



UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
DEL PERÚ

Facultad de Ingeniería Industrial y Mecánica

Trabajo de Investigación

“Diseño de un tanque de almacenamiento de petróleo de 10 000 galones mediante el uso del método de elementos finitos (MEF)”

Autor(es): Quispe Quispe, Nelson Ulises 1521312

Aguilar Tejeda, Anthoni Emerson 1421698

Para obtener el Grado de Bachiller en:

Ingeniería Mecánica

Lima 12 de junio de 2019

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se tiene por objetivo el diseño de un tanque de almacenamiento de petróleo (diésel) de tipo atmosférico y de posición vertical de 10 000 galones mediante el uso del método de elementos finitos. Donde la metodología que se empleo es de tipo tecnológico, para lo cual se realizó el diseño y cálculo del tanque de almacenamiento bajo la norma API 650 edición 2016, determinando los materiales, dimensiones de la base, cuerpo, techo, y accesorios para el tanque; además, todo ello sustentado bajo las normas ASTM y AWS. Del mismo modo, en primera instancia se modelo con las dimensiones calculadas utilizando el software Autodesk Inventor 2019; y finalmente, fue analizado por medio del método de elementos finitos (FEM), en el software ANSYS 18.0 (static structural), donde se usó para la simulación en la base y la envolvente del tanque, en el desarrollo el mallado tuvo una calidad de 0.36, en la cual se caracterizó el tanque a condición de prueba hidrostática a una altura de 5.2 m y temperatura de 93 °C, dando como resultado una deformación máxima de 0.23 mm y un esfuerzo de von misses máximo de 14.91 MPa. Concluyendo que el diseño del tanque de almacenamiento es óptimo para su fabricación, ya que, los valores están por debajo de los parámetros establecidos en el diseño.

DEDICATORIA 1

Este trabajo está dedicado a mis Padres, por sus grandes consejos, y asimismo a mis hermanos, familiares y amigos por el apoyo incondicional.

DEDICATORIA 2

Este trabajo está dedicado a mis familiares, las cuales me han guiado y aconsejado en mi desarrollo como estudiante.

AGRADECIMIENTO 1

Agradezco a Dios y a mis docentes de la Universidad Tecnológica del Perú, por transmitirme todos sus conocimientos y apoyo incondicional en el desarrollo del trabajo.

AGRADECIMIENTO 2

Agradezco a mis padres, por su sacrificio y esfuerzo por darme una carrera y por creer en mi capacidad, y sobre todo por brindarme su comprensión y cariño.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	xiii
CAPÍTULO 1:.....	1
ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
CAPÍTULO 2:.....	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1. Definición de tanques de almacenamiento.....	4
2.2. Tipos de tanques de almacenamiento.....	4
2.3. Tanques atmosféricos.....	4
2.3.1. Tanque de almacenamiento de techo fijo.....	5
2.3.2. Tanque de almacenamiento de techo flotante.....	6
2.4. Tanques a presión.	7
2.4.1. Tanques de almacenamiento cilíndrico horizontal.....	7
2.4.2. Tanque de almacenamiento cilíndrico vertical con fondo plano.....	8
2.4.3. Tanque de almacenamiento esférico.	9
2.5. Otros tipos.	9
2.5.1. Tanque de almacenamiento empernado.....	9
2.6. Accesorios de tanques.....	10
2.7. Normatividad.....	11
2.7.1. Códigos aplicables.....	11
2.7.2. Normas del instituto americano del petróleo.	11
2.7.3. Otras normas aplicables.	12

2.7.4. Norma A.S.T.M.	13
2.7.5. Norma A.W.S.	14
2.7.6. Norma API 650.	15
2.8. Soldadura en tanques de almacenamiento.	16
2.9. Juntas típicas.	17
2.9.1. Juntas verticales del cuerpo.	17
2.9.2. Juntas horizontales del cuerpo.	18
2.9.3. Juntas traslapadas del fondo.	19
2.9.4. Juntas a tope del fondo.	19
2.9.5. Soldadura de filete de la junta cuerpo-fondo.	20
2.9.6. Juntas de techo y ángulo superior.	21
2.10. Método de elementos finitos (MEF).	22
2.10.1. Aplicación del método de elementos finitos (MEF).	22
2.10.2. Mallado.	23
2.10.3. Tipos de mallados.	25
2.10.4. Pasos de simulación.	27
CAPÍTULO 3:.....	30
METODOLOGÍA DE LA SOLUCIÓN	30
3.1. Condiciones de diseño.	30
3.2. Selección de los materiales para el diseño del tanque.	30
3.2.1. Planchas.	30
3.2.2. Perfiles estructurales.	32
3.2.3. Tuberías y accesorios forjados.	32

3.2.4. Bridas y pernos.	33
3.3. Diseño del tanque de almacenamiento.	33
3.3.1. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.	33
3.3.2. Cálculo del volumen del tanque.	35
3.3.3. Cálculo del nivel de llenado del tanque.	36
3.3.4. Cálculo de la altura efectiva del líquido a ser almacenado.	36
3.4. Datos generales y condiciones para el cálculo.	37
3.5. Cálculo del cuerpo del tanque.	38
3.5.1. Cálculo del cuerpo del tanque por el método de un pie.	38
3.5.2. Cálculo de la disposición de los anillos del cuerpo.	43
3.5.3. Cálculo de las dimensiones de las planchas usadas en el cuerpo.	43
3.6. Cálculo del fondo del tanque.	44
3.7. Cálculo de la unión cuerpo - fondo.	45
3.8. Cálculo del techo del tanque.	45
3.8.1. Cálculo del espesor mínimo de diseño del techo del tanque.	46
3.8.2. Cálculo del ángulo de corte para el techo cónico.	49
3.9. Cálculo del anillo superior o ángulo de tope.	50
3.10. Cálculo del peso del tanque.	51
3.11. Selección del tipo de junta empleado en la soldadura del tanque.	53
3.11.1. Soldadura en juntas verticales.	53
3.11.2. Soldadura en juntas horizontales.	53
3.11.3. Soldadura en juntas traslapadas.	54
3.12. Selección de accesorios para el tanque.	54

3.12.1. Condiciones de las aberturas en el cuerpo del tanque.	54
3.13. Manhole del cuerpo.	56
3.13.1. Dimensionamiento del manhole del cuerpo.....	58
3.14. Boquillas - bridas en el cuerpo.	59
3.14.1. Soldadura de boquillas – bridas.	60
3.14.2. Dimensionamiento de boquillas - bridas en el cuerpo.	60
3.15. Boquillas - bridas en el techo.	65
3.15.1. Dimensionamiento de boquillas - bridas en el techo.....	66
3.16. Acceso de limpieza tipo lápida o compuerta de sedimentos.....	67
3.16.1 Dimensionamiento del acceso de limpieza de sedimentos.....	68
3.17. Cálculo de cargas de viento en el tanque (estabilidad al volcamiento).	70
3.17.1. Presión de viento.	70
3.17.2. Tanques no anclados.....	71
3.17.3. Cálculo del momento de estabilidad al volcamiento.	72
CAPÍTULO 4:.....	79
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	79
4.1. Modelado de cuerpo y base de tanque.	79
4.2. Simulación de cuerpo y base de tanque.	80
4.2.1. Material.....	80
4.2.2. Mallado.	81
4.2.3. Condiciones de frontera.	82
4.3. Análisis de la simulación.	84
4.3.1. Deformación total.....	84

4.3.2. Estrés equivalente (von - mises)	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
GLOSARIO	88
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: tanque atmosferico de techo fijo [9]	5
Figura 2: Tanque atmosferico de techo flotante [9]	6
Figura 3: Tanque cilíndrico horizontal [9]	8
Figura 4: Tanque cilíndrico vertical con fondo plano [12]	8
Figura 5: Tanque esférico [9]	9
Figura 6: Tanque de almacenamiento empernado [9]	10
Figura 7: Espesor máximo según su especificación de cada material [12]	14
Figura 8: Clasificación de Electrodo [4]	15
Figura 9: Juntas verticales del cuerpo [6]	17
Figura 10: Juntas horizontales del cuerpo [13]	18
Figura 11: Juntas tralapadas del fondo [6]	19
Figura 12: Juntas a tope del fondo [6]	20
Figura 13: Soldadura de filete de la junta cuerpo - fondo [6]	20
Figura 14: Juntas de techo y angulo superior [6]	21
Figura 15: Cordenadas, desplazamiento y esfuerzos nodales [15]	23
Figura 16: Mallado [15]	24
Figura 17: Mallado tridimensional [4]	24
Figura 18: Malla estructura y no estructural [15]	25
Figura 19: Mallado triangular estructural y no estructural [15]	25
Figura 20: Malla mixta [15]	26
Figura 21: Malla tetraedrica [15]	26
Figura 22: Malla hexaedrica [16]	27
Figura 23: Niveles de Llenado de Tanque - Norma API 650 [18]	36
Figura 24: Esquema del Angulo de Corte del Techo Cónico [18]	49
Figura 25: Angular de coronación alrededor de la parte superior de la envolvente – Detalle A [18]	51

Figura 26: Soldaduras en junta vertical a tope [18]	53
Figura 27: Soldadura en junta horizontal a tope [18]	54
Figura 28: soldadura con junta plana de filete Traslapada [18]	54
Figura 29: Descripción y geometría de aberturas en el cuerpo del tanque [18]	55
Figura 30: Manhole del Cuerpo [18]	56
Figura 31: Unión del cuello manhole-cuerpo del tanque [18]	57
Figura 32: Refuerzo de boquillas y bridas del cuerpo [18]	60
Figura 33: Soldadura brida-boquilla [18]	60
Figura 34: Boquillas-Bridas para Techo sin placa de refuerzo [18]	66
Figura 35: Accesorio de limpieza a nivel (lápida) [18]	68
Figura 36: Esquemas de cargas de viento en el tanque [18]	71
Figura 37: Geometria de la simulacion [Elaboración propia]	80
Figura 38: Mallado del diseño de simulación [Elaboración propia]	82
Figura 39: selección de caras para la presión hidrostática [Elaboración propia]	83
Figura 40: Superficie de soporte [Elaboración propia]	83
Figura 41: Deformacion total del tanque [Elaboración propia]	84
Figura 42: estrés equivalente (von - misses) [Elaboración propia]	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Tamaños típicos correspondientes a capacidades nominales (m ³) para tanques hechos con planchas de 1800 mm (SI) [18]	34
Tabla 2: Espesor de placa para tamaños típicos de tanques con anillos de 1800 mm de alto [18]	34
Tabla 3: Espesor Mínimo para Planchas de Tanques [18]	38
Tabla 4: Esfuerzo admisible de las planchas de acero según el tipo de acero [18]	40
Tabla 5: Espesores del cuerpo. [Elaboración propia]	42
Tabla 6: Espesores Mínimos del Fondo del Tanque [18]	44
Tabla 7: Tamaño mínimo de la soldadura de filete [18]	45
Tabla 8: Ángulos para rigidizar el tanque [18]	50
Tabla 9: Mínimas distancias de separación de las principales aberturas del cuerpo [18] ..	55
Tabla 10: Espesor de la placa de la tapa t_c y de la brida empernada t_f [18]	58
Tabla 11: Espesor del cuello del manhole del cuerpo t_{nc} [18]	59
Tabla 12: Dimensiones del diámetro circular de los pernos D_b y diámetro de la cubierta de la placa D_c del cuerpo del manhole [18]	59
Tabla 13: Dimensiones de las boquillas del cuerpo [18]	61
Tabla 14: Dimensiones de las boquillas del cuerpo: tubería, placas y tamaño del filete de soldadura [18]	63
Tabla 15: Dimensiones para boquillas - bridas [18]	64
Tabla 16: Dimensiones para boquillas-bridas del techo [18]	66
Tabla 17: Dimensiones para el acceso de limpieza [18]	68
Tabla 18: Espesores de la placa de cubierta, pernos y reforzamiento del fondo para el acceso de limpieza [18]	69
Tabla 19: Espesores y alturas de placas de refuerzo del cuerpo para accesorios de limpieza [18]	69
Tabla 20: Características del material ASTM A131/A [Elaboración propia]	80

Tabla 21: Forma y tamaño de mallado [Elaboración propia]	81
Tabla 22: características del mallado [Elaboración propia]	81
Tabla 23: valores para la condición de frontera [elaboración propia].....	82
Tabla 24: Maxima y minima deformacion total [Elaboración propia].....	84
Tabla 25: valores máximos y mínimos de von-mises [Elaboración propia].....	85

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial ha logrado el incremento exponencial del parque automotor y las instalaciones industriales en el Perú, que en gran medida son aún dependientes del petróleo (diésel), donde en la actualidad generan un consumo significativo para el funcionamiento de sus equipos.

Según reportes presentados por Osinergmin, entre los principales combustibles de mayor de venta, en el periodo de enero a abril de 2017, correspondió al diésel representando el 53% del total [1]. Siendo de gran importancia en la industria petrolera y petroquímica.

Por consiguiente, el almacenamiento de este hidrocarburo se lleva a cabo en diferentes tipos de tanques, siendo de mayor uso los tanques atmosféricos. Por otro lado, en el Perú, el derrame de petróleo es una problemática que está presente desde el año 1978, ocasionado sobre todo por el escaso control que realizan las autoridades peruanas. Por ello es de interés social, ya que el mercado demanda que el diseño de tanques de almacenamiento de petróleo (diésel) utilice tecnologías avanzadas para que sea eficiente y seguro en condiciones de trabajo, de tal forma que se puede reducir la contaminación al medio ambiente evitando la fuga de gases inflamables y a su vez accidentes graves como derrames que pueden ocasionar la contaminación del suelo, ocasionando que se realice procesos costosos para mitigar esta problemática.

Por lo tanto, el presente trabajo de investigación tiene por objetivo el diseño de un tanque de almacenamiento de petróleo (diésel) de 10 000 galones mediante el uso del método de elementos finitos. Donde la metodología que se empleara será de tipo tecnológico, ya que se realizara el diseño y cálculo del tanque de almacenamiento bajo la norma API 650, del mismo modo, esta será evaluada por medio del método de elementos finitos, en el cual se

pretende caracterizar las condiciones de prueba hidrostática del tanque, con el fin de verificar el comportamiento mecánico; todo ello, sustentado bajo fuentes bibliográficas altamente calificados.

Por otro lado, no se desarrollará la construcción, montaje y pruebas del tanque de almacenamiento; Asimismo, no se empleará la norma técnica peruana (NTP), debido que no contempla aspectos de diseño, sino que solo da lineamientos para la construcción, operación y mantenimiento de instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos.

Cabe resaltar que el presente trabajo está dividido en los siguientes capítulos:

En el capítulo 1 del trabajo, se encontrará los antecedentes y necesidades del diseño; además, de los objetivos para desarrollar la investigación.

En el capítulo 2, se aborda los aspectos teóricos con relación a la investigación detallándose los tipos de tanques de almacenamiento, normativas aplicables para la elección del material y tipo de soldadura, así como teoría para la aplicación del método de elementos finitos para la simulación en condición de prueba hidrostática.

En el capítulo 3, se desarrolla la metodología de solución a través de la elección del material y los cálculos de diseño según la norma API 650 – sección 4 y 5.

En el capítulo 4, se aborda el análisis de resultados y discusión, a través de las simulaciones en condición de prueba hidrostática.

Finalmente se realizará las conclusiones y recomendaciones; además, se adjuntarán las tablas y planos del trabajo de investigación.

Objetivo general.

- Diseñar un tanque de almacenamiento de petróleo de 10 000 galones mediante el uso del método de elementos finitos (MEF).

Objetivos específicos.

- Realizar el diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento de petróleo de 10 000 galones según la norma API 650.
- Analizar mediante la simulación de un programa de método de elementos finitos los esfuerzos y deformaciones en condición de prueba hidrostática.
- Determinar la relación entre el análisis por el método de elementos finitos y el diseño de un tanque de almacenamiento según norma API 650.

CAPÍTULO 1:

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los tanques de almacenamiento son muy utilizados en la industria petrolera y petroquímica; por lo que, en la actualidad, el mercado demanda que el diseño de tanques sea capaz de almacenar los fluidos de manera segura y eficiente.

Para el diseño de un tanque de almacenamiento de petróleo es muy importante determinar y conocer la presión del fluido que se almacena en el tanque, independiente de su forma y dimensiones, por ello es fundamental definir la presión de operación y la presión de diseño, donde los tanques horizontales se utilizan para almacenar volúmenes bajos debido a que presentan fallas por corte y flexión, mientras que los tanques verticales permiten almacenar grandes volúmenes [2]. Por ello es importante conocer la presión de operación ya que ayudara en la elección del tipo de tanque que se empleara en el diseño.

Asimismo, la norma API 650 cubre el diseño y cálculo de los elementos constitutivos de un tanque de almacenamiento, apoyándose para la elección del material bajo la norma ASTM, y se recurre al código ASME para especificar la soldadura de acuerdo a clasificación de la junta [3]. Esta norma sirve como guía para el diseño, debido a que se respalda bajo normas altamente calificados.

Por otra parte, un estudio realizado sobre la estructura de tanques, mediante la simulación de un programa CAD/CAE, permitió evidenciar que los cordones de soldadura longitudinal no presentan esfuerzos de gran magnitud, concluyendo que no hay zonas críticas donde se puedan presentar fallas en la unión soldada [4]. por esta razón el uso del método de elementos finitos no pretende reemplazar la prueba hidrostática, pero el método sirve de herramienta que permite evaluar posibles fallas para complementar el diseño.

