T.
- QW-403.8 Un cambio en el espesor del metal base más allá del rango calificado en QW-451 se considera como variable esencial. Las resistencias de la soldadura varían según el grosor de la placa y la distancia desde la raíz, así el riesgo de fractura frágil aumenta con el espesor. La susceptibilidad a las grietas es más probable que ocurra con un espesor y una resistencia alta. Estos hechos demuestran por qué el espesor de los metales base se considera como una variable esencial en todos los procesos de soldadura.

- QW-403.9 para soldaduras de una o varias pasadas en las que cualquier pasada tenga un espesor superior a ½ pulgada, un aumento del espesor del metal base superior a 1.1 veces el de prueba de calificación se considera como variable esencial ya que una pasada de soldadura > ½ pulgada tendrá suficiente calor para recocer la zona afectada por el calor reduciendo así la resistencia a la tracción o aumentara el tiempo de exposición de la zona afectada por el calor a temperaturas > 1000 °C reduciendo la ductilidad.

- QW-403.11 los metales base detallados en la especificación deben calificarse a través de una prueba de calificación del procedimiento. Los estándares de soldadura agrupan los metales base en familias, los números P se asignan a los metales base con el fin de reducir la cantidad de WPS. Un cambio en el número P afecta las propiedades mecánicas, por lo tanto, el número P asociado directamente a los metales base se clasifican como variable esencial.

En la Figura 41 se ven los resultados obtenidos para la variable QW-403 Metales Base.

Figura 41. QW-403 Metales Base



Fuente: Elaboración Propia

7.12.4.3. QW-404 Metales De Aporte.

Las variables de la sección QW-404 tomadas en cuenta para el proceso SMAW Son:

- QW-404.4 Un cambio de un número F en la tabla QW-432 a cualquier otro número F se considera como variable esencial, por ende, necesita ser recalificado.

- QW-404.5 Un cambio en la composición química del depósito de soldadura de un número A a cualquier otro número A en la tabla QW-442 se considera como variable esencial, excepto por la calificación con A-no. 1 que calificará para A-no. 2 y viceversa.

- QW-404.6 Un cambio en el tamaño nominal del electrodo o electrodos especificados en la especificación no requiere calificación ya que el tamaño del electrodo no afectara las propiedades mecánicas, aunque un electrodo de mayor diámetro puede generar la aparición de más escoria en la junta o aumentar la entrada de calor al metal base que se está soldando, por esta razón, aunque se trate de una variable no esencial es de importancia controlarla debidamente.

- QW-404.12 Un cambio en la clasificación SFA, nombre comercial, resistencia a la humedad de los metales de aporte no cambia sus propiedades mecánicas, por ende, se considera como variable esencial complementaria.

- QW-404.30 Un cambio en el espesor del metal de aporte depositado más grande de lo calificado de acuerdo con QW-451, necesitara de una nueva calificación, se considera variable esencial. el metal depositado es la suma de todas las pasadas realizadas con un solo proceso de soldadura, cuando se utilice más de un proceso diferente en una junta, se utilizará QW-451 para determinar el rango de espesor máximo del metal de aporte calificado para cada proceso.

En la Figura 42 se observan los resultados obtenidos para la variable QW-404 Metales de aporte.

Figura 42. QW-404 Metales de Aporte

*FILLER METALS (QW-404)	1	2
Spec. No. (SFA)		
AWS No. (Class)	E6011	E6013
F-No.	3	2
A-No.	1	1
Size of Filler Metals	1/8 Pulg- 5/32 Pulg	3/32 Pulg - 1/8 Pulg
Filler Metal Product Form	Mild Steel - High Cellulose	Mild Steel - High Cellulose
Supplemental Filler Metal	---	---
Weld Metal		
Deposited Thickness:		
Groove	5/32 pulg	1/8 Pulg
Fillet	All	All
Electrode-Flux (Class)	---	---
Flux Type	---	---
Flux Trade Name	---	---
Consumable Insert	---	---
Other	---	---

Fuente: Elaboración Propia

7.12.4.4. QW-405 Posiciones.

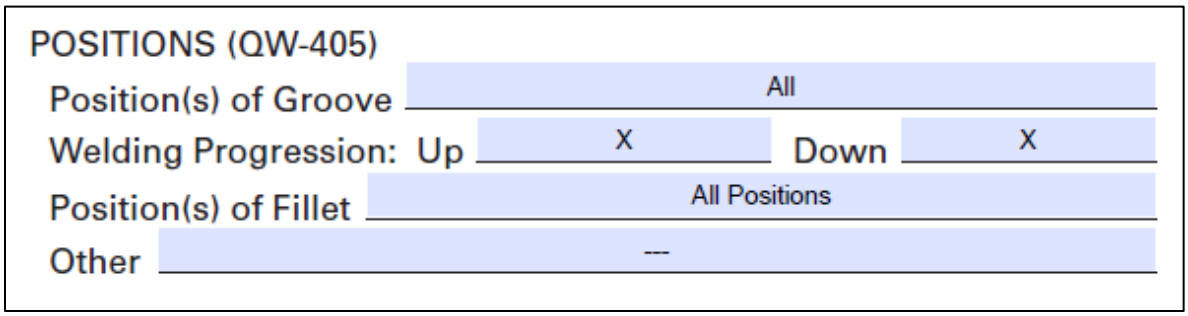
Las variables de la sección QW-405 tomadas en cuenta para el proceso SMAW Son:

- QW-405.1 La adición de otras posiciones de soldadura a los ya calificados se considera variable no esencial con respecto a la especificación del proceso de soldadura ya que una calificación en cualquier posición califica el procedimiento para todas las posiciones. Es importante no confundir con las variables que aplican al soldador donde esta se convierte en variable esencial por la habilidad que conlleva la correcta aplicación en diferentes posiciones.

- QW-405.3 El cambio de dirección de aplicación de arriba a abajo o de abajo hacia arriba en la progresión especificada para cualquier pase de soldadura vertical se considera como variable no esencial.

En la Figura 43 se ven los resultados obtenidos para la variable QW-405 Posiciones.

Figura 43. QW-405 Posiciones.



Fuente: Elaboración Propia

7.12.4.5. QW-406 PRECALENTAMIENTO.

La sección 7 de la norma API650 en su Tabla 7.1a establece temperaturas mínimas de precalentamiento donde para materiales pertenecientes al grupo I, II, III, IIIA con un espesor menor a 32 mm se requiere un precalentamiento mínimo de 0 °C. acorde al código ASME BPVC Sección IX Las variables de la sección QW-406 tomadas en cuenta para el proceso SMAW Son:

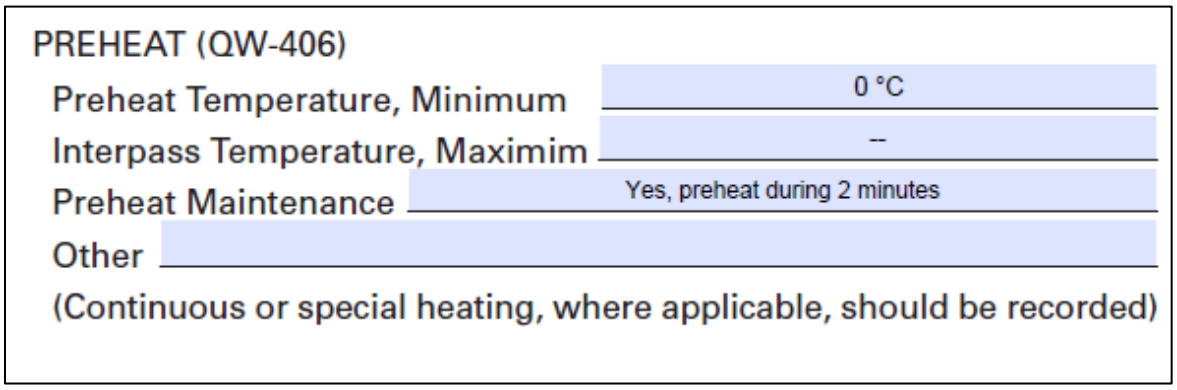
- QW-406.1 Una disminución de más de 100 °F (55 °C) en la temperatura de precalentamiento calificada cambia las propiedades mecánicas por ende se considera como variable esencial.

- QW-406.2 Un cambio en el mantenimiento o reducción del precalentamiento al finalizar la soldadura antes de cualquier tratamiento térmico posterior requerido, se usa para asegurar la ausencia de grietas inducidas por hidrogeno antes del PWHT.

- QW-406.3 Un aumento de más de 100 °F (55 °C) en la temperatura máxima entre pasadas registrada en el PQR se considera como variable esencial completaría.

En la Figura 44 se ven los resultados obtenidos para la variable QW-406 precalentamiento.

Figura 44. QW-406 Precalentamiento.