Igualmente, varios autores, realizaron un estudio de diseño de tanques de almacenamiento, determinando que es preciso el volumen con el que se dimensione el tanque sea superior; además, mediante la realización de la prueba hidrostática, comprobaron que el tanque de almacenamiento es totalmente estanco y capaz de soportar la presión interna generada por el combustible almacenado sin sufrir alguna deformación [5]. Por ello es recomendable que el volumen de diseño sea superior al volumen de trabajo, para garantizar que no se presenten fallas en el servicio.

Varias investigaciones, sostienen que los estudios de tanques de almacenamiento de petróleo según norma API 650, en su mayoría están dirigidos a tanques verticales de grandes dimensiones, si bien esta norma cubre muchos aspectos, no todos están contemplados, razón por la que existe el apéndice A para el dimensionamiento para tanques pequeños; además, existen otra norma complementaria a la misma, como la norma API especificación 12F la cual cubre para tanques horizontales y verticales soldados en taller, para capacidades entre 13.5 y 75 m³ [6]. Por lo que ambas normas pueden servir de base para realizar el diseño, ya que el volumen que se necesita está contemplado por estas normas.

Asimismo, en una investigación, sostienen que el análisis por el método de elementos finitos (FEM) proporciona una ruta rápida y confiable para predecir los efectos de la carga sobre la deformación, determinando que la estructura sólida tiene la tensión máxima en las placas planas laterales [7]. Es importante el estudio del método de elementos finitos ya que permite encontrar fallas en los tanques de almacenamiento.

Además, varios autores al analizar la simulación de fallas de los tanques horizontales frente a solicitaciones de presión hidrostática combinada con vacío interior por operaciones de descarga, concluyeron que la acción de vacío induce a la estructura a un modo de falla con deformaciones en el cuerpo hacia el interior del mismo [8]. La simulación de fallas permite obtener una solución numérica aproximada del problema que puedan presentar los tanques de almacenamiento.

Del mismo modo, en una simulación realizada de un tanque en SAP 2000 según la norma API 650, se demostró que los esfuerzos no exceden el punto de fluencia del material después de soportar cargas hidrostáticas, sismo y viento, dando validez al cálculo realizado [9]. Por ese motivo la norma API 650, permite que el diseño sea confiable y seguro, debido a que no presenta fallas en las simulaciones realizadas.

En un estudio, se investigó la presión de falla de los tanques de acero soldados con API 12F, donde estos fallaron en la junta superior antes de que se produjeran rendimientos en la junta inferior. Adicionalmente, la presión obtenida del análisis por el método de elementos finitos siempre fue mayor que la presión calculada [10]. Esto permite tener más cuidado a la hora de definir el tipo de junta en la parte superior e inferior del tanque.

Del mismo modo, un estudio realizado del pandeo de tanques, reportó que los niveles de estrés y levantamiento de los tanques, proporciona información sobre el comportamiento de los tanques API 12F expuestos a mayor presión interna y presión de vacío [11]. Este estudio permite evaluar las posibles fallas que puedan presentar los tanques mediante el análisis del esfuerzo de von mises y deformaciones totales.

De todo ello se puede llegar a la conclusión que el uso de la norma API 650 como requisito de diseño es una herramienta fundamental para garantizar la efectividad de este; además, el uso del método de elementos finitos constituye un instrumento que sirve para complementar el diseño, ya que permite analizar las fallas en condición de prueba hidrostática.

CAPÍTULO 2:

MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de tanques de almacenamiento.

Los tanques de almacenamiento son estructuras de diversos materiales, por lo general de forma cilíndrica, que son usadas para preservar líquidos o gases a presión ambiente [12]. por lo que, en ciertos medios técnicos, se les da el calificativo de tanques de almacenamiento atmosféricos, su uso más aplicado es en refinerías.

2.2. Tipos de tanques de almacenamiento.

Los tanques de almacenamiento se usan como depósitos para contener una reserva suficiente de algún producto para su uso posterior y/o comercialización. Los tanques de almacenamiento, se clasifican en:

- Tanques atmosféricos.
- Tanques a presión.
- Otros tipos.

2.3. Tanques atmosféricos.

Los tanques de almacenamiento a presión atmosférica, son utilizados en plantas de proceso que forman parte de refinerías de petróleo o instalaciones petroleras; en cada uno de estos puntos se almacenan diferentes tipos de hidrocarburos tales como petróleo, productos intermedios como agua de producción o productos terminados como gasolina, diésel, fuel-oíl [13]. Por este motivo no solo un tipo de tanque es apropiado para el almacenamiento de los diferentes productos; donde, los tanques de techo fijo, son principalmente usados para productos poco volátiles tales como petróleo; mientras que los tanques de techo flotante, tienen un techo no soportado el cual flota sobre el fluido

almacenado, para mantener un volumen y presión constante sobre la superficie del producto.

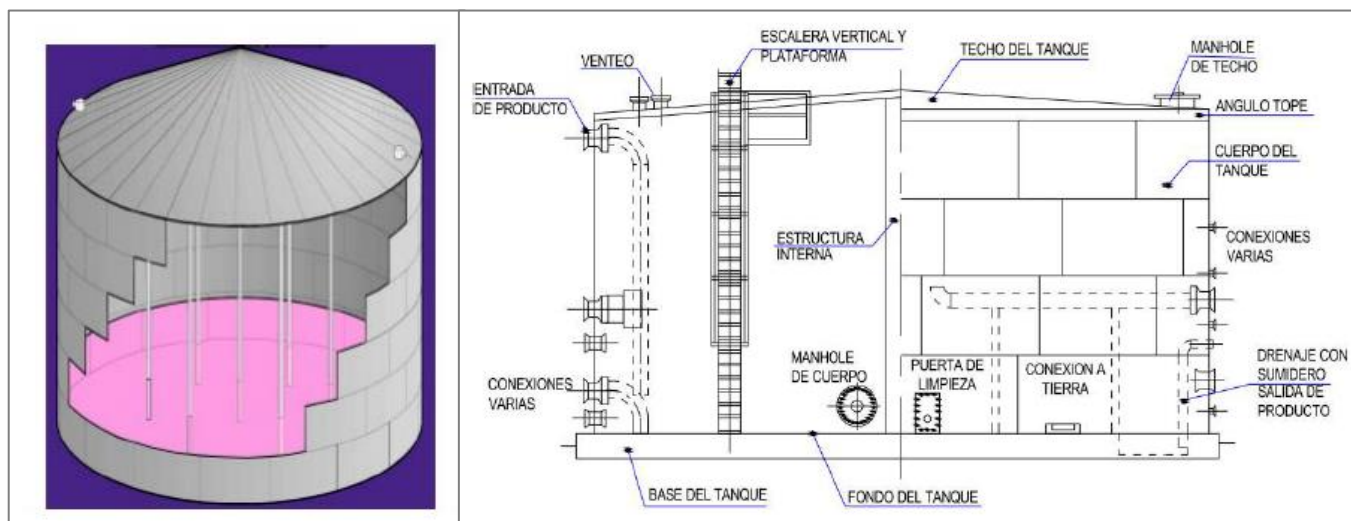
2.3.1. Tanque de almacenamiento de techo fijo.

Los tanques de techo fijo se diseñan específicamente para presiones internas bajas. Se emplean para contener productos no volátiles (no inflamables), como el agua, diésel, asfalto, petróleo crudo [9]. Debido a que, al disminuir la columna del fluido, se va generando una cámara de aire que facilita la evaporación del fluido, lo que es altamente peligroso; asimismo, la superficie del techo puede tener forma de domo o cono. Los techos fijos se clasifican en:

- a) **Techos auto soportados:** Estos no requieren estructuras internas ya que su diseño toma en cuenta el espesor de la placa de techo y el ángulo formado entre la horizontal con el techo, el diámetro debe ser menor a 15 m.
- b) **Techos soportados con estructura:** Estos si requieren de una estructura interna debido a su pendiente y su diámetro, su diámetro debe ser mayor a 15 m.

En la figura 1, se puede apreciar el tanque atmosférico de techo fijo.

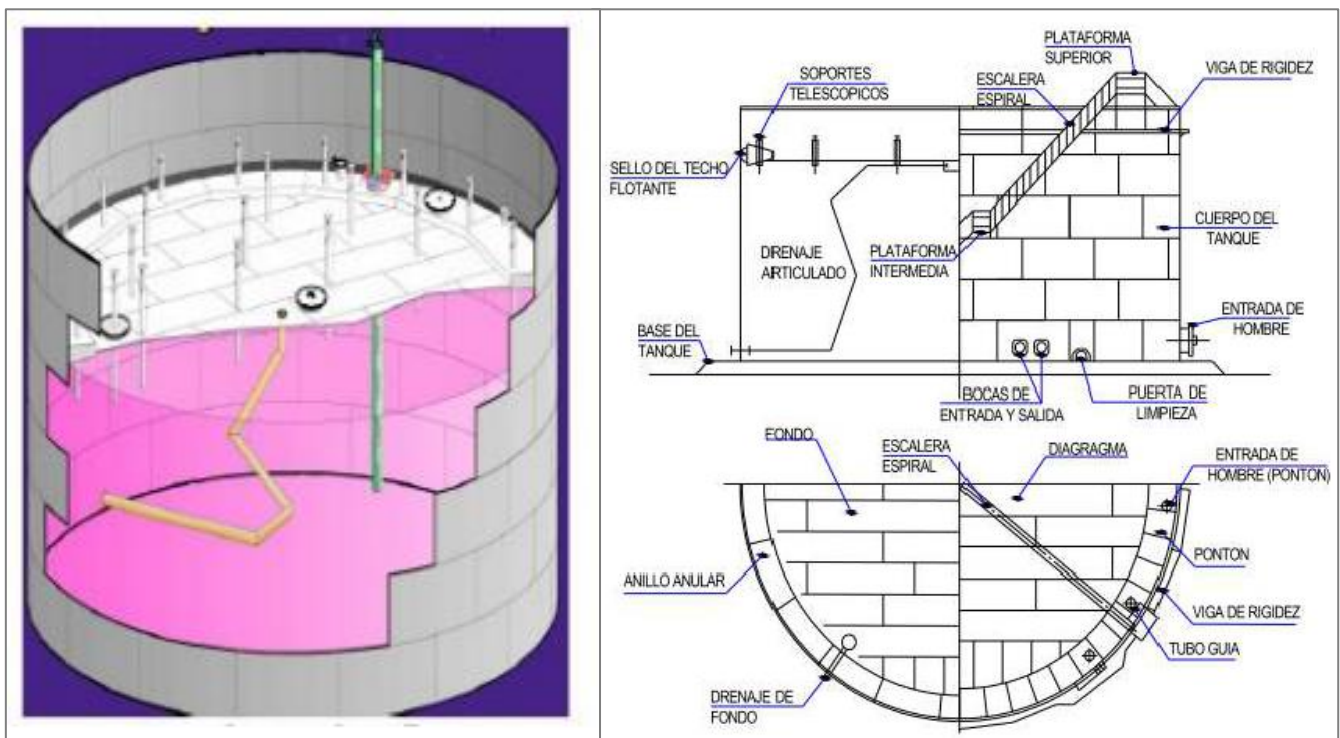
Figura 1: tanque atmosferico de techo fijo [9]



2.3.2. Tanque de almacenamiento de techo flotante.

Se emplea para almacenar productos altamente volátiles como el alcohol, gasolinas y combustibles en general. Este tipo de techo fue desarrollado para reducir o anular la cámara de aire, o espacio libre entre el espejo del líquido y el techo, además de proporcionar un medio aislante para la superficie del líquido [14]. Asimismo, reduce la velocidad de transferencia de calor al producto almacenado durante los periodos en que la temperatura ambiental es alta, evitando así la formación de gases (su evaporación), y consecuentemente, la contaminación del ambiente y, al mismo tiempo se reducen los riesgos al almacenar productos inflamables. Existen tres tipos básicos de techos flotantes. En la figura 2, se puede apreciar el tanque atmosférico de techo flotante.

Figura 2: Tanque atmosférico de techo flotante [9]



- a) **Techo flotante tipo bandeja:** Este tipo de tanque de techo flotante, ya no se usa a pesar de su bajo costo, debido a que presenta fallas por su baja estabilidad sobre todo en zonas de alta precipitación.

- b) Techo flotante tipo pontón:** Este tipo de techo se utiliza para diámetros entre 18 y 90 metros, es más estable y reduce la posibilidad de evaporación por debajo de la cubierta. El sistema de flotación consiste en pontones anulares cuyo número varía según el diámetro y una cubierta simple en el centro; la cámara de aire del pontón además de proporcionar flotación se convierte en un medio aislante [13]. La gran ventaja de este tipo de techo es que los vapores que se atrapan bajo el centro de la cubierta forman una capa aislante hasta que se condensan.
- c) Techo flotante tipo de cubierta doble:** Es el diseño más avanzado, más seguro, pero más costoso, por esta razón se usa generalmente en diámetros mayores a 90 m [12]. Bajo este diseño se elimina prácticamente cualquier posibilidad de evaporación debido a la doble cubierta. La cual está diseñado para mantenerse a flote a pesar de tener los pontones inundados, esto gracias a la cámara de aire que se forma entre las cubiertas, adicionalmente esta cámara de aire funciona como una capa aislante, que minimiza la evaporación del producto almacenado.

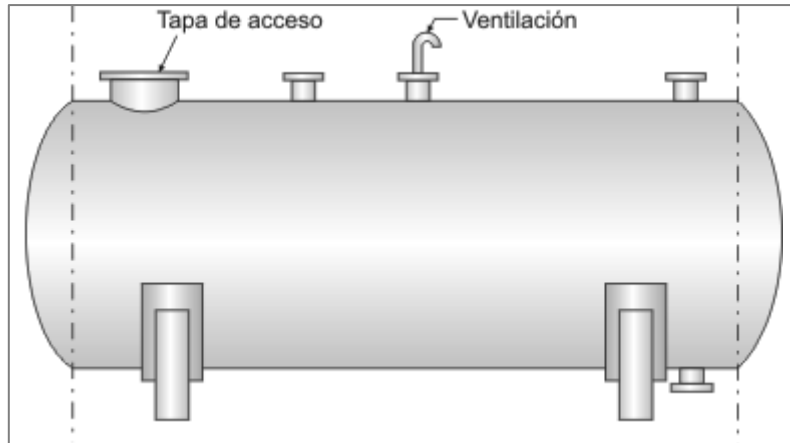
2.4. Tanques a presión.

Se considera como un tanque a presión a cualquier vasija cerrada que sea capaz de almacenar un fluido a presión manométrica, ya sea presión interna o vacío, independientemente de su forma y dimensiones.

2.4.1. Tanques de almacenamiento cilíndrico horizontal.

Los Tanques horizontales poseen un armazón cilíndrico, La presión de trabajo puede ser desde 15 psi a 1000 psi o mayor [9]. La gran mayoría de estos tipos de tanques son de un volumen bajo, debido a que la mayoría de estos presentan averías de corte y flexión. Algunos de esos tanques tienen cabeza plana o hemisférica. En la figura 3, se aprecia el tanque cilíndrico horizontal.

Figura 3: Tanque cilíndrico horizontal [9]



2.4.2. Tanque de almacenamiento cilíndrico vertical con fondo plano.

Los tanques verticales de Fondo Plano permiten almacenar grandes cantidades de volúmenes con un costo económico bajo. Con la limitante que solo se pueden usar a presión atmosférica o presiones internas relativamente pequeñas. En la figura 4, se aprecia el tanque cilíndrico vertical.

Figura 4: Tanque cilíndrico vertical con fondo plano [12]



2.4.3. Tanque de almacenamiento esférico.

Los tanques esféricos son principalmente usados para almacenamiento de productos como propano, butano, GLP. Asimismo, su forma facilita que soporten presiones sobre los 25 psi [9]. Por ello, los tanques esféricos se utilizan generalmente para almacenar grandes volúmenes a altas presiones. En la figura 5, se aprecia el tanque esférico.

Figura 5: Tanque esférico [9]



2.5. Otros tipos.

2.5.1. Tanque de almacenamiento empernado.

Son diseñados y acondicionados como elementos segmentados los cuales son montados en localidades para poder proporcionar un alineamiento vertical, encima del terreno, cierre y apertura de la parte superior de los tanques. Los tanques empernados API estandarizados están disponibles en capacidad nominal de 100 a 10000 barriles, diseñados a presión atmosférica [9]. Estos tanques ofrecen la ventaja de ser fácilmente transportados en cualquier localidad y levantados manualmente, son utilizados para almacenamiento de agua potable o agua contra incendios. Se aprecia la figura 6, el tanque de almacenamiento empernado.

Figura 6: Tanque de almacenamiento empernado [9]



2.6. Accesorios de tanques.

Los principales accesorios que se colocan para una completa y correcta operación de un tanque de almacenamiento son los siguientes:

- **Manhole del cuerpo:** para inspección y acceso del personal.
- **Manhole del techo:** para inspección y acceso del personal.
- **Boquillas de entrada:** accesorio por donde ingresa el fluido a almacenarse.
- **Boquillas de salida:** accesorio por donde sale el fluido de producción
- **Puertas de limpieza a nivel del piso (lápidas):** accesorio por donde se realiza la extracción de sustancias residuales (residuo de petróleo sólido), y cualquier suciedad, escoria, o basura.
- **Sumidero:** accesorio por donde se vaciará, los residuos que no pueden ser desalojados por la descarga, se encuentra en el fondo del tanque.
- **Plataformas y escaleras:** accesorios que permiten subir hasta el techo del tanque para realizar inspecciones.

2.7. Normatividad.

2.7.1. Códigos aplicables.

En la actualidad, el diseño y cálculo de tanques de almacenamiento, se basa en la publicación realizada por el instituto americano del petróleo (API), designándose como "STANDAR A.P.I. 650", para tanques de almacenamiento a presión atmosférica.

Asimismo, la normas API se referencia para fijar los materiales bajo la norma ASTM y ASME. Donde estos estándares cubren el diseño, fabricación, inspección, montaje, ensayos y mantenimiento de los mismos y fueron desarrollados para el almacenaje de productos de la industria petrolera y petroquímica.

2.7.2. Normas del instituto americano del petróleo.

Para el cálculo, diseño y construcción de tanques de almacenamiento de combustible existen varias Normas y Códigos, que regulan y establecen los parámetros que se deben seguir para que cumplan con las especificaciones establecidas, pero las más difundidas y empleadas en las industrias de procesos son:

- **API Standard 620:** Es aplicable a grandes tanques horizontales o verticales soldados en el campo, aéreos que operan a presiones en el espacio vapor menores a 2.5 psi y a temperaturas no superiores a 93°C.
- **API Standard 650:** Es aplicable a grandes tanques horizontales o verticales soldados en el campo, aéreos que operan a presiones en el espacio vapor menores a 1.5 psi y a temperaturas no superiores a 121°C.
- **API Specification 5L:** Es aplicable para el uso adecuado de las tuberías de gas, agua y petróleo tanto en la industria del petróleo como en la de gas natural. Cubre especificaciones sobre tuberías de acero soldado y sin costura, incluyendo las de peso normal, regular y especial y las tuberías de línea roscadas extra resistentes y sin rosca, al igual que las de línea de enchufe y esponja.

- **API Specification 12D:** Es aplicable a tanques horizontales o verticales soldados en el campo para almacenaje de líquidos de producción y con capacidades estandarizadas entre 75 y 1500 m³.
- **API Specification 12F:** Es aplicable a tanques horizontales o verticales soldados en taller para almacenaje de líquidos de producción y con capacidades estandarizadas entre 13.5 y 75 m³.
- **API Standard 653:** Es aplicable a la inspección, reparación, alteración desmontaje y reconstrucción de tanques horizontales o verticales, basándose en las recomendaciones del STD API 650. Recomienda también la aplicación de las técnicas de ensayos no destructivos aplicables.

2.7.3. Otras normas aplicables.

Además de las normas y códigos mencionados anteriormente existen algunas otras que las respaldan, complementan y ayudan cuando se requieren variaciones o cambios mínimos en las consideraciones del diseño. Estas normas son:

- **ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII y X:** Es aplicable para el diseño de diferentes recipientes y tanques tanto cilíndricos, esféricos como de sección rectangular. Se trata de los estándares más reconocidos mundialmente en este campo de aplicación.
- **Código ASME Sección IX:** Se encarga de que los soldadores, operadores y los Procedimientos de soldaduras que se utilizan estén de acuerdo a los requerimientos de las distintas Secciones de ASME Código de Construcción Recipientes de Presión y de ASME B31 Código para Cañerías de Presión.
- **Underwriters Laboratories (UL) Standard UL 142:** Es aplicable a tanques de acero de diferentes diseños soldados en taller para almacenaje de líquidos inflamables y combustibles.

- **British Standard (BS) 2594:** Es aplicable a tanques cilíndricos horizontales de acero al carbono soldados.
- **BS 4994:** Comprende las especificaciones para el diseño y construcción de recipientes y tanques en plásticos reforzados.
- **BS 6374:** comprende las especificaciones para el recubrimiento de recipientes y tanques con materiales poliméricos.
- **ASTM D 3299 / 4021 / 4097:** Comprende las especificaciones para tanques plásticos reforzados con fibra de vidrio.

Las normas, códigos y especificaciones presentadas anteriormente están aprobadas por el ANSI, que es una organización voluntaria compuesta por corporativas, organismos del gobierno y otros miembros que coordinan las actividades relacionadas con estándares en los EEUU.

2.7.4. Norma A.S.T.M.

La A.S.T.M. (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) se encarga de desarrollar los estándares de las características y eficiencia de los materiales, productos, suministros de servicios y métodos de prueba en casi todas las industrias. Sirve para especificar todo lo relacionado con las materias que se deben utilizar como son; tipo de material, espesores mínimos, condiciones de rolado, temperaturas de trabajo, esfuerzos permisibles, etc. A continuación, se aprecia en la figura 7, especificaciones de materiales.

Figura 7: Espesor máximo según su especificación de cada material [12]

ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL	GRADO	MÁXIMO ESPESOR DE PLACA	
		mm	(pulg)
ASTM A 36 / A 36M	-----	40	(1½)
ASTM A 131 / A 131M	A	12,5	(½)
	B	25	(1)
	CS	40	(1½)
	EH 36	45	(1¾)
ASTM A 283 / A 283M	C	25	(1)
ASTM A 285 / A 285M	C	25	(1)
ASTM A 516 / A 516M	55 (380)	40	(1½)
	60 (415)		
	65 (450)		
	70 (485)		
ASTM A 537 / A 537M	1	45	(1¾)
	2		
ASTM A 573 / A 573M	58 (400)	40	(1½)
	65 (450)		
	70 (485)		
ASTM A 633 / A 633M	C	45	(1¾)
	D		
ASTM A 662 / A 662M	B	40	(1½)
	C		
ASTM A 678 / A 678M	A	40	(1½)
	B	45	(1¾)
ASTM A 737 / A 737M	B	40	(1½)
ASTM A 841 / A 841M	A Clase 1	40	(1½)
	B Clase 2		
CSA G40.21	38W (260W)	25	(1)
	44W (300W)	25	(1)
	50W (350W)	45	(1¾)
	38WT (260WT)	40	(1½)
	44WT (300WT)	40	(1½)
	50WT (350WT)	50	(2)
ISO 630	E275 C y D	40	(1½)
	E355 C y D	45	(1¾)

2.7.5. Norma A.W.S.

La Sociedad Americana de Soldadura publica sobre usos y calidad de materiales, productos, pruebas, operaciones y procesos de soldadura, así como las especificaciones para varillas, electrodos y metales de aporte de soldadura. Estas especificaciones cubren la mayor parte de los materiales consumibles empleados en procesos de soldadura.

La designación alfanumérica de la AWS para especificaciones de metales de aporte consta de una letra "A" seguida de un 5, un punto y uno o dos dígitos adicionales, la AWS A5-1 (especificación para electrodos de acero al carbono para soldadura por arco metálico protegido), Para las uniones soldadas del tanque desarrolla por medio de electrodo

revestido, donde se elige uno que cuenta con propiedades tanto mecánicas como químicas similares al material de diseño del tanque. A continuación, En la figura 8, se aprecia la clasificación AWS de electrodos.

Figura 8: Clasificación de Electrodos [4]

Electrode Classification			
AWS Classification	Type of Covering	Welding Position ^a	Type of Current ^b
E6010	High cellulose sodium	F,V,OH,H	dcep
E6011	High cellulose potassium	F,V,OH,H	ac or dcep
E6012	High titania sodium	F,V,OH,H	ac or dcen
E6013	High titania potassium	F,V,OH,H	ac, dcep or dcen
E6019	Iron oxide titania potassium	F,V,OH,H	ac, dcep or dcen
E6020	High iron oxide	{ H-fillets F	ac or dcen ac, dcep or dcen
E6022 ^c	High iron oxide	F,H	ac or dcen
E6027	High iron oxide, iron powder	{ H-fillets F	ac or dcen ac, dcep or dcen
E7014	Iron powder, titania	F,V,OH,H	ac, dcep or dcen
E7015 ^d	Low hydrogen sodium	F,V,OH,H	dcep
E7016 ^d	Low hydrogen potassium	F,V,OH,H	ac or dcep
E7018 ^d	Low hydrogen potassium, iron powder	F,V,OH,H	ac or dcep
E7018M	Low hydrogen iron powder	F,V,OH,H	dcep
E7024 ^d	Iron powder, titania	H-fillets,F	ac, dcep or dcen
E7027	High iron oxide, iron powder	{ H-fillets F	ac or dcen ac, dcep or dcen
E7028 ^d	Low hydrogen potassium, iron powder	H-fillets,F	ac or dcep
E7048 ^d	Low hydrogen potassium, iron powder	F,OH,H,V-down	ac or dcep

2.7.6. Norma API 650.

El estándar API 650 sólo cubre aquellos tanques en los cuales se almacenan fluidos líquidos que están contruidos de acero con el fondo uniformemente soportado por una cama de arena, grava, concreto, asfalto. las cuales deberán ser diseñados para soportar una presión de operación atmosférica o presiones internas que no excedan el peso del techo por unidad de área y una temperatura de operación no mayor de 93°C (200 °F), y que no se usen para servicios de refrigeración [13]. Además, permite determinar el material, diseño, fabricación y montaje de tanques de acero verticales, de techo abierto o cerrado con fondo uniformemente soportado con recomendaciones de procedimientos de soldaduras, pruebas e inspecciones, así como lineamientos para su operación. Los puntos que desarrolla esta norma, se rigen bajo estas condiciones:

- La presión de diseño es aproximadamente la presión atmosférica equivalente a 1 atm, o 101,3 KPa o 14,7 psi, con un alcance de una presión interna de hasta 18 KPa o 2.6 psi.
- La temperatura de operación máxima del tanque es de 93 °C (200 °F). Sin embargo, el Apéndice M provee requerimientos para tanques que operen a una temperatura de diseño mayor a 93 °C, pero que no excedan los 260 °C (500° F).
- El tanque que se diseñará, operará con una presión interna menor a 18 KPa (2.6 psi) y con una temperatura máxima de 93° C. (200 °F), como se indica en el apéndice 1.1.19 del API 650.

2.8. Soldadura en tanques de almacenamiento.

Para la elección de un electrodo, De acuerdo con la Norma API 650 debe hacerse según la resistencia a la tensión mínima del material, establecidos en la última edición del AWS A5.1, Especificación de electrodos para acero al carbono con soldadura al arco metálico protegido; además, ninguna soldadura de ninguna clase debe ser ejecutada cuando las superficies del material que van a ser soldadas están mojadas por la lluvia.

Si la resistencia a la tensión mínima del material a soldar es menor que 80 KSI, se deben usar electrodos para soldadura manual al arco eléctrico de las series E60XX y E70XX.

Además, se puede usar el proceso de soldadura de arco eléctrico sumergido (SMAW), este proceso es manual o automático; en cualquiera de los dos casos, deberán tener penetración completa, eliminando la escoria dejada al aplicar un cordón de soldadura antes de aplicar sobre éste el siguiente cordón.

2.9. Juntas típicas.

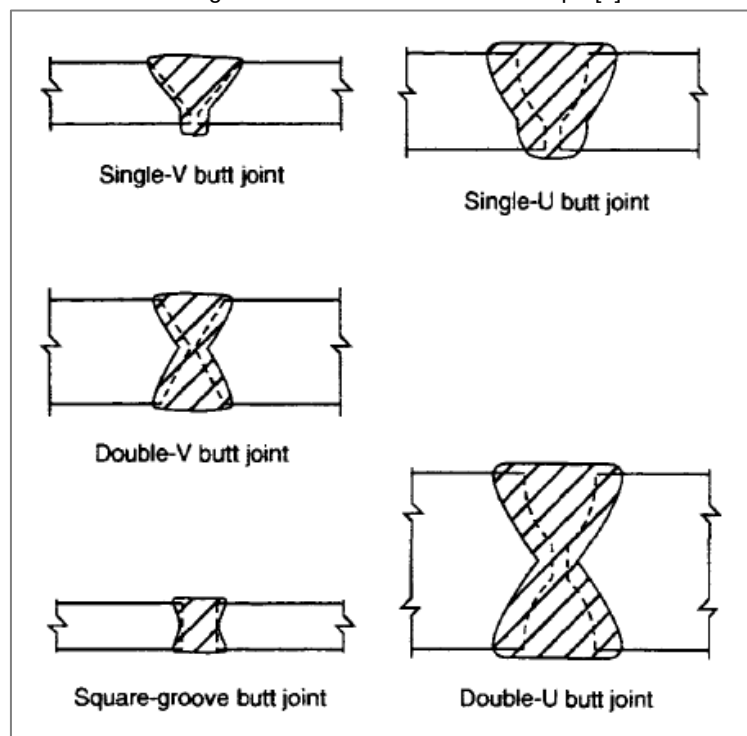
Los tipos de soldaduras usadas comúnmente son las de cara ancha, donde las juntas en “V” y “U” pueden estar en el interior o exterior del cuerpo del tanque, lo cual depende de la facilidad que se tenga para realizar el tipo de soldado. El proceso de soldadura para el tanque debe ser diseñado tomando en cuenta que todos los cordones de soldadura sean horizontales, verticales, y paralelos, para el cuerpo y fondo del tanque, y para el techo, podrá ser circunferencial o radial.

2.9.1. Juntas verticales del cuerpo.

Este tipo de juntas deben ser de penetración y fusión completa, lo cual se podrá lograr con soldadura doble, de tal forma que se obtenga la misma calidad del metal depositado en el interior y el exterior de las partes soldadas, para cumplir con los requisitos del procedimiento para la soldadura, las juntas verticales deben ser paralelas entre sí con una mínima distancia de 5 veces el espesor de la placa.

Las juntas para tanques verticales son las que se observan en la figura 9.

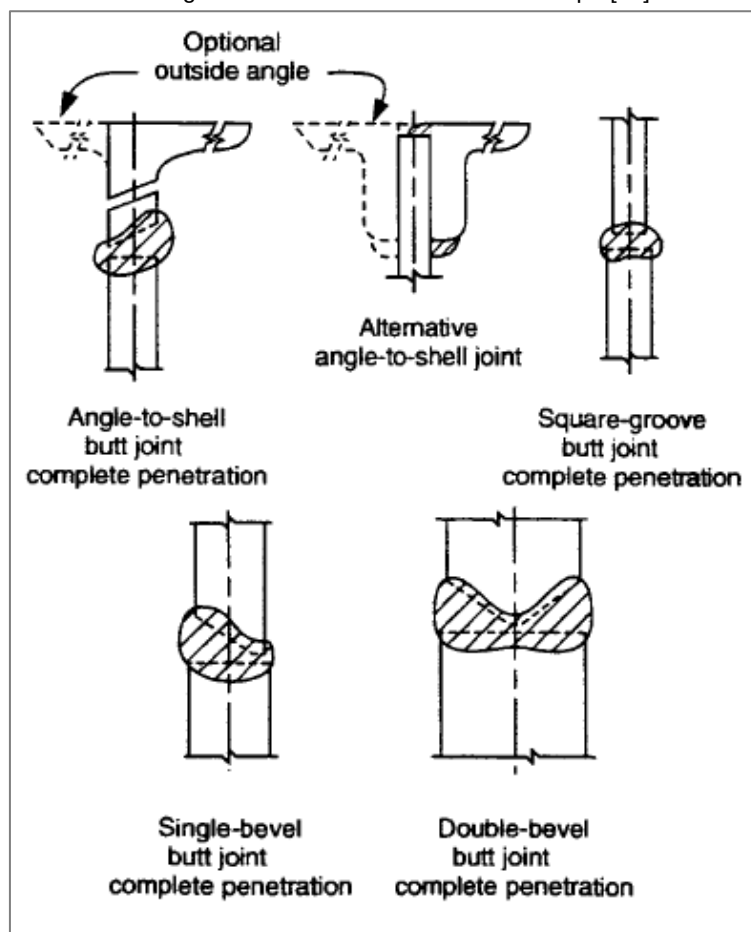
Figura 9: Juntas verticales del cuerpo [6]



2.9.2. Juntas horizontales del cuerpo.

Este tipo de juntas horizontales, debe ser de fusión y penetración completa, excepto de la que se realiza entre el ángulo de coronamiento y el cuerpo, la cual puede ser unida por doble soldadura a traslape, cumplimiento con el procedimiento de soldadura. A menos que otra cosa sea especificada; la junta a tope, con o sin bisel entre las placas del cuerpo, deberán tener una línea de centros o fibra media común. En la figura 10, se puede apreciar las juntas tipo horizontales.