Fuente: Elaboración Propia

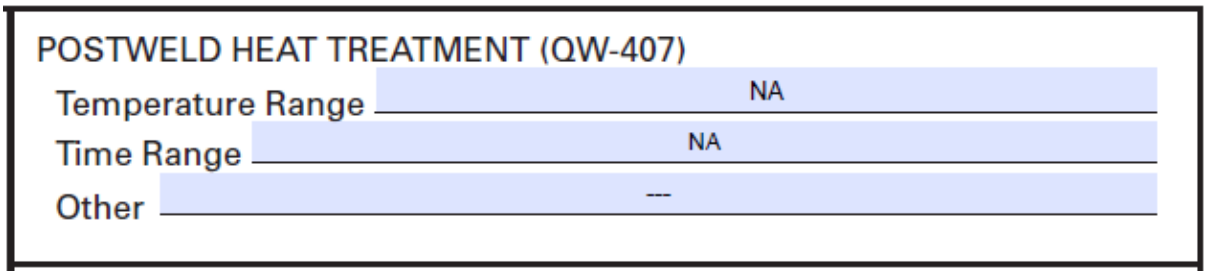
7.12.4.6. QW-407 Tratamiento Térmico Posterior A La Soldadura.

Las variables de la sección QW-407 tomadas en cuenta para el proceso SMAW Son:

- QW-407.1 El cambio en el estado en la necesidad de un tratamiento térmico después de la soldadura se considera como variable esencial, por ende, si se califica un procedimiento con PWHT, y se quiere usar este mismo procedimiento sin PWHT se debe recalificar.

Por lo general no se requiere PWHT para espesores de material de 5/8 pulgada o menos. En la Figura 45 se ven los resultados obtenidos para la variable QW-407 PWHT. Como se especificó anteriormente y comprobando con la norma ASME BPVC Sección VIII, para soldaduras de ranura no mayores a ½ pulgada el tratamiento post soldadura no es mandatorio.

Figura 45.QW-407 Tratamiento térmico posterior a la soldadura.



Fuente: Elaboración Propia

7.12.4.7. QW-409 Características Eléctricas.

Las variables de la sección QW-409 tomadas en cuenta para el proceso SMAW Son:

- QW-409.4 Un cambio de CA a DC o DC a AC, o un cambio de electrodo negativo a electrodo positivo o al revés se considera como variable no esencial, las fuentes de poder para soldar producen DC con electrodo positivo o negativo. La elección de la polaridad y del tipo de corriente depende del proceso, el tipo de electrodo, la atmosfera del arco y el metal base.

- QW-409.8 la corriente afecta la tasa de fusión o la tasa de consumo del electrodo, cuanto mayor sea el nivel de la corriente, más rápido se derrite el electrodo o mayor es la tasa de fusión. Por otra parte, el voltaje controla la longitud, el ancho y volumen del arco de soldadura, a medida que aumenta el voltaje, la longitud del arco se alarga y el cono del arco se ensancha. Las características eléctricas como amperaje y voltaje se consideran como variables no esenciales.

En la Figura 46 se ven los resultados obtenidos para la variable QW-409 características eléctricas.

Figura 46. QW-409 características eléctricas.

Weld Pass(es)	Process	Filler Metal		Current Type and Polarity	Amps (Range)	Wire Feed Speed (Range)	Energy or Power (Range)	Volts (Range)	Travel Speed (Range)	Other (e.g., Remarks, Comments, Hot Wire Addition, Technique, Torch Angle, etc.)
		Classification	Diameter							
1	Smaw	E6011	3/32"-1/8"	DCEP	60-80 75-120	N/A	N/A	20-35	3"-7" /min	Upward
2	Smaw	E6013	3/32"-1/8"	DCEP	60-90 90-130	N/A	N/A	20-35	3"-7" /min	Upward

Amps and volts, or power or energy range, should be recorded for each electrode size, position, and thickness, etc.

Pulsing Current: N/A — Heat Input (max.): N/A

Tungsten Electrode Size and Type: N/A (Pure Tungsten, 2% Thoriated, etc.)

Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW): N/A (Spray Arc, Short Circuiting Arc, etc.)

Other: ---

Fuente: Elaboración Propia

7.12.4.8. QW-410 Técnica.

Las variables de la sección QW-410 tomadas en cuenta para el proceso SMAW Son:

- QW-410.1 Para soldadura manual o semiautomática, un cambio de la técnica de cordón paralelo a oscilaciones transversal, o viceversa se considera como variable no esencial ya que cualquiera de las 2 técnicas puede producir una soldadura solida con las propiedades mecánicas que se exige en los códigos.

- QW-410.5 El cambio en el método de limpieza inicial y entre pasadas (cepillado, esmerilado, etc.) se considera como variable no esencial, aunque la limpieza entre pases es esencial para garantizar la eliminación completa de la escoria, así como la fusión entre los cordones de soldadura.

- QW-410.6 un cambio en el método de ranurado se considera como variable no esencial, el ranurado posterior es la eliminación del metal de soldadura y el metal base del lado de la raíz de soldadura de una junta soldada para facilitar la fusión y la penetración completa de la junta en la soldadura subsiguiente desde ese lado.

- QW-410.9 Un cambio de varias pasadas por lado a una sola pasada por lado, La gran diferencia entre una sola pasada y varias pasadas por lado es la entrada de calor. Y dependiendo de la entrada de calor, la soldadura puede tener un tratamiento térmico.

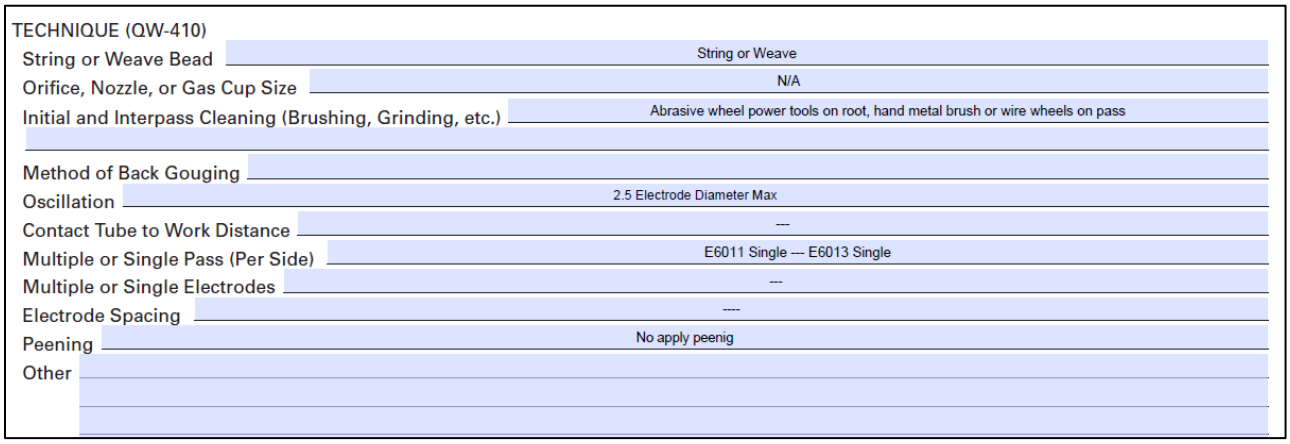
- QW-410.25 Un cambio de soldadura manual o semiautomática a máquina o soldadura automática y viceversa. La soldadura semiautomática y automática tiene menos defectos que la soldadura manual. Sin embargo, un cambio de este no afectará las propiedades mecánicas, por ende, se considera como variable no esencial.

- QW-410.26 La adición o eliminación de granallado. Según la definición ASME IX, el granallado es el trabajo mecánico de los metales mediante golpes de impacto, este proceso se utiliza para agregar tensión de compresión residual al componente soldado, Si se desea que la soldadura sea granallada, el WPS también debe incluir el granallado, estudios han demostrado que un exceso de granallado reducirá la vida de fatiga de un componente. Sin embargo, no es una variable esencial.

- QW-410.64 esta variable aplica solamente a componentes construidos con metales base pertenecientes a P-No 11a y P-No 11B, estos números P agrupan varios aceros de baja aleación y alta resistencia, la mayoría de estos requieren algún tipo de tratamiento térmico durante su fabricación.

Para estos aceros, el uso de procesos térmicos durante la soldadura de piezas obliga al fabricante a preparar un WPS utilizando dichos procesos térmicos. Por lo que se convierte en una variable esencial. En la Figura 47 se ven los resultados obtenidos para la variable QW-410 técnica.

Figura 47. QW-410 técnica.



Fuente: Elaboración Propia

La especificación de soldadura completa se encuentra en el anexo B.

7.13. PROTECCION CONTRA LA CORROSION.

La norma API650 referencia a la práctica recomendada llamada API651 donde se presentan procedimientos y prácticas para lograr un control efectivo sobre la corrosión de tanques de almacenamiento apoyados uniformemente sobre el suelo mediante el uso de protección catódica, Esta puede ser utilizada para tanques ya existentes y para nuevos tanques. Si bien la práctica recomendada API RP 651 tiene como finalidad proporcionar información y orientación específica para tanques metálicos de almacenamientos de hidrocarburos también puede ser aplicada para tanques de otros servicios.

Corrosión puede ser definida como la deterioración de un metal cuando reacciona con su ambiente. La corrosión de estructuras de acero es un proceso electroquímico y para que esta ocurra deben existir áreas con diferentes potenciales eléctricos sobre la superficie del metal, estas áreas deben estar eléctricamente conectadas y en contacto con un electrolito.

Casi cualquier tanque de cierto tamaño, que esté en contacto con el suelo, necesitará una protección catódica en el fondo, esto debido a que algunas veces los recubrimientos que se aplican no son perfectos, por lo que será un buen momento para que la corrosión empiece a actuar. Como dato anexo de la norma la protección catódica puede ser instalada en conjunto con el método de detección de fugas de los tanques. Esta protección tiene la capacidad de alargar la vida útil de las estructuras metálicas de una forma más económica y efectiva que otras técnicas como los revestimientos y la selección de materiales más resistentes a la corrosión en ambientes industriales.