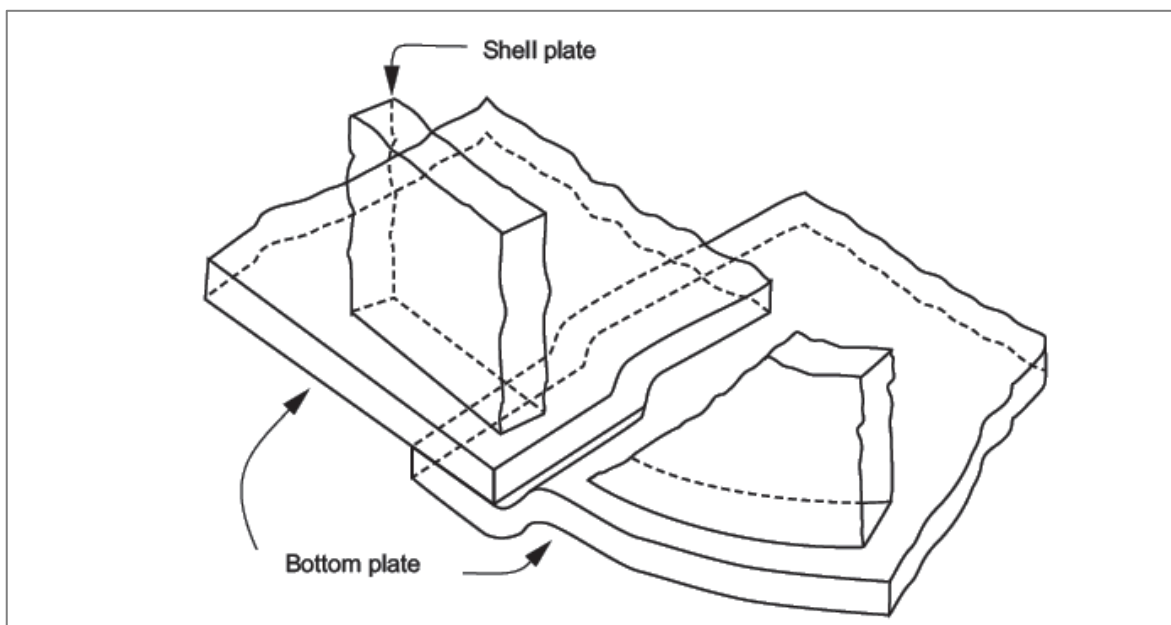
Figura 10: Juntas horizontales del cuerpo [13]



2.9.3. Juntas traslapadas del fondo.

Las juntas en el fondo del tanque para las láminas para el piso, se realiza con soldadura de juntas traslapadas, el traslape de tres láminas en el fondo del tanque no debe ser mayor a 300 mm (12 plg) entre estas; Asimismo, las placas del fondo necesitan ser soldadas en el lado del filo únicamente con una soldadura continua en junta tipo filete en todas las costuras, se aprecia en la figura 11. Además, las placas del fondo del piso que están debajo del primer anillo del cuerpo del tanque deben dar un apoyo completamente paralelo, liso y uniforme en el extremo final del traslape de las placas del fondo.

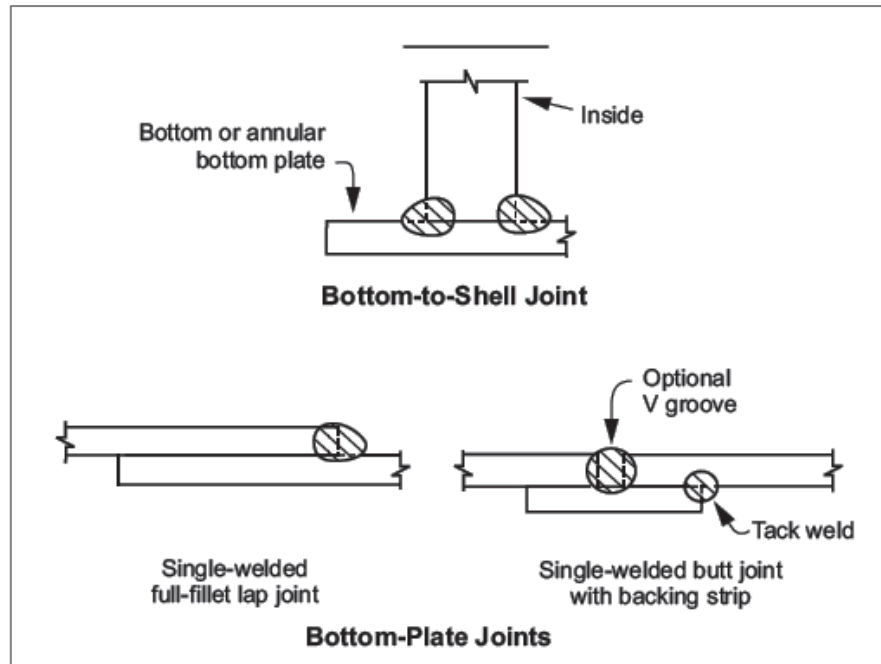
Figura 11: Juntas tralapadas del fondo [6]



2.9.4. Juntas a tope del fondo.

Cuando se usan deben tener el bisel cuadrado o en V. Los detalles son los mismos que los usados para las juntas verticales. Se puede usar una platina de respaldo de al menos 3 mm (1/8 in) de espesor y si tiene bisel cuadrado la luz de la raíz debe ser de mínimo 6 mm (¼ in). Las juntas de unión de tres láminas deberán estar al menos a una distancia de 300 mm (1 ft) de cualquiera otra y del cuerpo del tanque. Como se aprecia en la figura 12.

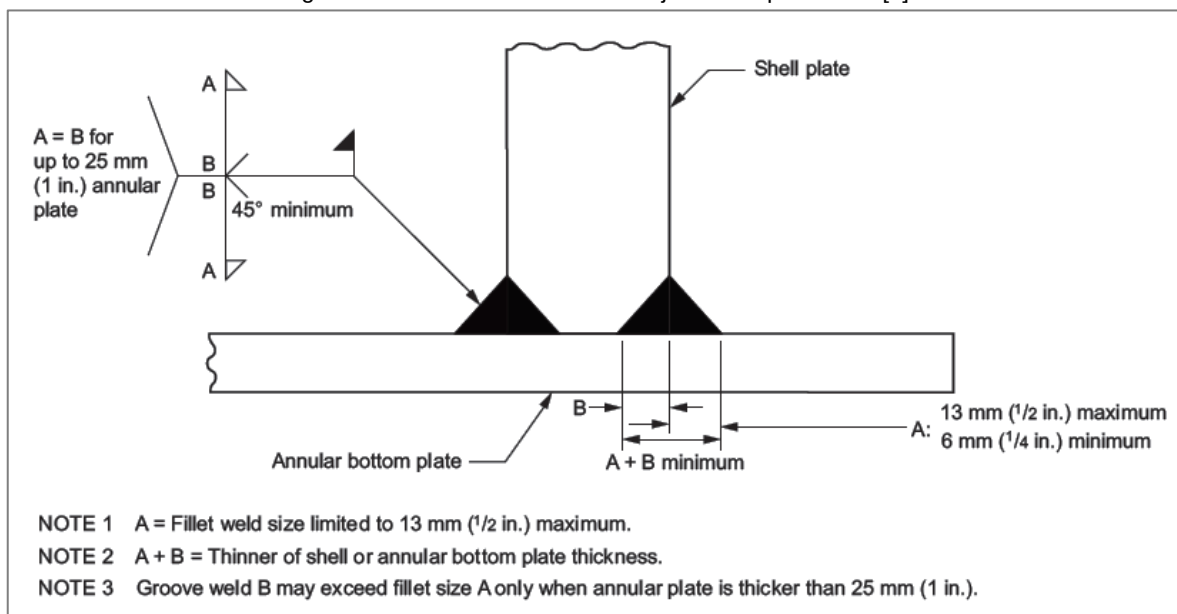
Figura 12: Juntas a tope del fondo [6]



2.9.5. Soldadura de filete de la junta cuerpo-fondo.

Para láminas del fondo y del anillo del fondo con espesores nominales de hasta 12.5 mm (1/2"), la unión entre el borde del anillo inferior del cuerpo y la lámina del fondo debe ser un filete de soldadura continuo a cada lado de la lámina del cuerpo. El tamaño de cada filete de soldadura no tiene que ser mayor de 12.5 mm (1/2"), como se aprecia en la figura 13:

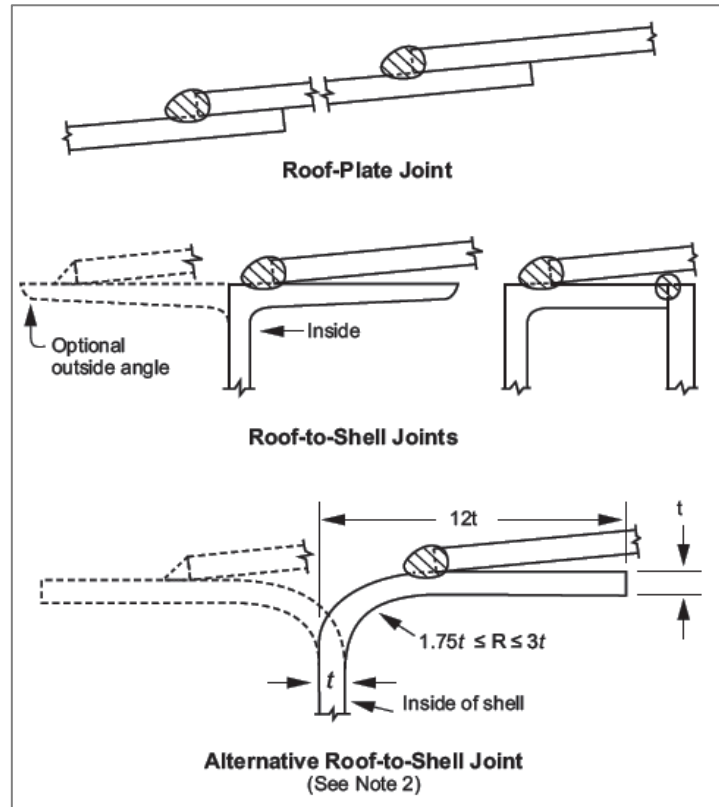
Figura 13: Soldadura de filete de la junta cuerpo - fondo [6]



2.9.6. Juntas de techo y ángulo superior.

Para tanques con un diámetro menor o igual que 9 m (30 ft) y un techo cónico soportado, el borde superior del cuerpo puede ser pestañado en lugar de instalar el ángulo superior. El radio de doblé y el ancho del borde pestañado deberá estar conforme a los detalles de la figura 14. Esta construcción puede ser usada para cualquier tanque con techo auto soportado, si el área transversal total de la junta cumple con los requerimientos establecidos para la construcción del ángulo superior. No se deberá agregar ningún miembro adicional, tal como un ángulo o una barra, al detalle pestañado techo-cuerpo.

Figura 14: Juntas de techo y ángulo superior [6]



2.10. Método de elementos finitos (MEF).

El método de elementos finitos usa ecuaciones diferenciales que simulan el comportamiento de una estructura analizando el desplazamiento, deformaciones y tensiones de estas. Dando como resultado un valor aproximado al problema real [15]. Para que las ecuaciones se calculen se necesitan mallas, estas analizan los diferentes puntos de la estructura que están con puestas por nodos.

2.10.1. Aplicación del método de elementos finitos (MEF).

El uso más común del método de elementos finitos es en estructuras. los desplazamientos de los nodos están definidos según la ecuación 1.

$$\vec{u} = \sum N_i a_i^e = [N_j \ N_i \ \dots] \left(\frac{\vec{a}_j}{a_i} \right)^e = N a^e \dots \dots \dots (1)$$

$\vec{u}$: desplazamiento horizontal o vertical.

N : coordenadas nodales.

a : desplazamiento puntual.

Una vez conocidos los puntos de desplazamiento se puede saber la deformación (ε).

$$\varepsilon = S \vec{u} \dots \dots \dots (2)$$

S : operador lineal.

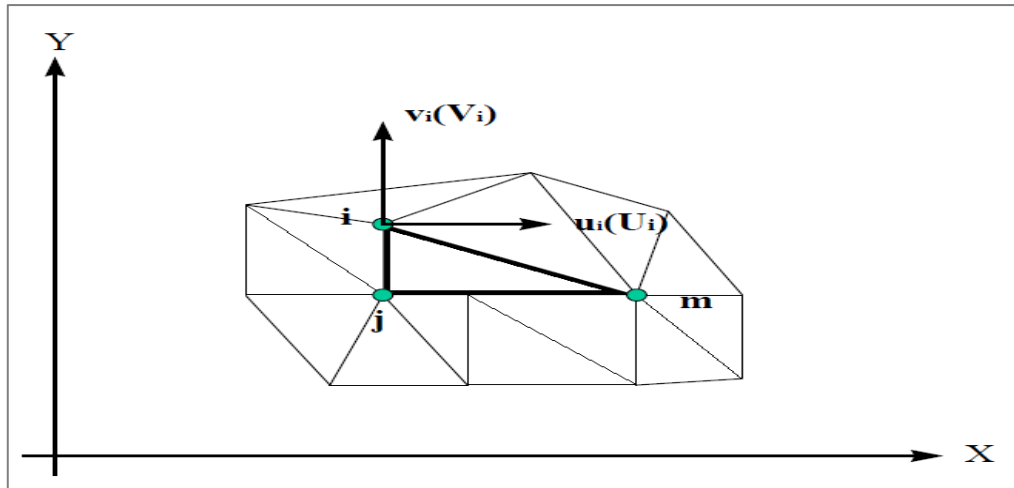
Si la estructura está sometida a deformaciones iniciales (ε_0) y esfuerzos (σ_0) la ecuación sería.

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \dots \dots \dots (3)$$

D : matriz de elasticidad.

La fuerza y el desplazamiento nodal debe de tener la misma cantidad de componentes, esto es conocido como esfuerzo nodal.

Figura 15: Cordenadas, desplazamiento y esfuerzos nodales [15]



En la figura 15 se puede apreciar los esfuerzos nodales que son V_i y U_i .

La relación de fuerzas nodales, tenciones de contorno y fuerzas distribuidas que son las que actúan por unidad de volumen en dirección al desplazamiento. Esta ecuación de relación se puede se puede resolver virtualmente.

$$q^e = \int_{V^e} B^T \sigma dV - \int_{V^e} N^T b dV \dots\dots\dots (4)$$

q^e : esfuerzo nodal.

V : volumen.

b : fuerzas distribuidas en volúmenes.

2.10.2. Mallado.

El mallado es uno de los pasos más importantes para realizar los cálculos de las ecuaciones diferenciales, lo cual consiste en la división del dominio en un conjunto de celdas, caras y nodos aplicando la metodología de los volúmenes finitos [16]. El conjunto de celdas se denomina malla; asimismo, la calidad de esta se refleja en la simulación, mientras se aproxime a 1. Existen diferentes tipos de mallados cada tipo se adecua a una forma geométrica estos son:

- mallado tetraédrico.

- mallado hexaédrico.
- mallado cuadrilátero.
- mallado triangular.

Los mallados hexaédricos y tetraédricos son usados en geometrías volumétricas y los mallados cuadriláteros y triangular en geometrías planas.

En la figura 16 y 17, se puede apreciar un mallado de cuadrilateros y triangulares, en las cuales se debe tener en cuenta que los mallados en una figura geometrica pueden ser combinados.

Figura 16: Mallado [15]

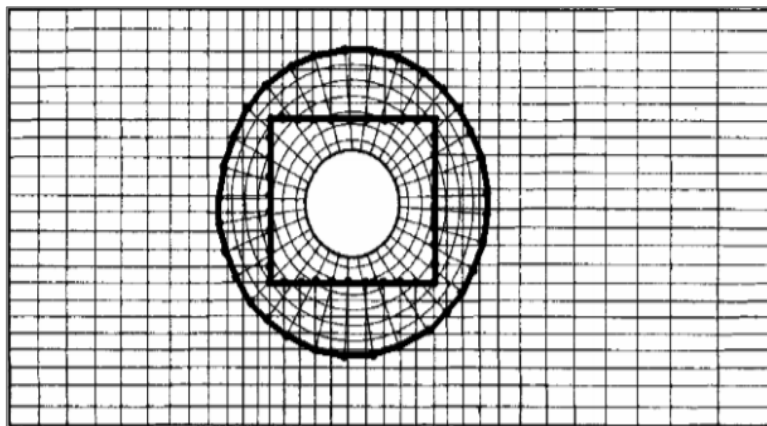
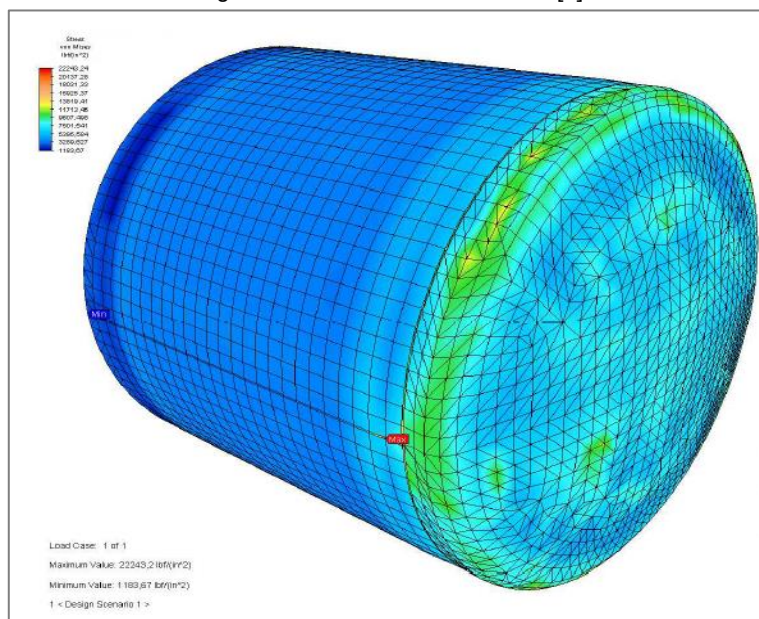


Figura 17: Mallado tridimensional [4]

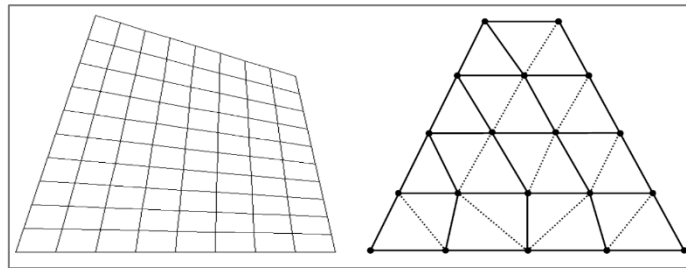


2.10.3. Tipos de mallados.

- a) **Mallados cuadriláteros:** Los mallados cuadriláteros se dividen en dos grupos: mallado estructurado donde el área analizada presenta el mismo número de divisiones o aristas y no estructurado.