7.13.1. Protección Catódica.

El principal objetivo de esta técnica es el de reducir la corrosión de una superficie metálica, esto lo cumple haciendo que la superficie del metal se comporte como un cátodo en un circuito electroquímico, lo que evita que se corroa, como se nombró anteriormente, el proceso de protección catódica se basa en los principios de la electroquímica y se utiliza una diferencia de potencial eléctrico para evitar que el metal se oxide.

Hay 4 componentes necesarios para crear una celda de corrosión, los cuales son, el ánodo, el cátodo, el metal que conecta ánodo con cátodo y el electrolito. en el ánodo, el metal base se disuelve liberando electrones de esta manera se corroe. (API 651 Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks, 2014)
La reacción anódica es:

$$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^{-}$$

En el cátodo, las reacciones químicas suceden usando electrones liberados por el ánodo, el cátodo no se corroe, su reacción química es:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}.$$

La parte metálica sirve como un camino para que los electrones liberados en el ánodo lleguen al cátodo. El electrolito contiene iones y conduce la corriente desde el ánodo al cátodo mediante un movimiento iónico. Adicionalmente, el electrolito contiene ambas cargas iónicas, negativas llamadas aniones y positivas llamadas cationes.

Existen varios métodos a tener en cuenta cuando se diseñan sistemas de protección catódica, entre los más usados están los sistemas galvánicos, el sistema de corriente impresa, sistema por mallas de titanio y cama anódica. La

práctica recomendada API 651 aconseja el uso del sistema galvánico o también llamado protección galvánica por ánodos de sacrificio, así como también aconseja el uso de sistemas de corriente impresa. De la misma manera la práctica recomendada los define de la siguiente manera:

7.13.1.1. Protección Galvánica.

Los sistemas galvánicos utilizan un metal más reactivo que el material usado en el fondo del tanque para suministrarle la corriente necesaria para mitigar la corrosión en la estructura principal. Este metal es el ánodo, que comúnmente se suele llamar ánodo de sacrificio, este debe ser un metal más activo que la superficie metálica que se desea proteger, este ánodo se sitúa cerca del fondo del tanque y al corroerse libera electrones en el electrolito, es decir, el suelo, estos electrones fluyen hacia la superficie metálica, la que inmediatamente actúa como cátodo evitando así que se corroa.

El ánodo se conecta eléctricamente al tanque a proteger y se entierra en el suelo. Los metales comúnmente usados como ánodos de sacrificio son el magnesio y el zinc y se distribuyen alrededor del perímetro del tanque o suelen ser enterrados debajo del fondo de este. Cabe aclarar que el ánodo de sacrificio se consume con el tiempo debido a la corrosión, por esta razón se debe reemplazar periódicamente.

Ventajas y desventajas de la protección galvánica.

Los sistemas galvánicos tienen varias ventajas como:

- No se requiere fuente de alimentación externa.
- La instalación es relativamente fácil.
- La inversión de capital es baja para tanques de pequeño diámetro.
- Los costos de mantenimiento son mínimos.
- Los problemas de interferencia son poco comunes.
- No se requiere un seguimiento frecuente.

Tienen desventajas como:

- El potencial de conducción es limitado.
- La salida actual es baja.
- El uso se limita a suelos de baja resistividad.
- No es práctico para la protección de grandes estructuras no protegidas.

- La esperanza de vida muy corta en suelos de baja resistividad.

7.13.1.2. Protección Catódica Por Corriente Impresa.

Este método utiliza energía de una fuente externa, estos sistemas utilizan corriente continua generalmente proporcionada por un rectificador conectado a una fuente de alimentación de corriente alterna. La corriente directa que provee el rectificador fluye hacia el ánodo de corriente impresa que está enterrado, desde el ánodo a través del electrolito y hacia el fondo del tanque.

Ventajas y desventajas del sistema por corriente impresa.

Tiene como ventaja:

- Disponibilidad de un gran potencial de conducción.
- Salida de alta corriente capaz de proteger estructuras grandes o pequeñas.
- Capacidad de salida de corriente variable.
- Aplicable a casi cualquier resistividad del suelo.

Tienen desventajas como:

- Posibles problemas de interferencia con estructuras cercanas.
- La pérdida energía de entrada provoca la pérdida de protección.
- Altos costos de mantenimiento y operación.
- Altos costo de capital para instalaciones pequeñas.
- Aspectos de seguridad de la ubicación del rectificador.
- Aspectos de seguridad de la conexión del cable negativo.
- Necesidad de seguimiento con más frecuencia.

7.13.1.3. Diseño seleccionado.

Se decidió considerar un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio, pero antes de diseñar un sistema de protección satisfactorio que utilice ánodos de sacrificio, debe estar disponible o decidirse sobre la siguiente información:

- El área de la estructura de acero a proteger.
- El tipo de revestimiento, si existe, que se va a utilizar.
- La densidad de corriente catódica
- La vida del sistema de protección catódica.

El área que se desea proteger es el área metálica involucrada con el sistema, es el área del fondo del tanque y se determina con la ecuación (47).

$$A_{p.c} = \frac{\pi}{4} * D^2 \text{ (47)}$$

Donde:

$A_{p.c}$ es el área del fondo del tanque, incluida la extensión hacia afuera de la envolvente, en m^2
D es el diámetro del fondo del tanque, incluida la extensión hacia afuera de la envolvente, en m

Reemplazando los valores en la ecuación (47) se obtuvo:

$$A_{p.c} = \frac{\pi}{4} * (12{,}1524\ m)^2$$

$$A_{p.c} = 115.9882\ m^2$$

Para determinar la magnitud de corriente necesaria se requiere conocer la densidad de corriente requerida para una protección catódica ambiental adecuada. Esta se obtiene acorde al tipo de medio en que se encuentre el material.

L. Shreir en su libro “Corrosión Control” en la tabla 10.14 provee una orientación sobre densidades de corriente mínimas de diseño para la protección catódica del acero sin recubrimiento. Se selecciono un valor medio para un entorno húmedo de $70\ mA/m^2$ (L.L. Shreir, 1994a)

$$I_{av} = 70\ mA/m^2$$

La vida de diseño estimada debe estar entre 1 y 40 años, es importante señalar que entre mayor tiempo de vida del sistema mayor será la masa del material anódico.

$$L = 2\ años$$

Se seleccionaron ánodos de magnesio con forma de barra circular de 11.4 cm de diámetro por 44 cm de alto y un peso de 7.7 kg. La capacidad del ánodo se mide en amperios hora por kilogramo de material, este valor es de:

$$C = 1230\ Ah/kg$$

Para calcular la masa total de material anódico se utiliza la ecuación (48).

$$W = \frac{I_{av} * A_{p.c} * L * 8760}{C} \text{ (48)}$$

Reemplazando se obtuvo:

$$W = \frac{0.07 * 115.98 * 2 * 8760}{1230}$$

$$W = 115.649\ kg$$

La salida del ánodo es la corriente disponible desde el ánodo y dependerá de la forma del ánodo, la resistividad del ambiente, el potencial de protección de la estructura y el potencial de operación del ánodo, esta se define con la ecuación (49).

$$I = \frac{E_2 - E_1}{R} \text{ (49)}$$

Donde:

I es la corriente de salida del ánodo, en A
E_2 es el potencial de protección del acero en ambientes aeróbicos y está definido como $-0.80\ V$
E_1 es el potencial del ánodo, en V, cuyo valor estándar es de $-1.70\ V$
R es la resistencia del ánodo, en Ohm

Para hallar la resistencia del ánodo de sacrificio existen múltiples ecuaciones, la ecuación (50) empleada en este caso es para ánodos con geometría no especificada.

$$R = \frac{0.315 * p}{\sqrt{A}} \text{ (50)}$$

Donde

R es la resistencia del ánodo, en Ω
p es la resistividad del medio, en $\Omega * cm$
A es el área expuesta del ánodo, $(perimetro\ x\ altura)\ cm^2$

Reemplazando se obtuvo:

$$R = \frac{0.315 * 500}{\sqrt{1525.82}}$$

$$R = 3.9675\ \Omega$$

Reemplazando en la ecuación (49) se obtuvo:

$$I = \frac{-0.80 - (-1.70)}{3.9375}$$

$$I = 0.22683\ A$$

Habiendo calculado la resistencia y la salida de corriente, se puede chequear la vida útil del ánodo con la ecuación (51).

$$L = \frac{MU}{IE} \text{ (51)}$$

Donde:

L es la vida efectiva del ánodo, en años
M es la masa de un solo ánodo, en kg
U es el factor de utilización, establecido en 50 %
E es la tasa de consumo del ánodo, en kg/Ay, (la inversa de la capacidad del ánodo en años)
I es la corriente de salida del ánodo, en A

Reemplazando se obtuvo:

$$L = \frac{7.7 * 0.5}{0.22683 * 7.1219}$$

$$L = 2.3831\ Años$$

Una excesiva vida útil del ánodo es contraproducente, si la vida calculada no es adecuada, se debe considerar un tamaño o forma distinta del ánodo, sin embargo, esto no puede ser siempre posible, especialmente para estructuras de corta duración o cuando se imponen restricciones dimensionales a los ánodos de sacrificio.

Se procedió finalmente a calcular el número de ánodos, con ayuda de la ecuación (52).

$$N = \frac{A * I_{av}}{I} \text{ (52)}$$

Reemplazando se obtuvo:

$$N = \frac{115.9882 * 0.07}{0.22683}$$

$$N = 35.793\ anodos$$

Este resultado debe estar acompañado por un análisis de ingeniería, ya que debe arrojar un numero viable de ánodos. NxM debe ser igual o mayor que el peso total del material anódico W requerido, comprobando se obtuvo:

$$NxM = 35.793 * 7.7\ kg = 275.604\ kg$$

Obtener simultáneamente la corriente de salida exacta y el peso preciso del material del ánodo resulta ser un desafío. Por lo tanto, se debe llegar a un equilibrio, pero ambos aspectos, al menos, deben satisfacer los requisitos de diseño.

7.13.2. Sistema de Recubrimientos - norma ISO 12944.

La norma ISO 12944 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems” desde hace algunos años se está convirtiendo en la norma principal para el control de la corrosión a escala mundial y está reemplazando las normas regionales de control de la corrosión.

Este estándar es de utilidad para propietarios de activos como tuberías y tanques que tienen un cronograma estricto de mantenimiento ya que le otorga confianza en las medidas de control de corrosión especificadas que se toman, la posibilidad de tener un enfoque estandarizado para la selección de sistemas de recubrimiento, la oportunidad de verificar que un sistema de recubrimiento propuesto es adecuado para su propósito entre otros.

El estándar ISO 12944 se divide en 9 partes o secciones, que son las siguientes:

Parte 1: Introducción general.
Parte 2: Clasificación de ambientes.
Parte 3: Consideraciones de diseño.
Parte 4: Tipos de superficie y preparación de superficie.
Parte 5: Sistemas de pintura protectora.
Parte 6: Métodos de prueba de desempeño de laboratorio y Criterios de evaluación asociados.
Parte 7: Ejecución y supervisión de pintura.
Parte 8: Desarrollo de especificaciones para obra nueva y mantenimiento.
Parte 9: Sistemas de pintura protectora y métodos de prueba de rendimiento de laboratorio para estructuras marinas y relacionadas.

La norma ISO 12944 lista y tabula varios ejemplos de sistemas de recubrimiento de acuerdo con la corrosividad del medio ambiente y la durabilidad prevista. Esta información se puede encontrar en el anexo A de la sección 5 (ISO 12944-5-2018.02).

7.13.2.1. Pautas Para Seleccionar El Sistema De Recubrimiento.

La norma ISO 12944 en su sección 5 establece una serie de pasos para facilitar la correcta selección de un sistema de recubrimiento dependiendo la aplicación solicitada. A continuación, se presenta el desarrollo de estos pasos aplicados al objeto de este documento. (Paints and Varnishes — Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems. Part 5:Protective Paint Systems, 2018)

PASO 1: Analizar o estimar la corrosividad del ambiente en el área donde se ubica el tanque. En este sentido, ISO 12944-2 considera categorías para la corrosividad atmosférica. Las cuales son:

- C1 – Corrosión muy baja
- C2 – Corrosión baja
- C3 – Corrosión media
- C4 – Corrosión alta
- C5 – Corrosión muy alta
- CX – Corrosión extrema

Adicionalmente esta norma proporciona ejemplos de ambientes típicos. Se muestran en la tabla 1. Basándose en la Tabla 24 se decidió estimar un ataque corrosivo C3 medio.

PASO 2. Establecer si existen condiciones especiales (microclima) que resulten en un ambiente de mayor corrosividad (ISO 12944-2).

PASO 3. Establecer y seleccionar la durabilidad deseada del sistema de recubrimiento. La norma ISO 12944-1 en su sección 5.5 establece 4 categorías correspondientes a la duración de los recubrimientos, las cuales son:

- Baja (L) hasta 7 años.
- Media (M) 7 a 15 años.
- Alta (H) 15 a 25 años.
- Muy alta (VH) más de 25 años.

La norma además aclara que el rango de durabilidad no es un tiempo de garantía. La durabilidad es una consideración técnica, así como un parámetro de planificación que puede ayudar al propietario del tanque a establecer un correcto programa de mantenimiento por otra parte el tiempo de garantía suele ser menor al rango de durabilidad actualmente no existen reglas que relacionen los 2 periodos de tiempo. Se selecciono un sistema de recubrimiento de alta duración.

Tabla 24. Corrosividad de ambientes típicos.

Corrosivity category	Mass loss per unit surface/thickness loss (afterfirstyear of exposure)				Examples of ty pical environments (informative only)	
	Low - carbon steel		Zinc			
	Mass loss	Thickness loss	Mass loss	Thickness loss	Exterior	Interior
	g/m2	µm	g/m2	µm		
Cl very low	≤10	≤1.3	≤0,7	≤0,1	-	Heated buildings with clean atmospheres, e.g., offices, shops, schools, hotels
C2 low	>100 to 200	>1,3 to 25	>07 to 5	>0,1 to 0,7	Atmospheres with low level of pollution: mostly rural areas	Unheated buildings where condensation can occur, e.g., depots, sports halls
C3 medium	> 200 to 400	>25 to 50	> 5 to 15	>0,7 to 2,1	Urban and industrial atmospheres, moderate sulfur dioxide pollution; coastal areas with low salinity	Production rooms with high humidity and some air pollution, e.g., food-processing plants, laundries, breweries, dairies
C4 high	>400 to 650	>50 to 80	>15 to 30	>2,1 to 4,2	Industrial areas and coastal areas with moderate salinity	Chemical plants, swimming pools, coastal ship, and boatyards
C5 very high	>650 to 1500	>80 to 200	>30 to 60	>4,2 to 8,4	Industrial areas with high humidity and aggressive atmosphere and coastal areas with high salinity	Buildings or areas with almost permanent condensation and with high pollution
CX Extreme	>1500 to 5500	>200 to 700	>60 to 180	>8,4 to 25	Offshore areas with high salinity and industrial areas with extreme humidity and aggressive atmosphere and sub- tropical and tropical atmospheres	Industrial areas with extreme humidity and aggressive atmosphere

Fuente: ISO 12944-2.

PASO 4. En la norma ISO 12944-5 buscar en el Anexo B al anexo E la tabla correspondiente. El anexo B establece un conjunto de requisitos mínimos para los sistemas de protección en las distintas categorías y durabilidades. Las Tablas C.1 a C.6, D.1 y Tabla E.1 dan propuestas para diferentes tipos genéricos de sistemas de pintura para las categorías de corrosividad C2 a C5.

PASO 5. Identificar en la tabla el sistema de recubrimiento con la durabilidad requerida, luego seleccionar el mejor sistema, teniendo en cuenta el método de preparación de la superficie.

Primero se selecciona el método de preparación de la superficie, de acuerdo con la Tabla 25. Se selecciono un grado de limpieza Sa 2 ½ que corresponde a una limpieza por chorro abrasivo muy profunda. Con la primera capa con imprimante alquídico, epóxico o con un sistema de protección rico en zinc, Zn(R), que son aquellas que forman una capa con un contenido de pigmento en polvo de zinc igual o superior al 80 % en masa en película seca.

Tabla 25. Preparación de superficie.

Substrate	Minimum preparation grade (if not otherwise specified)	First layer of protective system
Carbon steel grades A. B. C Da according ISO 8501-1	Sa 2 1/2 according to ISO 8501-1 medium (G) according to ISO 8503•1	Zn (R) primer
	Sa 2 1/2 according to ISO 8501-1 additional information should be given in the technical data sheets	Miscellaneous primer
	According to ISO 2063	Thermal-sprayed metallic coating and sealer (according to ISO 2063)

Fuente: Norma ISO 12944-5, Tabla B.1.

Segundo, de acuerdo con la Tabla 26 se selecciona la categoría C3 que corresponde a la categoría seleccionada en el paso 1.

Tabla 26. Selección de categoría.

Durability		**Low (1)**			**Medium (m)**			**High (h)**			**Very high (vh)**		
Type of primer		Zn (R)	Misc.		Zn (R)	Misc.		Zn (R)	Misc.		Zn (R)	Misc.	
Binder base Of primer		ESI, EP. PUR	EP. PUR , ESI	AK. AY	ESI, EP. PUR	EP. PUR , ESI	AK. AY	ESI, EP. PUR	EP. PUR , ESI	AK. AY	ESI, EP. PUR	EP. PUR , ESI	AK. AY
Binder base Of subsequent coats		Ep, PUR, AY	EP. PUR . AY	AK, AY	Ep, PUR, AY	EP. PUR . AY	AK, AY	Ep, PUR, AY	EP. PUR . AY	AK, AY	Ep, PUR, AY	EP. PUR . AY	AK, AY
C2	MNOC	A			-	-	1	1	1	1	2	2	2
	NDFT				-	-	100	60	120	160	160	180	200
C3	MNOC	-	-	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
	NDFT	-	-	100	60	120	160	160	180	200	200	240	260
C4	MNOC	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	2	-
	NDFT	60	120	160	160	180	200	200	240	260	260	300	-
C5	MNOC	2	2	-	2	2	-	3	2	-	3	3	-
	NDFT	160	180	-	200	240	-	260	300	-	320	360	-

NOTE 1: The abbreviations described in Tabla A.1. For single the binder base of the primer recommended.
NOTE 2: In addition to polyurethane technology. Other coating technologies maybe suitable e.g., polysiloxanes, polyaspartic and fluoropolymer [(fluoroethylene/vinyl ether co-polymer (FEVE)
a. If a coating desired. use System from higher corrosivity category or durability. E.g. C2 high or C3 médium.