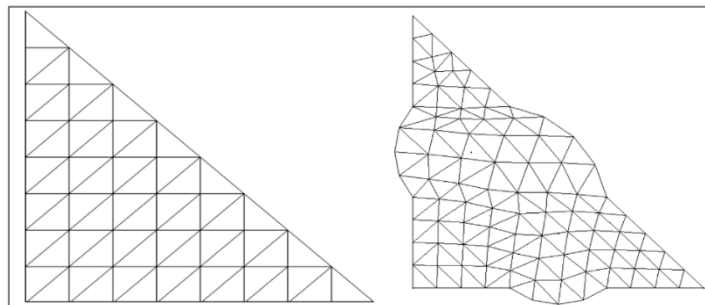
El mallado estructurado se genera por la intersección de rectas que unen los nodos. Este método es útil para cuadriláteros ya que proporciona buenos resultados. Sin embargo, para contornos irregulares, la malla generada presenta una baja calidad. El mallado no estructurado, la ventaja de este método es su rapidez frente a otros. En su mallado los pasos son a la vez [15]. Es decir, no llevan un orden nodo, arista, elemento solo se generan, la cual se puede apreciar en la figura 18.

Figura 18: Malla estructura y no estructural [15]



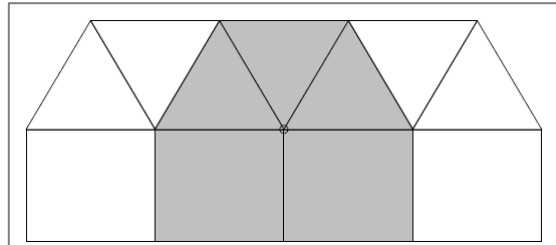
- b) **Mallados triangulares:** Como la malla cuadrática, este mallado posee un mallado estructurado y no estructural que depende de la discretización de su contorno, en el mallado estructural se forman los triángulos y posteriormente se generan las mallas no estructuradas, la cual se puede apreciar en la figura 19.

Figura 19: Mallado triangular estructural y no estructural [15]



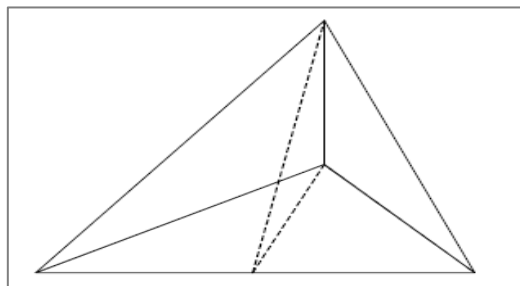
- c) **Mallados mixtos:** Se emplea únicamente en elementos cuadriláteros y triangulares el valor de error es similar a la del mallado triangular. En este caso las zonas específicas pueden tomar valores triangulares como cuadriláteros como se muestra en la figura 20.

Figura 20: Malla mixta [15]



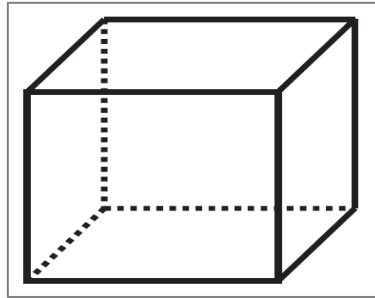
- d) **Mallados tetraédricos:** La discretización tridimensional requiere una interpolación local que es la combinación de 4 funciones base de elementos triangulares por cada nodo del tetraedro. El valor de una de las caras interpoladas dependerá únicamente del valor de la función de los nodos que garantiza la continuidad de la función a lo largo del dominio del problema, dentro de cada elemento esta función es continua y diferenciable. Pudiendo presentar tantas derivadas como elementos, la cual se puede apreciar en la figura 21.

Figura 21: Malla tetraedrica [15]



- e) **Mallados hexaédricos:** En el caso del hexaedro los variables aumentan considerablemente a comparación de los cuadriláteros. la distorsión en los hexaedros es un caso particular, ya que analizan a los paralelepípedos pues el fenómeno se da en forma conjunta o independiente que actúa según las direcciones del plano, la cual se puede apreciar en la figura 22.

Figura 22: Malla hexaédrica [16]

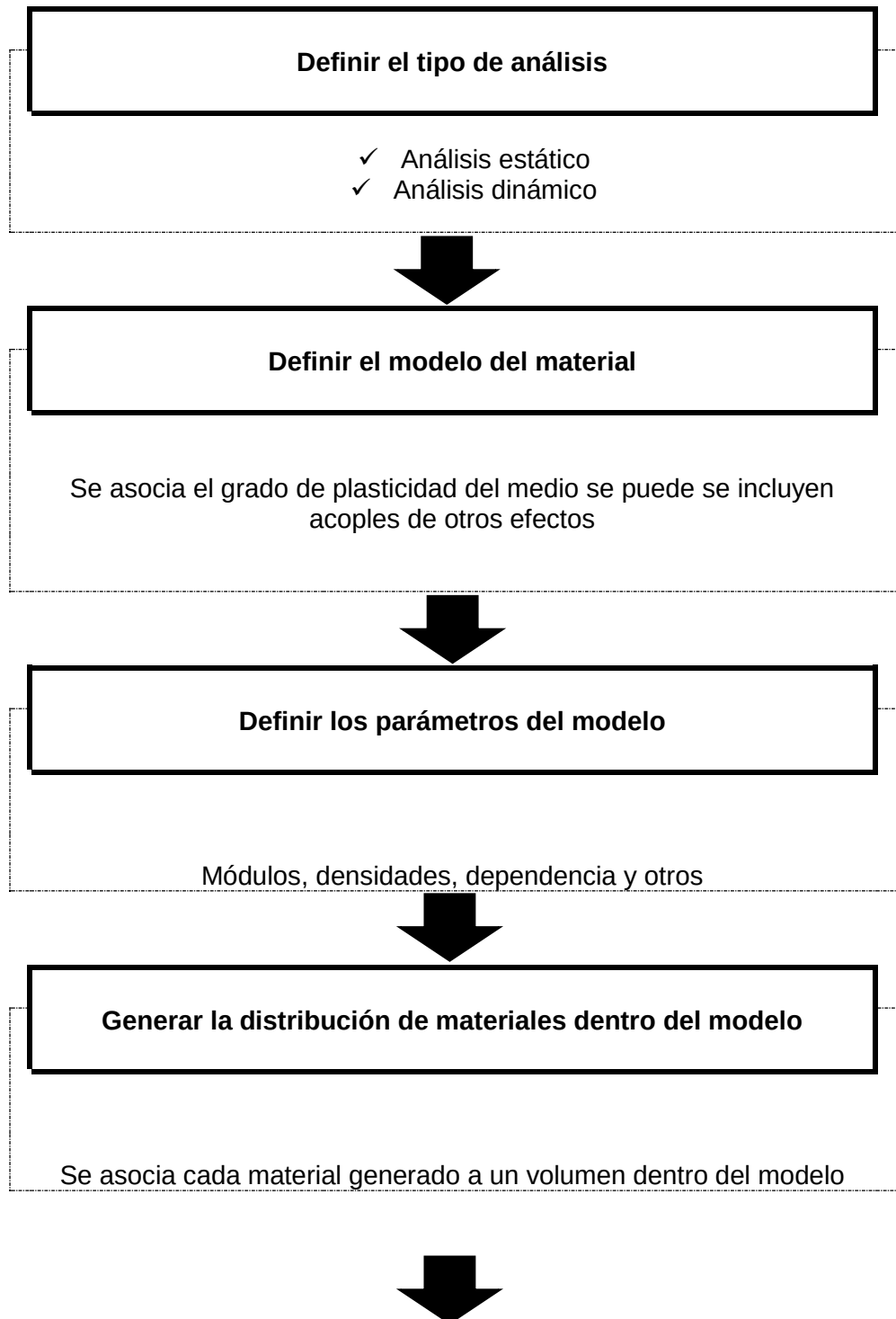


2.10.4. Pasos de simulación.

- a) **Tipo de análisis:** se definirá que tipo de análisis se realizará el en la estructura si requiere un análisis estático o si es un análisis dinámico.
- b) **Tipo de material:** se agregarán las características de materiales o modificarán valores de como elasticidad, resistencia a temperatura, etc. esto se lleva a cabo en la lista de materiales del software.
- c) **Los parámetros del modelo:** se delimitan las características que tendrá el modelo, si este va a necesitar uno, dos o más soportes, así como los puntos que se aplicaran fuerzas, cargas, presiones, etc.
- d) **La distribución de materiales dentro del modelo:** el modelo está constituido por varias piezas y cada pieza es un material distinto. en este paso las piezas las piezas son seleccionas y posteriormente se seleccionan sus características.
- e) **El mallado:** se genera el mallado, en este paso se tiene que tener en cuenta que una estructura no necesariamente es una forma geométrica ideal, por lo cual se tiene que generar un método de mallado distinto si lo requiere en una línea, un área, o volumen del diseño.
- f) **Aplicar las cargas:** se insertan los valores fuerza, presión, carga, momento, etc. estos se pueden aplicar en los nodos, mallas como en los parámetros delimitados.
- g) **Solución del sistema:** en el software hay una variedad de parámetros que se pueden analizar en como von-misses deformación, etc. luego de seleccionar los

parámetros se generan los valores que se buscan este resultado puede ser instantáneo como pueden demorar.

Diagrama de proceso de simulación [17]



Aplicar cargas

Las cargas, fuerzas, presiones y temperaturas se pueden aplicar sobre nodos, áreas o volúmenes



Solución del sistema

Generar el sistema de ecuaciones

Evaluar el grado de dispersión de la matriz resultante

Aplicar el método de solución

CAPÍTULO 3:

METODOLOGÍA DE LA SOLUCIÓN

3.1. Condiciones de diseño.

El diseño y cálculo del tanque de almacenamiento de petróleo de 10 000 galones de capacidad, ubicado en Lima – Perú. Será desarrollado en base a la Norma API 650, 12th edición del año 2016, donde se debe tener en cuenta las siguientes características:

- Capacidad del tanque: **10 000 galones = 37,88 m³**
- Fluido: **Diésel 2**
- Gravedad específica del líquido a almacenarse: **0.934 gr/cm³**
- Temperatura de trabajo: **20°C**
- Corrosión permisible: **1 mm**
- Ubicación: **Lima – Perú**
- Presión Atmosférica: **998,9 milibares**
- Humedad Relativa: **85%**
- Velocidad del viento: **1,7 m/s**

3.2. Selección de los materiales para el diseño del tanque.

3.2.1. Planchas.

Las planchas para el cuerpo y la base del tanque de almacenamiento deben cumplir con las siguientes especificaciones de ASTM según norma API 650 - sección 4.2, las cuales se eligen de lista que se presentan a continuación:

- Acero ASTM A36: Se utiliza este tipo de acero para planchas con un espesor máximo de 40 mm o 1.5 pulgadas.
- Acero ASTM A131: Se utiliza este acero según se especifica a continuación:

Grado A: Para planchas con un espesor máximo de 12.5 mm o 1/2 pulgada.

Grado B: Para planchas con un espesor máximo de 25 mm o 1 pulgada.

Grado CS: Para planchas con un espesor máximo de 40 mm o 1.5 pulgada.

Grado EH36: Para planchas con un espesor máximo de 45 mm.

- Acero ASTM A283: Se utiliza este tipo de acero en Grado C para planchas de espesores no mayores a 25 mm o 1 pulgada.
- Acero ASTM A285: Se utiliza este tipo de acero en Grado C para planchas de espesores no mayores a 25 mm o 1 pulgada.
- Acero ASTM A516: Se utiliza este material en los Grados 380, 415, 450, 585/A, 516, Grados 55, 60, 65 y 70 para planchas de espesores no mayores a 40 mm o 1.5 pulgadas.
- Acero ASTM A537: Se utiliza este material en Clases 1 y 2, para planchas de espesores no mayores a 45 mm.
- Acero ASTM A573: Se utiliza este material de Grados 400, 450, 485/A, 573, Grados 58, 65 y 70 para planchas de espesores no mayores a 40 mm.
- Acero ASTM A633: Se utiliza este material en Grados C y D, para planchas de espesores no mayores a 45 mm.
- Acero ASTM A662: Se utiliza este material en Grados B y C, para planchas de espesores no mayores a 40 mm.
- Acero ASTM A678: Se utiliza este material en Grado A para planchas de espesores máximos de 40 mm o 1.5 pulgadas, en Grado B para planchas de espesores máximos de 45 mm o 1.75 pulgadas.
- Acero ASTM A737: Se utiliza este material en Grado B para planchas de espesores máximos de 40 mm o 1.5 pulgadas.
- Acero ASTM A841: Se utiliza este material en Grado B para planchas de espesores máximos de 40 mm o 1.5 pulgadas.

Se elige el material Acero estructural ASTM A131/A, para las planchas del cuerpo y techo del tanque, ya que es adecuado dentro de la variedad de planchas para un máximo espesor de 12.5 mm, ancho 1800 mm y largo 6000 mm.

3.2.2. Perfiles estructurales.

Para la elección de material de perfil estructural, la Norma API 650 - sección 4.4, indica que todos los perfiles estructurales deben elegirse de la siguiente lista:

- ASTM A36M / A36.
- ASTM A131M / A131.
- ASTM A992M / A992.
- Aceros estructurales enumerados en AISC, Manual de construcción de acero.
- CSA G40.21, grados 260W (38W), 300W (44W), 350W (50W), 260WT (38WT), 300WT (44WT) y 350WT (50WT).
- ISO 630, grado E275, calidades B, C y D.
- EN 10025, grado S275, calidades JR, J0 y J2.

Se elige el material Acero estructural ASTM A131/A para el diseño de perfiles estructurales.

3.2.3. Tuberías y accesorios forjados.

Según la Norma API 650 - sección 4.5, indica que las tuberías y acoples de las tuberías deben ser de los siguientes materiales:

- API Spect 5L, Grados A, B y X42.
- ASTM A 53, Grados A y B.
- ASTM A 106, Grados A y B.
- ASTM A 234, Grados WPR.
- ASTM A 333, Grados 1 y 6.
- ASTM A 334, Grados 1 y 6.
- ASTM A 420, Grados WPL6.
- ASTM A 524, Grados I y II.

Los siguientes materiales son utilizados para los productos que hayan sido fabricados por forja:

- ASTM A 105.
- ASTM A 181.
- ASTM A 350, Grados LF1 y LF2.

Se elige como material para las tuberías y accesorios forjados, el acero ASTM A 53 Grado B, ya que este tipo de tubería que es aplicable para usos generales.

3.2.4. Bridas y pernos.

La norma API 650 – sección 4.7, indica que la selección de materiales para bridas debe estar de acuerdo con las características de los aceros en las especificaciones ASME B16.5. Puede ser usada lámina metálica para bridas, pero debe de tener propiedades mejores o iguales a aquellas requeridas por ASME B16.5.

La norma API 650 – sección 4.7, indica que el material para pernos debe estar de acuerdo con las características de los aceros en las especificaciones ASTM A 307 o A 193M/A 193. Se utilizará el acero A 325M/ A 325 para los pernos.

3.3. Diseño del tanque de almacenamiento.

3.3.1. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.

Las dimensiones preliminares del tanque se toman de la tabla 1 en base al volumen requerido de almacenamiento, diámetros y alturas sugeridos por el estándar API 650 – anexo A.

Tabla 1: Tamaños típicos correspondientes a capacidades nominales (m3) para tanques hechos con planchas de 1800 mm (SI) [18]

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 m ³	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	—	—	—	—
4.5	15.9	57	86	115	143	172	—	—	—	—
6	28.3	102	153	204	254	305	356	407	—	—
7.5	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

Donde se obtiene la siguiente información:

- *Diámetro sugerido: 3 m*
- *Altura sugerido: 5,4 m*
- *Numero de anillos sugerido: 3*
- *Alto de plancha sugerido: 1800 mm*

Para obtener el espesor mínimo de plancha sugerido, se recurre a la Tabla 2.

Tabla 2: Espesor de placa para tamaños típicos de tanques con anillos de 1800 mm de alto [18]

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10	Column 11	Column 12
Tank Diameter m	Tank Height (m) / Number of Courses in Completed Tank										Maximum Allowable Height for Diameter ^a m
	1.8 / 1	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	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	—	—	—	—	—
4.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	—	—	—	—	—
6	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	—	—	—
7.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.3	—
9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.7	6.3	—

- *Espesor minimo de plancha sugerido del cuerpo: 5 mm*

3.3.2. Cálculo del volumen del tanque.

Según la Norma API 650 – anexo A, en base a la Tabla 2, la capacidad del tanque de almacenamiento en (SI) es:

$$C = 0.785D^2H$$

Donde:

- $C = \text{Capacidad del tanque (m}^3\text{)}$
- $D = \text{Diámetro del Tanque (3 m)}$
- $H = \text{Altura del Tanque (5,4 m)}$

Se verifica:

$$C = 0.785D^2H$$

$$C = 0.785 * (3)^2 * 5,4$$

$$C = 38,15 \text{ m}^3$$

Donde, el volumen calculado corresponde casi al volumen nominal del tanque, que es 37,88 m³. Lo que provocaría una condición muy insegura para el diseño en el caso de un sobre almacenamiento, sin embargo, esta norma no es restrictiva, considerando que las dimensiones que propone la Norma API 650 – anexo A, son dimensiones sugeridas, y que es criterio de los diseñadores variar estas.

Para el diseño particular del tanque, hemos decidido aumentar 0,2 m a la longitud del diámetro propuesto, siendo el nuevo diámetro a considerar D = 3,2 m.

$$C = 0.785D^2H$$

$$C = 0.785 * (3,2)^2 * 5,4$$

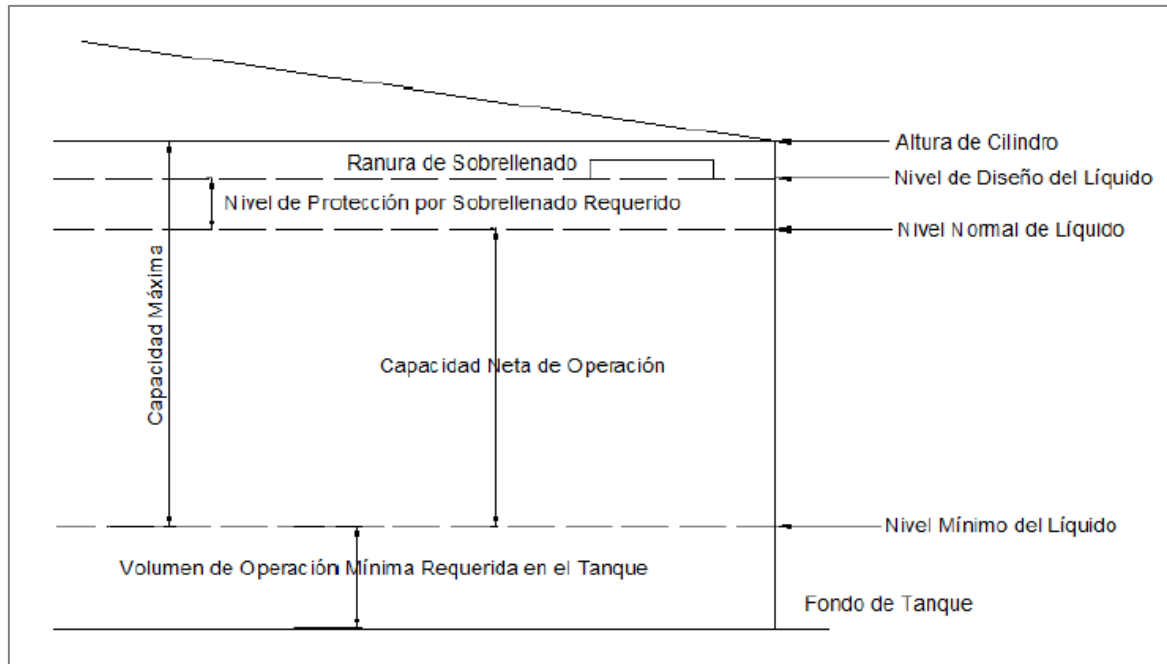
$$C = 43,41 \text{ m}^3$$

Con esto se comprueba que el cálculo del tanque de almacenamiento, será efectivo y seguro, para el diseño.

3.3.3. Cálculo del nivel de llenado del tanque.

La norma API 650 - sección 5, en el punto 5.2.5, se indica que los niveles de operación mínimo y máximo deben estar establecidos, no se indica específicamente cuanto, pero debe ser obligatorio considerar un margen mínimo y un margen de sobre llenado antes de llegar al límite del tanque tal y como se indica en la figura 23.

Figura 23: Niveles de Llenado de Tanque - Norma API 650 [18]



3.3.4. Cálculo de la altura efectiva del líquido a ser almacenado.

Tomando en cuenta que el tanque corresponde geoméricamente a un cilindro, la altura efectiva del líquido almacenado se puede calcular con la siguiente expresión:

$$V_L = \frac{\pi * D^2}{4} * He$$

Donde:

- D = Diámetro del tanque (3,2 m)
- He = Altura del líquido (m)
- V_L = Volumen del líquido (37,88 m³)

Resolución:

$$He = \frac{V_L}{\frac{\pi * D^2}{4}}$$

$$He = \frac{37,88}{\frac{\pi * (3,2)^2}{4}} = 4,709 \text{ m} \cong 4,7 \text{ m}$$

Además, se debe definir el nivel de diseño del líquido, donde el volumen de diseño contempla el nivel de protección de sobrellenado o volumen requerido. Como medida de seguridad, en este caso, se considera que el nivel mínimo del tanque es de 0,5 m, donde se obtiene:

- *Nivel de diseño líquido = 5,2 m*
- *Nivel normal del líquido = 4,7 m*
- *Nivel mínimo del líquido = 0,5 m*
- *Capacidad máxima = 43,41 m³*
- *Capacidad neta de operación = 37,88 m³*
- *Nivel de protección por sobrellenado = 0,5 m*

3.4. Datos generales y condiciones para el cálculo.

- *Condición de diseño = API 650*
- *Altura nominal del Tanque H_n = 5,4 m*
- *Altura de diseño del líquido H = 5,2 m*
- *Diámetro nominal del tanque D = 3,2 m*
- *Capacidad del tanque C = 37,88 m³ = 10 000 galones*
- *Presión de diseño = 1 atm*
- *Gravedad específica de diseño G = 1 gr/cm³*
- *Corrosión Admisible CA = 1 mm para el cuerpo*
- *Espesor mínimo especificado = 5mm*
- *Temperatura máxima de operación = 93°C*
- *Material para planchas del tanque = ASTM A131A*

3.5. Cálculo del cuerpo del tanque.

El cuerpo o envoltente del tanque está formado de la unión de anillos hasta lograr la altura deseada. Estos anillos se construyen, soldando láminas roladas formando el perímetro del tanque. Es por ello, que el cuerpo es el componente más grande y crítico del tanque, representando aproximadamente el 70% del diseño, por este motivo el cálculo de los espesores se debe hacer de la manera más detallada para obtener los espesores óptimos que permitan diseñar un tanque seguro.

Para el diseño del cuerpo o envoltente del tanque, la norma API 650 – sección 5.6, indica que el espesor requerido de las láminas del cuerpo debe ser el mayor entre el espesor requerido de producto del cuerpo, incluyendo la tolerancia de corrosión y el espesor requerido de prueba hidrostática del cuerpo, pero no debe ser menor que los espesores establecidos en la siguiente tabla 3 para los diferentes diámetros:

Tabla 3: Espesor Mínimo para Planchas de Tanques [18]

Nominal Tank Diameter		Nominal Plate Thickness	
(m)	(ft)	(mm)	(in.)
< 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

Además, la Nota 4 de la sección 5.6.1.1, dice que para diámetros menores a 15 m (50 pies) pero mayores a 3.2 m (10.5 pies), el espesor nominal de la plancha no debe ser inferior a 6 mm (1/4 in.), Como el diámetro del tanque es de 3.2 m se puede definir que el espesor sugerido para la plancha debe ser 6 mm con ello también se considera la corrosión admisible. Por ello se debe comprobar con el cálculo.

3.5.1. Cálculo del cuerpo del tanque por el método de un pie.

Para el cálculo del espesor del cuerpo donde el apéndice A solo permite este método de diseño, para diámetros menores a 60 m (200ft). Donde el método de un pie, calcula el espesor en puntos de diseño que se encuentran a 0.3 m (1 ft) por encima del borde inferior

de cada anillo que conforma el cuerpo del tanque. La norma API 650 – sección 5.6.3.2, indica que el mínimo espesor requerido de cada anillo del cuerpo deberá ser el mayor valor entre los calculados por las fórmulas en (SI):

Para condición de diseño:

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

Para condición de prueba hidrostática:

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

Donde:

- t_d = *Espesor de diseño del cuerpo, en mm*
- t_t = *Espesor del cuerpo en prueba hidrostática, en mm*
- D = *Diámetro nominal del tanque, en m*
- H = *Nivel de diseño del líquido, en m*
- G = *Gravedad específica de diseño del líquido a almacenar, en gr/cm^3*
- CA = *Tolerancia por corrosión, en mm*
- S_d = *Esfuerzo admisible para la condición de diseño, en MPa*
- S_t = *Esfuerzo admisible para las condiciones de prueba hidrostática, en MPa*

Para ello se debe obtener primeramente los esfuerzos máximos permisibles para diseño y prueba hidrostática (S_d) y (S_t), así como también la mínima resistencia a la fluencia y a la tracción (S_y) y (S_{tr}), según el material ASTM A131/A. A continuación, se selecciona de la Norma API 650 – sección 5.6.2. para el cálculo de la tabla 4:

Tabla 4: Esfuerzo admisible de las planchas de acero según el tipo de acero [18]

Plate Specification	Grade	Nominal Plate Thickness t mm	Minimum Yield Strength MPa	Minimum Tensile Strength MPa	Product Design Stress S_d MPa	Hydrostatic Test Stress S_t MPa
ASTM Specifications						
A283M	C		205	380	137	154
A285M	C		205	380	137	154
A131M	A, B		235	400	157	171
A36M	—		250	400	160	171

Donde:

- *El Material de la plancha = **Acero estructural ASTM A131/A***
- *Esfuerzo para prueba de diseño $S_d = 157 \text{ MPa}$*
- *Esfuerzo prueba hidrostática $S_t = 171 \text{ MPa}$*
- *Resistencia mínima de fluencia del material $S_y = 235 \text{ MPa}$*
- *Resistencia mínima a la tracción $S_{tr} = 400 \text{ MPa}$*

Luego se procede a efectuar el cálculo para hallar los espesores de cada anillo, sabiendo que al ser la altura de diseño de cilindro 5.2 metros, considerando el exceso de capacidad de sobre llenado, entonces lo más conveniente es usar planchas de 1800 mm de ancho para los 3 anillos del cuerpo.

a) Cálculo del primer anillo.

Datos:

- $D = 3.2 \text{ m}$
- $H = 5.2 \text{ m}$
- $G = 1 \text{ gr/cm}^3$
- $CA = 1 \text{ mm}$
- $S_d = 157 \text{ MPa}$
- $S_t = 171 \text{ MPa}$

Cálculo de Espesor de Diseño del cuerpo:

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

Reemplazando:

$$t_d = \frac{4.9 * (3.2) * (5.2 - 0.3) * 1}{157} + 1$$

$$t_d = 1.489 \cong 1.49 \text{ mm}$$

Cálculo de Espesor del cuerpo en prueba hidrostática:

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

Reemplazando:

$$t_t = \frac{4.9 * (3.2) * (5.2 - 0.3)}{171}$$

$$t_t = 0.449 \cong 0.50 \text{ mm}$$

b) Cálculo del segundo anillo.

Cálculo de Espesor de Diseño del cuerpo:

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

Reemplazando:

$$t_d = \frac{4.9 * (3.2) * ((5.2 - 1.8) - 0.3) * 1}{157} + 1$$

$$t_d = 1.309 \cong 1.31 \text{ mm}$$

Cálculo de Espesor del cuerpo en prueba hidrostática:

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

Reemplazando:

$$t_t = \frac{4.9 * (3.2) * ((5.2 - 1.8) - 0.3)}{171}$$

$$t_t = 0.284 \cong 0.28 \text{ mm}$$

c) Cálculo del tercer anillo.

Cálculo de Espesor de Diseño del cuerpo:

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

Reemplazando:

$$t_d = \frac{4.9 * (3.2) * ((5.2 - 3.6) - 0.3) * 1}{157} + 1$$

$$t_d = 1.129 \cong 1.13 \text{ mm}$$

Cálculo de Espesor del cuerpo en prueba hidrostática:

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

Reemplazando:

$$t_t = \frac{4.9 * (3.2) * ((5.2 - 3.6) - 0.3)}{171}$$

$$t_t = 0.119 \cong 0.12 \text{ mm}$$

A continuación, se presenta en la tabla 5, los espesores de anillos del tanque:

Tabla 5: Espesores del cuerpo. [Elaboración propia]

ESPESORES DEL CUERPO			
N° de Anillo	Material	Espesor calculado (mm)	Espesor adoptado (mm)
1	A131/A	1.49 mm	6 mm
2	A131/A	1.31 mm	6 mm
3	A131/A	1.13 mm	6 mm

Por lo tanto, el espesor adoptado para la plancha del cuerpo es de 6 mm debido a que es un espesor sugerido por la norma API 650, la cual se comprobó en los cálculos garantizando un margen de tolerancia grande.

3.5.2. Cálculo de la disposición de los anillos del cuerpo.

En la Norma API 650 - sección 5.1.5.2, se indica que las juntas verticales no deben ser colocadas de manera alineada y deben ser colocadas con una distancia mínima de 5 veces el espesor del anillo más grueso, a continuación, se calcula la distancia mínima entre uniones verticales:

$$d = 5t$$

$$d = 5 * (6) = 30 \text{ mm}$$

Entonces con esto se determina que la distancia mínima entre las uniones verticales debe ser 30 mm

3.5.3. Cálculo de las dimensiones de las planchas usadas en el cuerpo.

De acuerdo a catálogo de TUBISA S.A.C las dimensiones son de 1800x6000 mm y 1800x12000 mm, para calcular la cantidad de planchas que se usaran por sección de anillo se hallara el perímetro del tanque:

$$P_t = D \pi$$

Donde:

P_t = *perímetro del tanque, en m*

D = *Diametro nominal del tanque (3.2 m)*

Reemplazando:

$$P_t = (3.2) \pi$$

$$P_t = 10.05 \text{ m}$$

El resultado es de 10.05 m, entonces de acuerdo a catálogo de "TUBISA S.A.C" las dimensiones son de 1800x6000 mm y 1800x12000 mm para todo tipo de espesor, de acuerdo a esta especificación el tipo de plancha que se usará es de 1800x12000mm, ya que solo se necesita 1 plancha por anillo.

3.6. Cálculo del fondo del tanque.

Según la norma API 650 – sección 5.4, indica que las planchas del fondo deberán tener un espesor nominal mínimo de 6mm (1/4 in) [70 kPa (10.2 lb/ft²)] sin incluir ninguna tolerancia de corrosión especificada. Donde las láminas rectangulares y del borde del fondo deben tener un ancho mínimo de 1800 mm (72 in o 6 ft).

Asimismo, la Norma API 650 – sección 5.5, indica que la tabla 6, que se muestra a continuación, se obtiene el mínimo espesor de diseño a considerar para las láminas del fondo del tanque, considerando el esfuerzo de prueba hidrostática y el espesor del primer Anillo.

Tabla 6: Espesores Mínimos del Fondo del Tanque [18]

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

Como el espesor del cuerpo del tanque es de 6 mm y con el esfuerzo de prueba hidrostática de 171 MPa, se puede definir que el espesor sugerido para la plancha debe ser 6 mm.

Además, se consideran que las planchas se ubicarán sobre una base de hormigón uniforme previamente construida bajo los parámetros de diseño que indica la Norma API 650.

Además, las dimensiones nominales de las láminas serán 6000x1800x6 mm, y estarán distribuidas simétricamente en base a ejes coordenados X y Y de la circunferencia del piso. Lo que permite esta distribución de las planchas, para utilizar la mínima cantidad de planchas para conformar el piso.

3.7. Cálculo de la unión cuerpo - fondo.

Para el determinar el espesor del filete de soldadura del cilindro-fondo, donde el filete que se considera para las planchas a soldar de la envolvente y el fondo del tanque se obtiene de la siguiente tabla contenida en la Norma API 650 - sección 5.1.5.7, la cual se muestra la tabla 7 de a continuación:

Tabla 7: Tamaño mínimo de la soldadura de filete [18]

Nominal Thickness of Shell Plate		Minimum Size of Fillet Weld	
(mm)	(in.)	(mm)	(in.)
5	0.1875	5	$\frac{3}{16}$
> 5 to 20	> 0.1875 to 0.75	6	$\frac{1}{4}$
> 20 to 32	> 0.75 to 1.25	8	$\frac{5}{16}$
> 32 to 45	> 1.25 to 1.75	10	$\frac{3}{8}$

Como se puede apreciar, el espesor del fondo es de 6 mm, está entre 5 y 20 mm, por lo tanto, se elige un filete de 6 mm como mínimo.

3.8. Cálculo del techo del tanque.

El techo empleado es el techo cónico, ya que estos techos auto soportados son empleados en tanques relativamente pequeños. Este consiste en un cono formado de placas soldadas a tope, el cual, por su forma física; además, es capaz de sostenerse sin ningún elemento estructural y únicamente soportado en su periferia por el perfil de coronamiento.

Además, el techo diseñado y calculado para el tanque no debe exceder un diámetro de 60 pies, pero es recomendable fabricar estos en un diámetro máximo de 40 pies. El espesor no deberá ser menor de 4.8 mm ($\frac{3}{16}$ pulg), y no mayor de 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ pulg).

Asimismo, el techo de cono auto soportado debe cumplir con los siguientes requisitos:

- el ángulo de inclinación transversal (θ), del techo tiene que estar en un rango de $9,5^\circ$ a 37° , o con una pendiente desde 9:12 a 2:12.
- El espesor corroído no será superior a 13 mm.