Fuente: Norma ISO 12944-5

Tercero, en la Tabla 27 que contiene los sistemas de pinturas para acero al carbono y categoría C3, Se seleccionaron los sistemas de pinturas C3.06 y C3.09, técnicamente difieren únicamente en el imprimante a utilizar.

PASO 6. Consultar al fabricante de la pintura para confirmar la elección y determinar qué sistema(s) de pintura disponibles comercialmente corresponden al sistema de pintura seleccionado.

Resumiendo, el esquema C3.06, con una duración alta (H), se compone de un número total de capas de 2 und y un espesor nominal de película seca (NDFT) de 180 µm, con:

Tabla 27. Sistemas de pinturas para acero al carbono y categoría C3.

System No.	Priming coat				Subsequent coat (s)	Paint system		Durability			
	Binder type	Type of primer	No. Of coats	NDFT in µm	Binder type	Total, no. Of coats	NDFT in µm	l	m	h	vh
C3.01	AK. AY	Misc.	1	80 to 100	AK, AY	1-2	100	x			
C3.02	AK. AY	Misc.	1	60 to 160	AK, AY	1-2	160	x	x		
C3.03	AK. AY	Misc.	1	60 to 80	AK, AY	2-3	200	x	x	x	
C3.04	AK. AY	Misc.	1	60 to 80	AK. AY	2-4	260	x	x	x	x
C3.05	EP, PUR, ESI	Misc.	1	80 to 120	EP, PUR, AY	1-2	120	x	x		
C3.06	EP, PUR, ESI	Misc.	1	80 to 160	EP, PUR, AY	2	180	x	x	x	
C3.07	EP, PUR, ESI	Misc.	1	80 to 160	EP, PUR, AY	2-3	240	x	x	x	x
C3.08	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	-	1	60	x	x		
C3.09	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60 to 80	EP, PUR, AY	2	160	x	x	x	
C3.10	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60 to 80	EP, PUR, AY	2-3	200	x	x	x	x

Fuente: Norma ISO 12944-5. Table C.3

Recubrimiento Base:

- Mínimo número de capas (MNOC): 1
- Espesor nominal de película seca (NDFT): 80 a 160 µm.
- Imprimante: Miscelaneos.
- Aglutinante: Silicato de etilo, Epoxi, Poliuretano.

Recubrimiento de acabado:

- Aglutinante de capas: Epoxi, Poliuretano, Acrílico.

El esquema C3.09, con una duración alta (H), se compone de un número total de capas de 2 und y un espesor nominal de película seca (NDFT) de 160 µm, con: Recubrimiento Base:

- Mínimo número de capas (MNOC): 1
- Espesor nominal de película seca (NDFT): 60 a 80 µm.
- Imprimante: Zinc (R)
- Aglutinante: Silicato de etilo, Epoxi, Poliuretano.

Recubrimiento de acabado:

- Aglutinante de capas: Epoxi, Poliuretano, Acrílico.

7.13.2.2. Proveedores.

SIKA: El manual de recubrimientos para metal de la compañía SIKA, Edición 2015 aconseja el uso del siguiente esquema de recubrimiento para tanques de crudo (Sika Colombia SAS, 2015).

Superficie interna:

- Preparación de superficies: Limpieza con chorro abrasivo según norma SSPC-SP10 que equivale a SA 2 ½.
- Recubrimiento base: Imprimante Epóxico Rojo, Referencia 137008 a un espesor de 3-4 mils (75 -100 µm) en película seca.
- Recubrimiento de acabado: Coaltar Epóxico Referencia 786502 ó serie 200 ó serie 300 a un espesor de 7 - 8 mils (175 - 200 µm) en película seca.

Este esquema de recubrimiento cumple con el sistema C3.06 seleccionado de la norma ISO 12944-5 aunque aumenta su espesor en 70 µm dando más confiabilidad al propietario.

Superficie Exterior:

- Preparación de superficies: Limpieza con chorro abrasivo según norma SSPC-SP10 ó mínimo SSPC-SP6.
- Recubrimiento base: Imprimante epóxico fosfato de cinc, referencia 137057 ó imprimante epóxico rojo referencia 137008 a un espesor de 3.5-4 mils en película seca.
- Recubrimiento de barrera: Barrera epóxica gris, referencia 233710 a un espesor de 3.5-4 mils en película seca.
- Recubrimiento de acabado: Esmalte Uretano Serie 36 a un espesor de 2.0 - 3.0 mils en película seca. Alternativa: Serie 100 a 8 mils.

En este caso, este esquema tiene 3 capas, por ende, cumple con un sistema C3.07.

HEMPEL: Hempel tiene una gran variedad de recubrimientos, en específico para su uso en tanques aconseja el uso de algunos de ellos, pero no define esquemas prediseñados, así que, dependiendo de la ficha técnica de los recubrimientos, el ingeniero a cargo puede decidir si aplicar capas anteriores o capas subsiguientes según su grado de experiencia en campo (HEMPEL, 2018).

Superficie Interna:

- Preparación de superficies: Limpieza con chorro abrasivo según norma SSPC-SP10 que equivale a SA 2 ½.
- Recubrimiento base: Imprimante Hempaline Prepare 130 (Novolac Epoxi) a un espesor de 2 mils (50 µm) en película seca.
- Recubrimiento de barrera: Hempaline Defend 630 a un espesor de 20 mils (500 µm) en película seca.

Superficie Exterior (C3 medio, Vida estimada 7-15 años, Sistema #3):

- Preparación de superficies: Limpieza con chorro abrasivo según norma SSPC-SP10 ó mínimo SSPC-SP6.
- Recubrimiento base: Imprimante Hempaprime Multi 500, pintura epoxica con alto contenido de solidos a un espesor de 120 µm en película seca.
- Recubrimiento de barrera: Poliuretano Hempathane Fast Dry 55750 a un espesor de 60 µm en película seca.

Este último sistema seleccionado es especialmente diseñado para ambientes corrosivos C3 con 2 capas, este cumpliría con el sistema C3.06.

7.13.2.3. Comentario.

La elección de sistemas de recubrimiento viene dada en gran medida por aplicaciones en ámbitos industriales, si bien la norma ISO 12944 especifica ambientes corrosivos y lista ejemplos, es necesario conocer todo lo involucrado al proceso y contar con el conocimiento por parte de los expertos al momento de seleccionar revestimientos para una determinada aplicación. Es por esto por lo que es estrictamente necesario tener en cuenta todas las variables involucradas en el diseño para obtener los mejores resultados en el tiempo al momento de ejecutar la aplicación de los sistemas de recubrimientos ofertados por proveedores y avalados por ISO 12944.

7.14. DATA SHEET

En el anexo A del presente documento se presenta el data sheet, esta ficha técnica se incorporará como parte integral de una especificación detallada del tanque. Esta ficha técnica ofrece un espacio destinado a definir información técnica específica, como las características geométricas, las cargas de diseño, los materiales utilizados y los accesorios, además de incluir un esquema del tanque, también, esta ficha técnica puede ser utilizada como parte del registro permanente del propietario, que proporciona una descripción detallada del tanque.

Dado que el fabricante puede aportar parte de la información contenida en la ficha técnica, esta también puede facilitar la recopilación de los requisitos de diseño en su totalidad. La norma API 650 en su anexo L. explica la información que deben colocar los compradores en la hoja de datos para que la utilicen los fabricantes, sin embargo, algunas de las instrucciones se aplican al comprador o al fabricante, dependiendo de qué parte asuma ciertas responsabilidades.
La sección referente al techo flotante en la ficha técnica puede omitirse si no se requiere un techo flotante para el tanque. (API 650 Welded Tanks for Oil Storage, 2020)

Los responsables de la elaboración de la ficha técnica deben contar con experiencia en el diseño de tanques y deben garantizar la precisión y la exhaustividad de los requisitos. El comprador es el principal encargado de iniciar y concluir la elaboración de la ficha técnica.