3.8.1. Cálculo del espesor mínimo de diseño del techo del tanque.

$$e = \frac{D}{4.8 \sin \theta} \sqrt{\frac{B}{2.2}} + CA$$

Donde:

e = Espesor mínimo de diseño del techo del tanque, en mm

D = Diámetro nominal del tanque, en m

θ = Angulo transversal de elevación del techo, en grados

B = Carga Total (Peso del techo del tanque) más Carga Viva consideradas para el diseño del techo (kPa). $DL + Lr$

Donde:

DL = Carga Muerta, en kPa

Lr = Carga Viva del Techo = 1.0 kPa (sugerido por la norma API 650 – seccion 5.2)

a) Cálculo del área total del techo ($A_{total\ techo}$):

Cálculo del área total del cono:

$$A_{total\ del\ cono} = \pi r ge + \pi r^2$$

Donde:

$A_{total\ del\ cono}$ = Área total del cono, en m^2

r = radio nominal del tanque (1.6 m)

ge = generatriz del cono, en m

h = altura del cono (0.48 m)

$\theta = 17^\circ$

Reemplazando:

$$ge = \sqrt{h^2 + r^2}$$

$$ge = \sqrt{(0.006)^2 + (1.6)^2}$$

$$ge = 1.67\ m$$

$$A_{total\ del\ cono} = \pi * 1.6 * 1.67 + \pi * (1.6)^2$$

$$A_{total\ del\ cono} = \mathbf{16.44\ m^2}$$

Cálculo del área de entrada de hombre:

$$A_{entrada} = \pi \times r^2$$

Donde:

$r_{entrada}$ = radio de la entrada del hombre (0.38 m)

Reemplazando:

$$A_{entrada} = \pi \times (0.38)^2$$

$$A_{entrada} = \mathbf{0.45\ m^2}$$

Finalmente:

$$A_{total\ techo} = A_{total\ del\ cono} - A_{entrada}$$

$$A_{total\ techo} = 16.44 - 0.45$$

$$A_{total\ techo} = \mathbf{15.99\ m^2}$$

b) Cálculo del volumen del techo:

$$V_{techo} = A_{total\ techo} * 0.006$$

$$V_{techo} = 15.99 * 0.006$$

$$V_{techo} = \mathbf{0.096\ m^3}$$

c) Cálculo del peso del techo:

$$w = \rho * V_{techo} * g$$

Donde:

m = masa del techo, en kg

ρ = densidad del acero (7850 kg/m³)

g = gravedad (9.81 m/s²)

Reemplazando:

$$w = 7850 * 0.096 * 9.81$$

$$w = \mathbf{7392.82\ N}$$

d) Cálculo de la carga muerta:

$$DL = \frac{w}{A_{total\ techo}}$$

$$DL = \frac{7392.82}{15.99}$$

$$DL = 462.34\ Pa = 0.46\ kPa$$

Hallando B:

$$B = DL + Lr$$

$$B = 0.46 + 1$$

$$B = 1.46\ kPa$$

e) Finalmente, cálculo del espesor mínimo de diseño del techo del tanque:

$$e = \frac{D}{4.8 \sin \theta} \sqrt{\frac{B}{2.2}}$$

Donde:

$$D = 3.2\ m$$

$$\theta = 17^\circ$$

$$B = 1.46\ kPa$$

$$e = \frac{3.2}{4.8 * \sin 17^\circ} \sqrt{\frac{1.46}{2.2}}$$

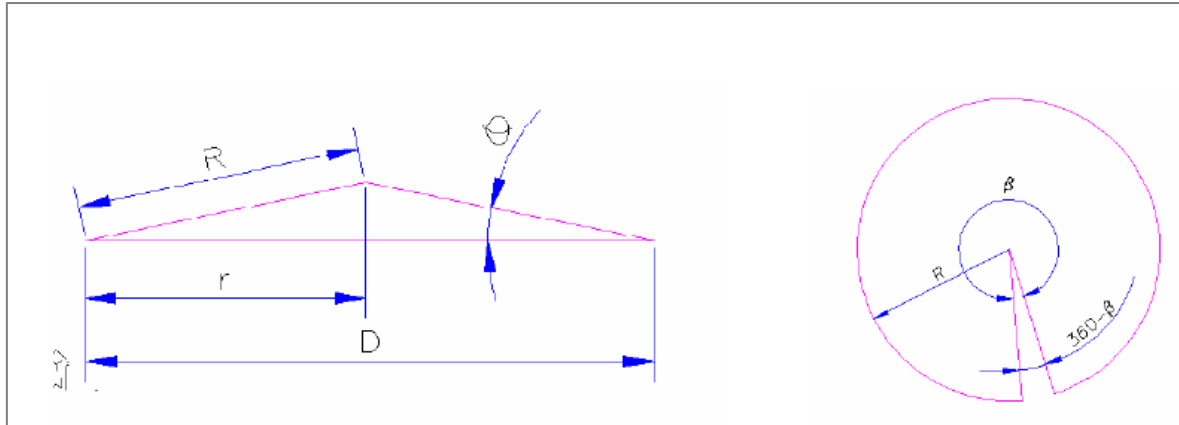
$$e = 1.857 \cong 1.86\ mm$$

Por lo tanto, el espesor de diseño adoptado será de **6 mm** debido a que la norma API 650 recomienda que el espesor no deberá ser menor de 4.8 mm (3/16 pulg).

3.8.2. Cálculo del ángulo de corte para el techo cónico.

Para el cálculo del ángulo de corte del techo cónico se considera como esquema la figura 24, que muestra el triángulo en vista frontal que formaría el techo:

Figura 24: Esquema del Angulo de Corte del Techo Cónico [18]



$$\alpha = 360^\circ - 360^\circ(r / R)$$

Donde:

D = Diámetro del Tanque.

r = Radio del Tanque.

θ = Angulo transversal de elevación del techo en grados.

R = Radio del cono del techo.

α = Ángulo de corte para el techo cónico.

Entonces:

$$D = 3.2 \text{ m}$$

$$r = 1.6 \text{ m}$$

$$\theta = 17^\circ$$

$$R = r / \theta$$

$$R = 1.6 \text{ m} / \cos 17^\circ$$

$$R = 1.67 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$\alpha = 360^\circ - 360^\circ * (1.6/1.67)$$

$$\alpha = 15.08^\circ$$

Por lo tanto, el ángulo de corte adoptado para diseño será de **15°**.

3.9. Cálculo del anillo superior o ángulo de tope.

Para techos auto soportados del tipo cono, los bordes de las láminas del techo pueden ser pestañadas horizontalmente para que se ajusten planas contra el ángulo superior para mejorar las condiciones de soldadura, donde el angular de coronación es un ángulo de 90° que se suelda en la parte superior de la envolvente, con el fin de rigidizar el tanque.

La Norma API 650 – sección 5.1.5.9, indica que los ángulos normalizados para poder rigidizar el tanque según su diámetro, la cual se presenta a continuación en la tabla 8:

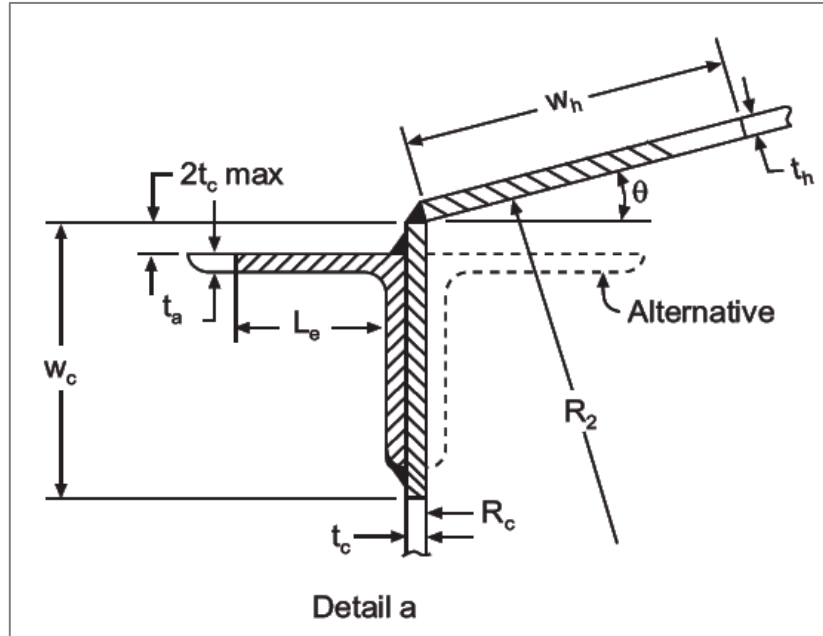
Tabla 8: Ángulos para rigidizar el tanque [18]

Tank Diameter (D)	Minimum Top Angle Size ^a (mm)	Minimum Top Angle Size ^a (in.)
$D \leq 11 \text{ m}, (D \leq 35 \text{ ft})$	50 × 50 × 5	2 × 2 × ³ / ₁₆
11 m < D ≤ 18 m, (35 ft < D ≤ 60 ft)	50 × 50 × 6	2 × 2 × ¹ / ₄
D > 18 m, (D > 60 ft)	75 × 75 × 10	3 × 3 × ³ / ₈

Por lo tanto, como el diámetro del tanque es 3.2 m se seleccionará el perfil tipo L de 50 x 50 x 5 mm

En la Norma API 650, apéndice F, se presenta una lista de formas en las que el angular de coronación puede ser soldado a la envolvente del tanque, de las cuales se ha elegido la del Detalle A, la cual se muestra en la Figura 25 presentada a continuación:

Figura 25: Angular de coronación alrededor de la parte superior de la envolvente – Detalle A [18]



3.10. Cálculo del peso del tanque.

Para continuar con los demás cálculos del tanque es necesario calcular el peso total del tanque, para lo cual se calcula el peso de cada componente del tanque, en este caso será en 3 partes:

- Peso de la envolvente.
- Peso del fondo.
- Peso del techo.

a) Peso de la envolvente.

Se calcula el peso de cada plancha que conforma la envolvente y se multiplica por la cantidad de planchas utilizadas para cada anillo del mismo espesor:

Se sabe que las dimensiones de las planchas son de 1800 mm x 12000 mm y que se usara 1 planchas por cada anillo, debemos saber también que el peso específico del acero es de 7.85 ton/m³.

Cálculo del peso de 1° anillo:

$$Plancha\ 1^{\circ}\ anillo = 6\ mm$$

$$Peso\ plancha\ 1^{\circ}\ anillo = 12 * 1.8 * 6 * 7.85$$

$$Peso\ plancha\ 1^{\circ}\ anillo = 1017.36\ kg$$

Obtenido el peso de plancha del 1° anillo, y como el espesor de los demás anillos es el mismo, entonces se multiplica por la cantidad de anillos para hallar el peso total de la envolvente:

$$Peso\ total\ envolvente = Peso\ plancha\ 1^{\circ}\ anillo * 3$$

$$Peso\ total\ envolvente = 1017.36 * 3$$

$$**Peso\ total\ envolvente = 3052.08\ kg**$$

b) Peso del fondo.

En este apartado, el peso del fondo del tanque, la sumatoria del cálculo del peso del anillo perimetral más el peso del resto del fondo, ya que los espesores del anillo perimetral y del resto del fondo son iguales, entonces el peso será:

$$Peso\ fondo = A * e_{fondo} * 7.85$$

$$Peso\ fondo = \left(\frac{\pi * D^2}{4}\right) * e_{fondo} * 7.85$$

$$Peso\ fondo = \left(\frac{\pi * 3.2^2}{4}\right) * 6 * 7.85$$

$$**Peso\ fondo = 378.80\ kg**$$

c) Peso del techo.

Se calcula el peso del techo multiplicando el área total del techo por el espesor de la plancha con el peso específico del acero que es de 7.85 ton/m³.

$$Peso\ techo = A_{total\ techo} * e_{techo} * 7.85$$

Donde:

$$**A_{total\ techo} = 15.99\ m^2**$$

Reemplazando:

$$\text{Peso techo} = 15.99 * 6 * 7.85$$

$$\text{Peso techo} = 753.13 \text{ kg}$$

Entonces el peso total del tanque es:

$$\text{Peso tanque} = \text{Peso total envolvente} + \text{Peso fondo} + \text{Peso techo}$$

$$\text{Peso tanque} = 3052.08 + 378.80 + 753.13$$

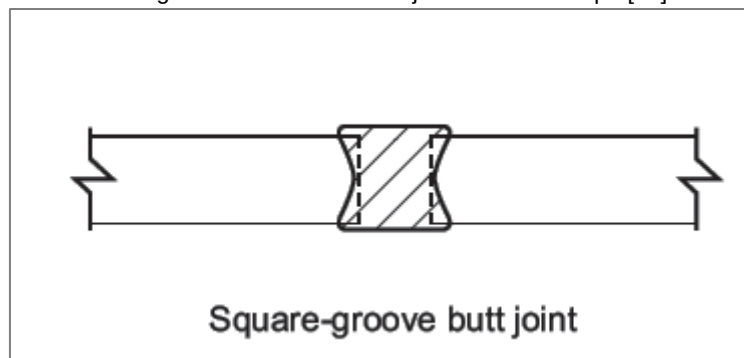
$$\text{Peso tanque} = 4184.01 \text{ kg}$$

3.11. Selección del tipo de junta empleado en la soldadura del tanque.

3.11.1. Soldadura en juntas verticales.

Para el diseño de juntas verticales se consideró una junta vertical sencilla con penetración completa de la norma API 650 - sección 5.1.1.5, donde las ranuras serán cuadradas, además tendrá la mitad del espesor de la plancha como se muestra en la figura 26:

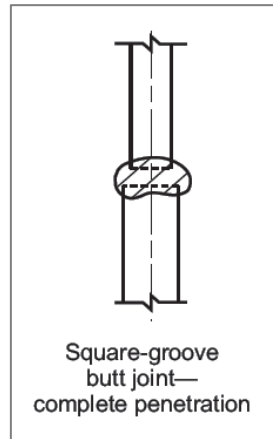
Figura 26: Soldaduras en junta vertical a tope [18]



3.11.2. Soldadura en juntas horizontales.

Para el diseño de juntas horizontales se consideró una junta horizontal a tope y penetración completa de la norma API 650 - sección 5.1.1.5, donde las ranuras serán cuadradas, además tendrá la mitad del espesor de la plancha como se muestra en la figura 27:

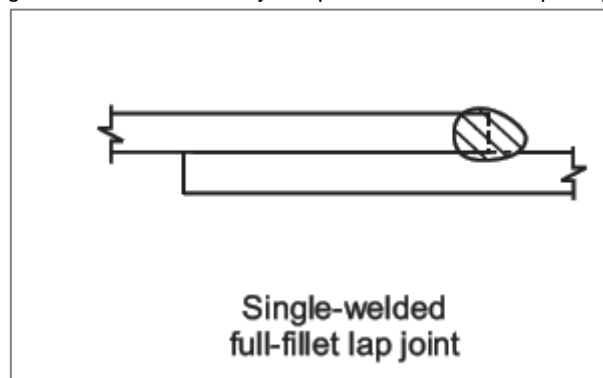
Figura 27: Soldadura en junta horizontal a tope [18]



3.11.3. Soldadura en juntas traslapadas.

Para el diseño de juntas planas se consideró una junta traslapada sin bisel de la norma API 650 – sección 5.1.1.4, donde la junta de soldadura entre dos miembros traslapados, en la cual el borde traslapados de uno de los miembros está soldado con soldadura de filete. Para el cálculo se considerará un triángulo isósceles de 6 mm de longitud por catetos, equivalentes al espesor de la plancha. como se muestra en la figura 28:

Figura 28: soldadura con junta plana de filete Traslapada [18]

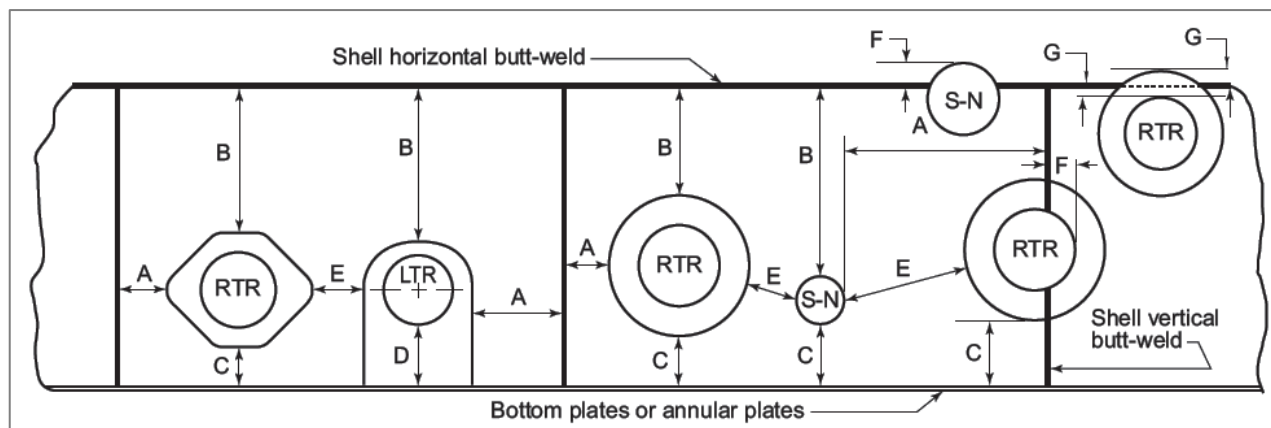


3.12. Selección de accesorios para el tanque.

3.12.1. Condiciones de las aberturas en el cuerpo del tanque.

Según API 650 – sección 5.7, donde en la figura 29, se describe las distancias mínimas que se consideran para la ubicación de las aberturas en el cuerpo.