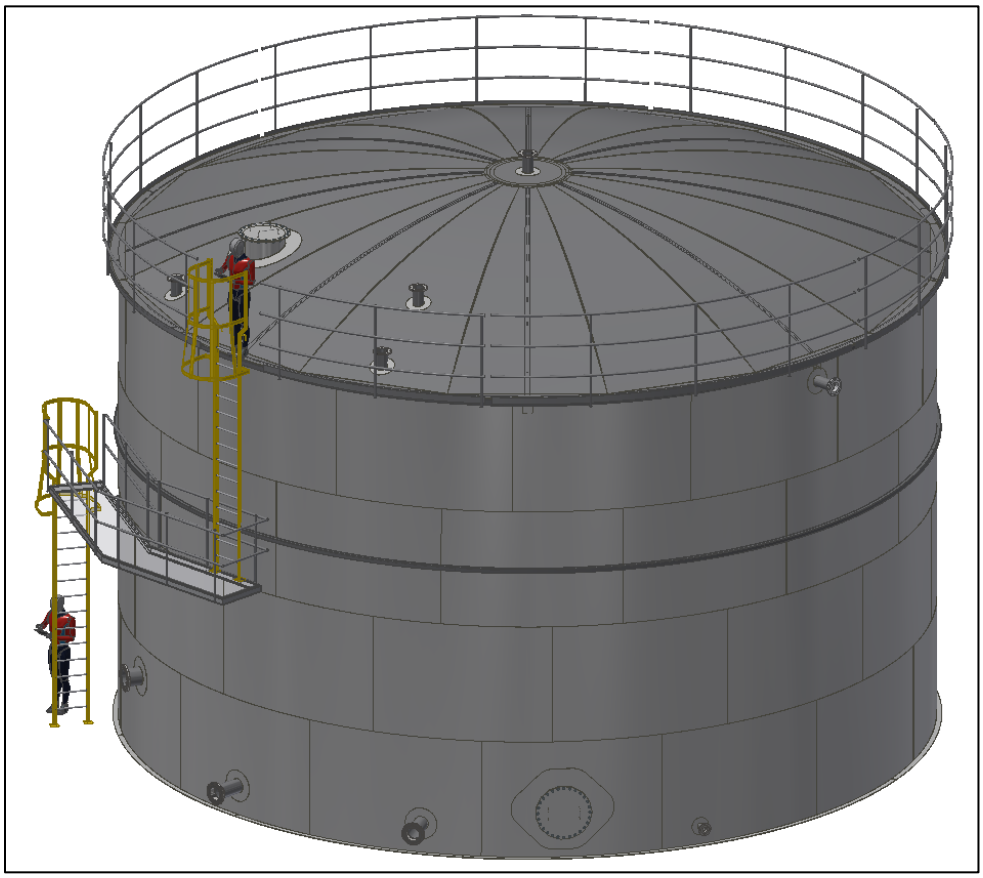
El fabricante completará la ficha técnica según sea necesario para describir la propuesta y proporcionará la información relevante requerida en todas las secciones marcadas con un asterisco (*) que no hayan sido suministradas por el comprador.

8. ANALISIS DE RESULTADOS.

8.1. SIMULACION CAD.

El modelado del tanque de 200.000 galones acorde a la norma API 650 13th edición se realizó en el software Autodesk inventor 2019, luego para fines de simulación se exporto a formato sat para iniciar el análisis de esfuerzos por método de elementos finitos, este se realizó en el software ANSYS 2023 R2. La Figura 48 muestra una imagen de referencia del tanque modelado en 3D.

Figura 48. Modelado Tanque 200.000 Gal (D 12m x H 7.2m).



Fuente; Elaboración Propia.

El objetivo de la simulación por elementos finitos es establecer qué nivel de seguridad ofrece el espesor de las placas que componen el cuerpo del tanque cuando se somete a presión hidrostática, normativamente, después de la

construcción de toda la estructura del tanque, el cuerpo deberá someterse a prueba de resistencia llenando con agua hasta el nivel de diseño (7.0 m).

8.2. PRESIÓN HIDROSTÁTICA.

En este caso se determinará la integridad de la base y la envolvente del tanque por presión hidrostática y cargas debido a la naturaleza gravitacional afectando cada parte del cuerpo. La presión hidrostática se calculó utilizando la ecuación (53).

$$P = p * g * H \quad (53)$$

Donde:

P es la presión hidrostática, en Pa.
p es la densidad del fluido utilizado, en kg/m^3.
g es la gravedad, en m/s^2
H es la altura máxima del fluido, en metros.

Reemplazando en la ecuación (53), se tiene que:

$$P = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 7.2\ m$$

$$P = 70632\ Pa$$

Se aplica esta presion sobre el interior del tanque como se muestra en la Figura 49 de la siguiente página.

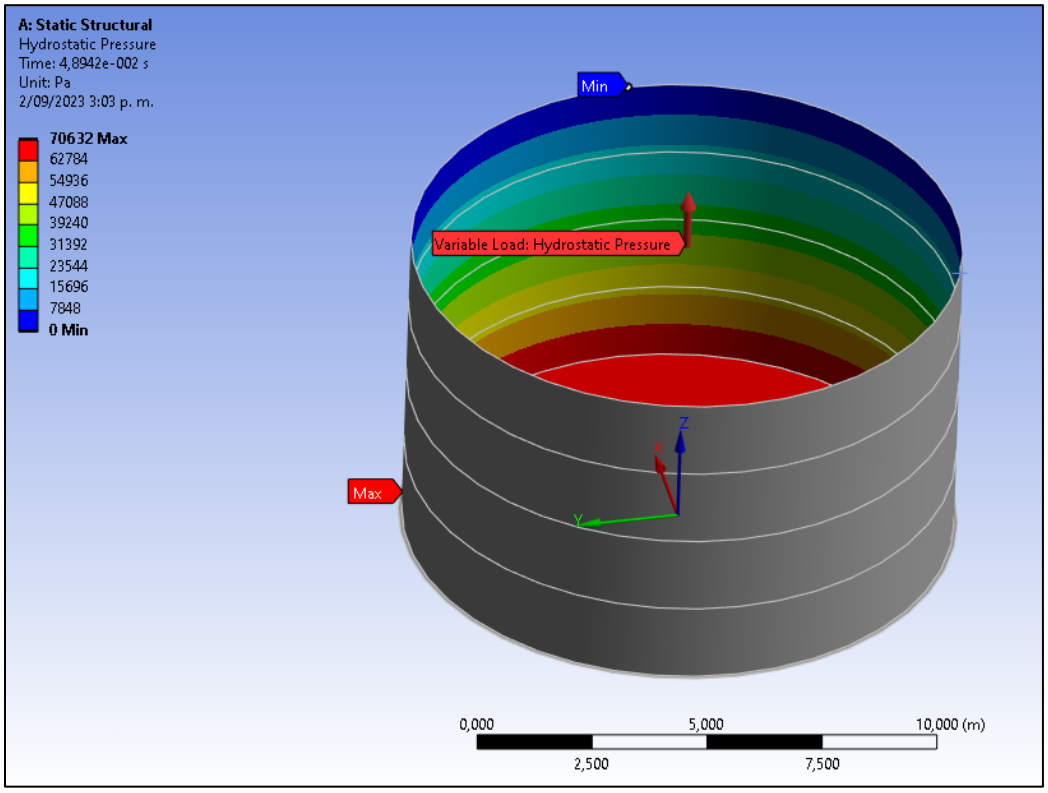
8.3. MALLADO.

La simulación de esfuerzos y deformaciones inicia con un mallado donde se sectoriza o se divide el modelo completo en un numero finito de elementos individuales, por simplicidad del modelo, se decidió contemplar cada anillo como una unidad rígida, de esta forma se obtuvieron 5 partes para realizar el análisis (base, anillo #01, anillo #02, anillo #03, anillo #04).

Luego se procedió a realizar el mallado del modelo, para lo cual se decidió aplicar tamaños de elementos distintos dependiendo el área de interés y análisis, el orden de las partes fue establecido por el software.

En la parte baja del tanque, más específicamente en el primer anillo, es donde se generará el mayor esfuerzo, de esta forma se decidió darle una refinación al mallado en el anillo #01.

Figura 49. Distribución de presión hidrostática en ANSYS 2023.



Fuente: Elaboración propia.

La versión del software permite cierto número de elementos, por ende, se seleccionó el tamaño de estos según su ubicación. En la Tabla 28 se presenta la información seleccionada para cada parte.

Tabla 28. Tamaño de elementos según parte a analizar.

MALLADO		
Parte	**Descripción**	**Tamaño Elemento**
1	Anillo #01	0,109 m
2	Anillo #03	0,300 m
3	Base	0,345 m

4	Anillo #02	0,345 m
5	Anillo #04	0,345 m

En la Figura 50 se aprecia el mallado del tanque, el tipo de mallado que se genera por defecto en superficies con una naturaleza curva es de tipo tetraedrico. Luego de al menos 10 iteraciones se obtuvieron 126.126 nodos y 60.524 elementos con una calidad de 0.21.

Figura 50. Mallado de modelo.



Fuente: Elaboración propia

8.4. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.

Los parámetros con mayor importancia en el análisis son La deformación y el Estrés von-mises equivalente.

8.4.1. Estrés Von-Mises Equivalente.

En el análisis estructural de ingeniería este esfuerzo se usa para el análisis del buen diseño mecánico, la tensión equivalente de Von-Mises es un resultado común del análisis de tensiones utilizando el método de elementos finitos, los gráficos de contorno generalmente se generan para mostrar la distribución de la tensión equivalente dentro de un componente ya que permiten identificar áreas con riesgo de fallo.

Como se observa en la Figura 51 el esfuerzo máximo alcanzado en la prueba hidrostática es de 69.055 MPa. Para calcular el factor de seguridad se utiliza la ecuación (54).

$$F.S = \sigma_y/\sigma_e \quad (54)$$

Donde:

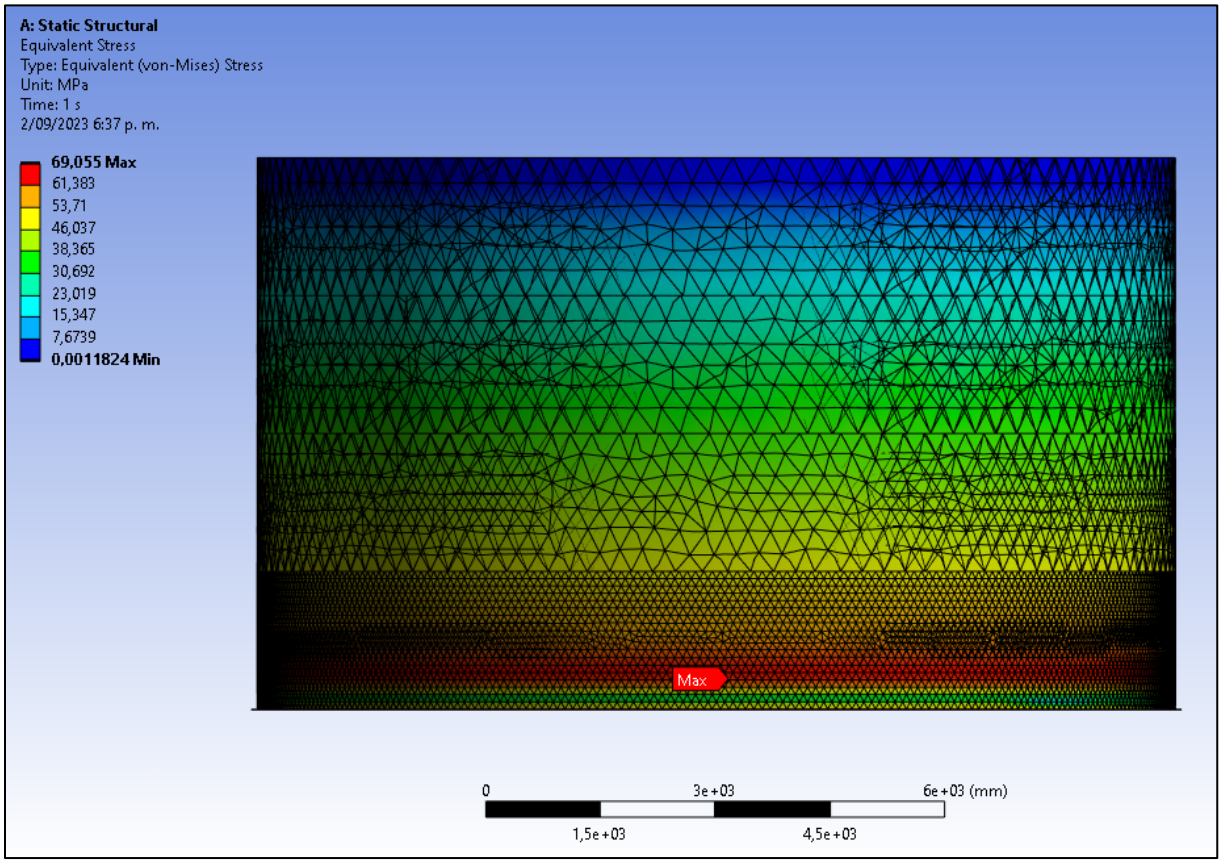
$F.S$ es el factor de seguridad
σ_y es el límite elástico mínimo del material, en MPa
σ_e es el esfuerzo equivalente von-mises, en MPa

Para el acero ASTM A283 grado C es limite elástico es de 205 MPa. Así pues, reemplazando en la ecuación (54), se obtuvo que el factor de seguridad es:

$$F.S = \frac{205\ Mpa}{69.055\ Mpa}$$

$$F.S = 2.9686$$

Figura 51. Distribución de esfuerzo equivalente Von-mises.

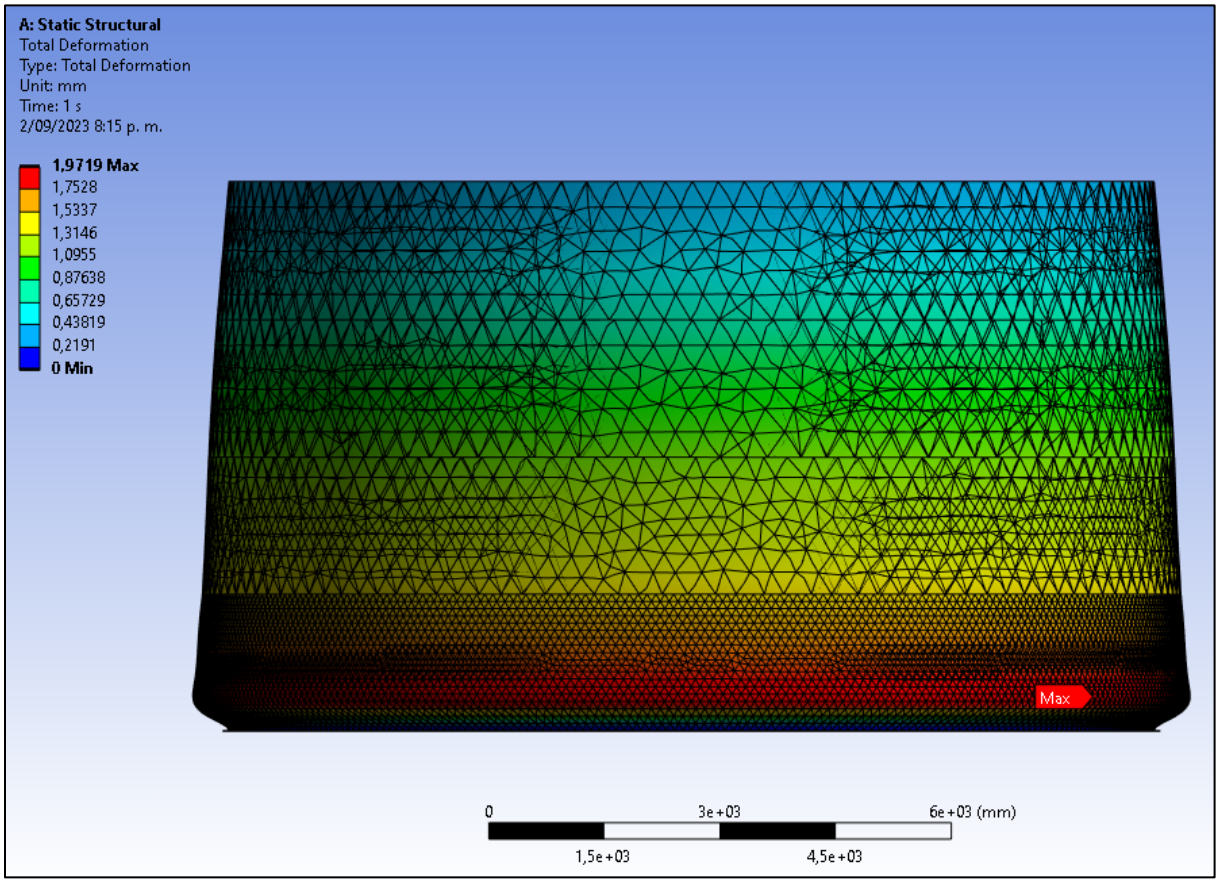


Fuente: elaboración propia.

8.4.2. Deformación.

En la Figura 52 se puede ver en forma escalada la deformación total de la envolvente cuando se somete a una la presión hidrostática establecida, en este caso la deformación total es de 1.972 mm con respecto al radio del tanque, este valor equivale a un 0.032865 %. En el anexo C del presente documento se puede ver el reporte completo proporcionado por el software ANSYS 2023 R3.

Figura 52. Deformación total (escala 240/1).



Fuente: Elaboración propia.

9. CONCLUSIONES

El diseño de tanques de almacenamiento en general se fundamenta en una serie de disciplinas clave, incluyendo Resistencia de Materiales, Mecánica Estructural, Mecánica de Fluidos, Estática, Principios y Control de Soldadura, Producción y Costos, Mantenimiento Industrial, Estadística, Gestión y Control de Calidad, Ingeniería de Proyecto y Taller Mecánico, entre otras. Es esencial tener un conocimiento sólido en todas estas áreas para un correcto desarrollo del proyecto.

Las normas o estándares son directrices legales y principios técnicos que supervisan la calidad de los productos o servicios ofrecidos en el mercado, y también abordan los aspectos medioambientales asociados a su producción, es de vital importancia su comprensión y el acatar los lineamientos para obtener los mejores resultados.

El desarrollo de este proyecto se basó en gran medida en la Norma API 650 del Instituto Americano del Petróleo, la cual puede ser aplicada en todo el mundo ya que se reconoce como una norma confiable y viable. Esta norma guía a los diseñadores e ingenieros y proporciona herramientas valiosas para el diseño mecánico, calificación, procedimientos de soldadura, aunque no fueron del alcance del presente proyecto también proporciona información para métodos de fabricación, montaje, inspección técnica, entre otros aspectos. Este estándar obliga a cliente y diseñador/constructor a llevar una colaboración alta, minimizando errores en la toma de decisiones. El trabajo realizado bajo esta norma es comparable en todo el mundo y contribuye a la correcta ejecución de proyectos dentro de la industria petrolera y similares.

El tanque descrito en este documento, conforme al estándar API 650, satisface de manera precisa los requisitos específicos. Tiene una capacidad de 200,000 galones y opera sin dificultades dentro de los rangos de temperatura especificados, en total conformidad con las normativas que regulan los tanques de almacenamiento, adicionalmente con la información aquí reunida el fabricante podrá realizar una estimación valida del precio total de la fabricación adicionando el coste de mano de obra.

La selección del acero ASTM A283 para la construcción se considera una buena elección ya que para tanques de pequeño diámetro es capaz de soportar las cargas necesarias, es una relación costo beneficio eficaz y a pesar de que se decidió no usar el anexo A de la norma API 650 para calcular el espesor del cuerpo del tanque, los valores arrojados por la simulación revelan un factor de seguridad de alta confiabilidad.

Con la ayuda del software ANSYS R2 2023 se logró verificar que el diseño del tanque es el correcto ya que para una carga hidrostática de 70632 Pa, además de la simulación real del efecto gravitacional, el mayor esfuerzo mecánico es de 69 Mpa dando como resultado un factor de seguridad de más del 100 %.

La selección de un fondo anular reduce el número de cruces de juntas soldadas entre la envolvente y el fondo del tanque aumentando la confiabilidad del diseño y la fabricación, adicionalmente la selección y diseño de un fondo interior de forma traslapada absorberá deformaciones sufridas a causa del fluido a almacenar.

La selección de un techo fijo tipo domo tipo sombrilla es mucho más cómodo de fabricar que un techo fijo cónico, aunque no cuenten con una junta frangible, aplicarlo a tanques con fluidos no volátiles resulta una buena decisión.

La implementación de un ángulo superior se planea con el fin de soportar el techo del tanque, pero su función anexa de rigidizar el tanque genera un alto nivel de confiabilidad para contrarrestar fuerzas externas.

La viga de refuerzo fue diseñada con espesores de lámina nominales sin tener en cuenta la tolerancia a la corrosión, indirectamente se garantiza la estabilidad del tanque aun después de más de 20 años de servicio. (teniendo en cuenta la estimación de la tasa de corrosión seleccionada)

Para una correcta selección de esquemas de recubrimiento es necesario contar con el asesoramiento de personal experto con el fin de suplir las necesidades del tanque sin incurrir en sobrecostos y en la utilización de materiales que en realidad no sean necesarios.

Diseñar y construir tanques en zonas donde no se presentan eventos climatológicos extremos tales como huracanes, nevadas, tornados entre otros, si no hay variables que modifiquen de forma critica el estado estacionario del tanque conlleva una premisa de auto anclaje eficiente.

La corrosión puede prevenirse mediante diferentes métodos dependiendo sobre todo del tipo de material a proteger y el medio en el que se encuentra. Se pueden utilizar recubrimientos físicos tales como pintura o protección electroquímica tal como corriente impresa o ánodos de sacrificio.

En el funcionamiento de tanques sometidos a entornos y sustancias oxidantes son particularmente útiles los métodos electroquímicos, aunque ello no excluye la utilización simultanea de un esquema de recubrimiento.

BIBLIOGRAFÍA

API 575 Inspection Practices for Atmospheric and Low/Pressure Storage Tanks, (2014).

API 651 Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks, Pub. L. No. RP 651, Api Recommended Practice (2014).

API 2350. Overfill Prevention for Storage Tanks in Petroleum Facilities, (2020).

API 650 Welded Tanks for Oil Storage, API (2020). https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.650.2007.pdf

American Petroleum Institute. (2023). *API*. https://www.api.org/about

American Welding society. (1969). *Welding Handbook*.

Aranda Burckhardt, P. A. (2011). *Diseño De Tanques De Acero Soldado Almacenamiento De Hidrocarburos* [UNIVERSIDAD RICARDO PALMA]. http://repositorio.urp.edu.pe/handle/urp/549

Section IX. Welding, brazing, and Fusing Qualifications, Pub. L. No. ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code (2023). https://doi.org/10.1017/cbo9780511978371.011

Asociación Colombiana del Petróleo. (2019). Informe de Gestión Social. *Asociación Colombiana Del Petróleo*. https://acp.com.co/web2017/es/publicaciones-e-informes/informe-social/689-informe-de-gestion-social-acp-2017-2018/file

Bahadori, A. (2014). *Cathodic Corrosion Protection Systems: A Guide for Oil and Gas Industries*.

Corpoamazonia. (2012). *SOLICITUD DE TRAMITE DE PERMISO DE EMISIONES ATMOSFERICAS FUENTES FIJAS, PARA EL PROYECTO DE EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE PETRÓLEO EN EL CAMPO MOQUETÁ, LOCALIZADO EN LA VEREDA LAS PALMERAS, JURISDICCIÓN DEL MUNICIPIO DE MOCOA, DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO.* http://www.corpoamazonia.gov.co/

Formacion Industrial. (2020). *¿Qué es la protección catódica?* https://formacion-industrial.com/2020/12/31/que-es-la-proteccion-catodica/

Groysman, A. (2014). Corrosion in systems for storage and transportation of petroleum products and biofuels: Identification, monitoring and solutions. In A. of E. and A. in Israel (Ed.), *Nucl. Phys.* (Issue 1). Springer Netherlands. https://doi.org/978-94-007-7884-9

Haléco Iberia. (2022). *Tanques de almacenamiento: tipos, materiales y usos.* https://www.haleco.es/tanques-almacenamiento-tipos-materiales-usos/

HEMPEL. (2018). *¿Cómo seleccionar el sistema de pintura adecuado?*

Ismael, C. F. R., & Patricio, N. A. W. (2011). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN TANQUE DE TECHO FIJO PARA ALMACENAR PETROLEO DE 3.000 BLS DE CAPACIDAD EN LA PLATAFORMA DEL POZO SACHA 192, UBICADA EN LA PROVINCIA DE ORELLANA"*. Universidad politécnica salesiana.

Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective

paint systems. Part 5:Protective paint systems, (2018).
L.L. Shreir, R. A. J. & G. T. B. (1994a). CORROSION Metal/ Environment Reactions. In *John Wiley & Sons Inc: Vol. vol.1*.
L.L. Shreir, R. A. J. & G. T. B. (1994b). Corrosion Metal/Environment Reactions. In *John Wiley & Sons Inc: Vol. vol.1* (Third edit). BUTTERWORTH HEINEMANN.
La Republica. (2020). Demanda mundial de crudo no se recuperará de inmediato por vacunas hasta entrado 2021. *Demanda Mundial de Crudo No Se Recuperará de Inmediato Por Vacunas Hasta Entrado 2021*. https://www.larepublica.co/globoeconomia/demanda-mundial-de-crudo-no-se-recuperara-de-inmediato-por-vacunas-hasta-entrado-2021-3088261
Laindustriasite. (2017). *¡CONOCE LOS 4 TIPOS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS QUE EXISTE EN LA INDUSTRIA! | La industria del lugar*. https://laindustriasite.wordpress.com/2017/01/10/conoce-los-4-tipos-de-tanques-de-almacenamiento-de-hidrocarburos-que-existe-en-la-industria/
Pejerrey, G. (2017). *Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento atmosférico de 60,000 barriles para almacenaje de gasolina de 90 octanos en la selva* [Universidad Tecnologica del Perú]. http://repositorio.utp.edu.pe/handle/UTP/912
Plameresa. (2015). *Tanques cilíndricos, una herramienta para almacenar más que agua*. https://www.plaremesa.net/tanques-cilindricos-una-herramienta-para-almacenar/
Puertos & Logistica. (2016). *Almacenamiento de petróleo: una tarea de gran cuidado.* https://puertosylogistica.com/almacenamiento-de-petroleo-una-tarea-de-gran-cuidado/
Quispe Quispe, N. U., & Aguilar Tejeda, A. E. (2019). *Diseño de un tanque de almacenamiento de petróleo de 10 000 galones según norma API 650 y su análisis empleando un programa CAD/CAE*. Universidad Tecnologica de Perú.
Roylance, D. (1999). *Recipientes a presion*. https://ocw.mit.edu/courses/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/
Sánchez, G., & Hugo, V. (2015). *Diseño y cálculo de un tanque para almacenamiento de petróleo para 3000 BBLS.* Escuela Superior Politecnica de Chimborazo.
Sika Colombia SAS. (2015). *Manual de recubrimientos para metal*. SIKA COLOMBIA S.A.S. web:col.sika.com
Sismica Institute. (2022). *Diseno y construccion-de-tanques y silos*. https://sismica-institute.com/formacion/curso-en-diseno-y-construccion-de-tanques-y-silos/?fbclid=IwAR23F_hxUNqNIXKOVb14vQSwvuEwxxaw4g87cn6dhK9AWxp0uryfA2zwJGs
Tarsco. (2010). *Esferas (ASME) | Tanques Esféricos*.

https://tfwarren.com/sp/tarsco-sp/productos/esferas-almacenamiento-asme

Valora Analitik. (2021). *Guía de producción de Gran Tierra Energy para 2021*. Www.Globenewswire.Com. https://www.valoraanalitik.com/2021/04/12/esta-es-la-guia-de-produccion-de-gran-tierra-energy-para-2021/

Anexos

Anexo A

DATA SHEET

Anexo B

ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA
WPS

Anexo C

REPORTE DE SIMULACION
ANSYS 2023 R2

Anexo D

PLANOS

Anexo E

LISTA DE MATERIALES