Figura 29: Descripción y geometría de aberturas en el cuerpo del tanque [18]



RTR: Abertura reforzada (manhole o boquilla con refuerzo tipo diamante)

LTR: Abertura reforzada baja a nivel del piso (acceso para limpieza).

S-N: Abertura no reforzada.

Los valores A, B, C D, E, F, G de la figura 29, que se encuentran en la tabla 9, donde se definirá las posiciones de las boquillas y los manholes mediante el espesor de la plancha del cuerpo.

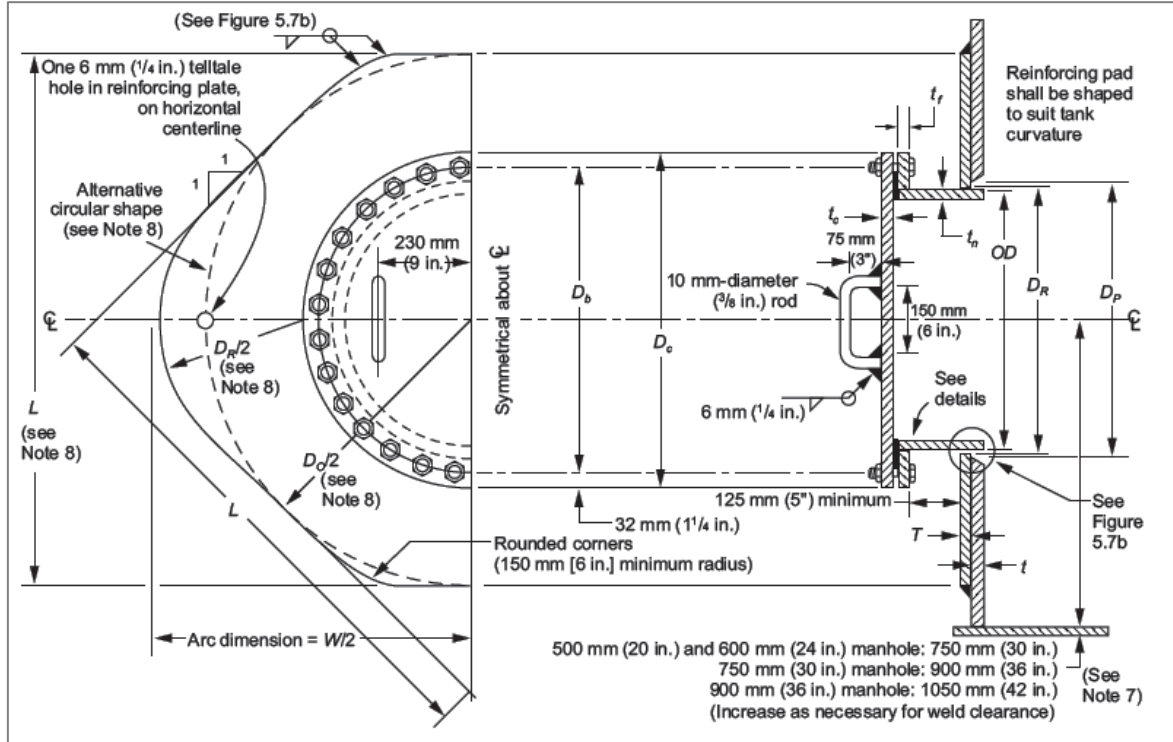
Tabla 9: Mínimas distancias de separación de las principales aberturas del cuerpo [18]

Variables		Reference	Minimum Dimension Between Weld Toes or Weld Centerline (Notes 1, 2, 3, and 4)						
Shell t	Condition	Para-graph Number	A	B	C	D (5 only)	E	F (6)	G (6)
$t \leq 13 \text{ mm}$ ($t \leq \frac{1}{2} \text{ in.}$)	As welded or PWHT	5.7.3.2	150 mm (6 in.)	75 mm (3 in.)			75 mm (3 in.)		
		5.7.3.3			75 mm (3 in.)				
		5.7.3.3							
		5.7.3.3				Table 5.6a and Table 5.6b			
		• 5.7.3.4						Lesser of $8t$ or $\frac{1}{2} r$	$8t$
$t > 13 \text{ mm}$ ($t > \frac{1}{2} \text{ in.}$)	As Welded	5.7.3.1.a	$8W$ or 250 mm (10 in.)	$8W$ or 250 mm (10 in.)					
		5.7.3.1.b							
		5.7.3.3							
		5.7.3.3			$8W$ or 250 mm (10 in.)				
		• 5.7.3.4			75 mm (3 in.) for S-N	Table 5.6a and Table 5.6b		Lesser of $8t$ or $\frac{1}{2} r$	$8t$

3.13. Manhole del cuerpo.

Los manholes son accesos, usados para el mantenimiento del tanque (limpiezas o reparaciones). La norma API 650 - sección 5.7.5, especifica las dimensiones y tamaños de los manhole del cuerpo las cuales deberán ser de acuerdo con lo mostrado en la Figura 30 y con lo establecido en las tablas 10 -12.

Figura 30: Manhole del Cuerpo [18]



Donde:

- Dp o OD = Diámetro exterior de la boquilla o del cuello.
- ID = Diámetro del manhole
- Dc = Diámetro de la tapa del manhole
- Db = Diámetro del eje de los agujeros para los espárragos
- Do = Diámetro exterior de la placa de refuerzo
- DR = Diámetro Interior de la placa de refuerzo
- tf = Espesor de la brida
- tc = Espesor de la tapa del manhole

- t_{nc} = Espesor del cuello
- t_{nb} = Espesor de boquilla
- t = Espesor del anillo del cuerpo del tanque
- T = Espesor de la placa de refuerzo
- W = Ancho de la placa de refuerzo

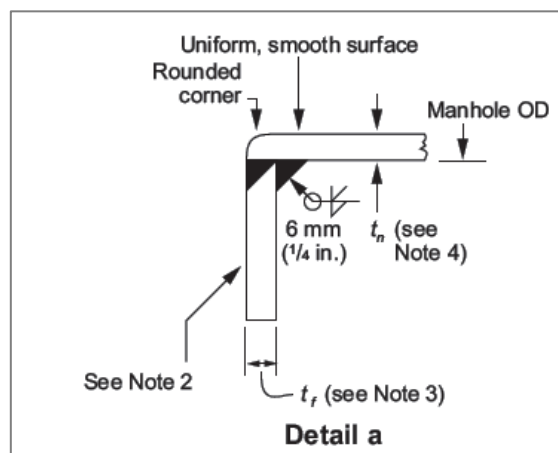
a) Pernos y agujeros: La Norma API 650 nos indica que para manholes del cuerpo de 750 y 900 mm de diámetro, se utilizarán 42 pernos de 20 mm de diámetro y para los agujeros una perforación de 23 mm de diámetro.

b) Empaques: Para el Manhole del cuerpo seleccionado de 750 mm de diámetro se necesita un empaque con las siguientes características:

- Diámetro exterior: 899 mm
- Diámetro interior: 762 mm
- Espesor: 3 mm

c) Altura mínima desde la base del tanque hasta el centro del agujero del manhole: Para el manhole de 750 mm de diámetro la altura será de 750 mm; además, los cuellos pertenecientes a los manholes y boquillas están soldados al cuerpo del tanque por medio de una junta a filete y cubre todo el perímetro con penetración completa como se aprecia en la figura 31.

Figura 31: Unión del cuello manhole-cuerpo del tanque [18]



3.13.1. Dimensionamiento del manhole del cuerpo.

Primero, con el diámetro del manhole seleccionado, se recurre a la tabla 10 la cual fue extraída de la norma API 650. Donde se obtendrá el espesor de la placa de la tapa t_c y el espesor de la brida empernada t_f .

Tabla 10: Espesor de la placa de la tapa t_c y de la brida empernada t_f [18]

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10
Max. Design Liquid Level m H	Equivalent Pressure ^a kPa	Minimum Thickness of Cover Plate ^b (t_c), mm				Minimum Thickness of Bolting Flange After Finishing ^b (t_f), mm			
		500 mm Manhole	600 mm Manhole	750 mm Manhole	900 mm Manhole	500 mm Manhole	600 mm Manhole	750 mm Manhole	900 mm 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

Considerando la altura de 6.5 m, debido a que la altura es de 5.2 m, con el diámetro seleccionado del manhole de 750 mm se obtiene de la tabla 10 los siguientes datos:

- *Mínimo espesor de la placa de la tapa $t_c = 13 \text{ mm}$*
- *Mínimo espesor de la brida empernada $t_f = 10 \text{ mm}$*
- *Presión Equivalente basada en la carga de agua $= 64 \text{ KPa}$*

Segundo, se recurre a la tabla 11, donde se obtiene el espesor del cuello del manhole del cuerpo t_{nc} .

Tabla 11: Espesor del cuello del manhole del cuerpo tnc [18]

Thickness of Shell (t) ^a	Minimum Neck Thickness (t_n) ^b			
	For Manhole Diameter 500 mm	For Manhole Diameter 600 mm	For Manhole Diameter 750 mm	For Manhole Diameter 900 mm
5	5	5	5	5
6	6	6	6	6
8	6	6	8	8
10	6	6	8	10

De la Tabla 11, ingresando con el espesor del primer anillo calculado; $t = 6$ mm y con el manhole seleccionado de 750 mm se obtiene los siguientes datos:

- *Mínimo espesor del cuello del manhole del cuerpo tnc = 6 mm*

Tercero, se recurre a la tabla 12, donde se obtendrá las dimensiones del diámetro circular de los pernos y el diámetro de la cubierta de la placa.

Tabla 12: Dimensiones del diámetro circular de los pernos D_b y diámetro de la cubierta de la placa D_c del cuerpo del manhole [18]

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

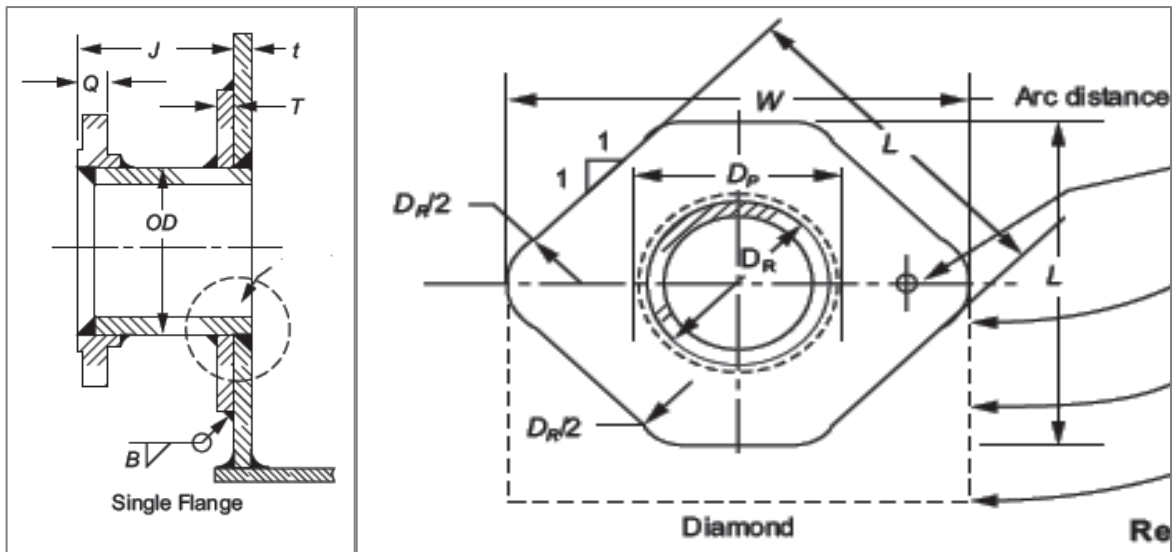
De la Tabla 12, con el diámetro del manhole de 750mm, se obtiene los siguientes datos:

- *Diámetro circular de agujeros $D_b = 921$ mm*
- *Diámetro de la tapa del manhole $D_c = 984$ mm*

3.14. Boquillas - bridas en el cuerpo.

La norma API 650 – sección 5.7.6, indica la junta que se debe emplear para el diseño de los accesorios del cuerpo del tanque, en la cual se utilizara la brida simple y el refuerzo elegido sera de forma de diamante como se aprecia en la figura 32.

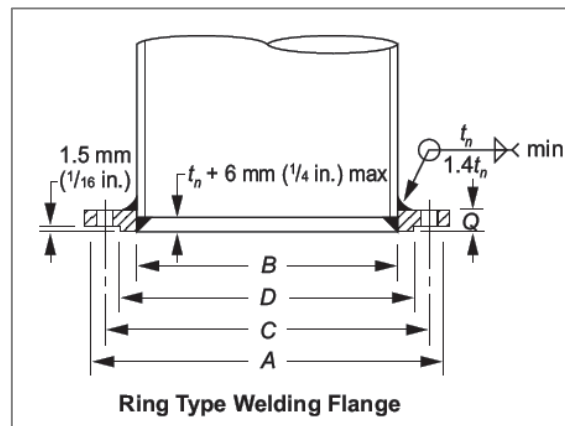
Figura 32: Refuerzo de boquillas y bridas del cuerpo [18]



3.14.1. Soldadura de boquillas – bridas.

El tipo de junta utilizada para bridas es la de soldadura de chaflán para brida -boquilla, como se aprecia en la figura 33.

Figura 33: Soldadura brida-boquilla [18]



3.14.2. Dimensionamiento de boquillas - bridas en el cuerpo.

Primero se determina el diámetro de la boquilla que se requiere para las diferentes necesidades utilizando la figura 30 y 33, donde se recurre a la tabla 13, para dimensionar las boquillas del cuerpo, como para las dimensiones restantes del manhole. No se debe

confundir el espesor del cuello tnc con el espesor de la boquilla tnb, el primero se utiliza en el manhole, mientras que la segunda en la construcción de boquillas.

Además, solo se tomará en cuenta la columna 3 para las boquillas tnb, mientras que, si se necesita para el cuello del manhole, se obviará la columna 3 y el tnc del cuello será el calculado en la tabla 10.

Tabla 13: Dimensiones de las boquillas del cuerpo [18]

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9 ^c
NPS (Size of Nozzle)	Outside Diameter of Pipe OD	Nominal Thickness of Flanged Nozzle Pipe Wall ^a t_n	Diameter of Hole in Reinforcing Plate D_R	Length of Side of Reinforcing Plate ^b or Diameter $L = D_o$	Width of Reinforcing Plate W	Minimum Distance from Shell- to-Flange Face J	Minimum Distance from Bottom of Tank to Center of Nozzle	
							Regular Type ^d H_N	Low Type C
Flanged Fittings								
60	1524.0	e	1528	3068	3703	400	1641	1534
54	1371.6	e	1375	2763	3341	400	1488	1382
52	1320.8	e	1324	2661	3214	400	1437	1331
50	1270.0	e	1274	2560	3093	400	1387	1280
48	1219.2	e	1222	2455	2970	400	1334	1230
46	1168.4	e	1172	2355	2845	400	1284	1180
44	1117.6	e	1121	2255	2725	375	1234	1125
42	1066.8	e	1070	2155	2605	375	1184	1075
40	1016.0	e	1019	2050	2485	375	1131	1025
38	965.2	e	968	1950	2355	350	1081	975
36	914.4	e	918	1850	2235	350	1031	925
34	863.6	e	867	1745	2115	325	979	875
32	812.8	e	816	1645	1995	325	929	820
30	762.0	e	765	1545	1865	300	879	770
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

Para las boquillas del cuerpo de Manhole de 30 pulgadas de diámetro se obtiene los siguientes datos:

- *Diámetro exterior del tubo OD = 762mm*
- *Diámetro de la Placa de Refuerzo DR = 765mm*
- *Longitud del lado de placa refuerzo o diámetro L = Do = 1545mm*
- *Ancho de la Placa de refuerzo W = 1865mm*
- *Distancia mínima desde el cuerpo a la cara de la brida J = 300mm*

Para las boquillas del cuerpo para la salida de limpieza de 24 pulgadas se obtiene los siguientes datos:

- *Diámetro exterior del tubo OD = 609.6 mm*
- *Espesor nominal de la pared del tubo de la boquilla tnb = 12.7 mm*
- *Diámetro de la Placa de Refuerzo DR = 613 mm*
- *Longitud del lado de placa refuerzo o diámetro L = Do = 1255 mm*
- *Ancho de la Placa de refuerzo W = 1525 mm*
- *Distancia mínima desde el cuerpo a la cara de la brida J = 300 mm*

Para las boquillas del cuerpo para el Drenaje de 4 pulgadas de diámetro se obtiene los siguientes datos:

- *Diámetro exterior del tubo OD = 114.3 mm*
- *Espesor nominal de la pared del tubo de la boquilla tnb = 8.56 mm*
- *Diámetro de la Placa de Refuerzo DR = 117 mm*
- *Longitud del lado de placa refuerzo o diámetro L = Do = 305 mm*
- *Ancho de la Placa de refuerzo W = 385 mm*
- *Distancia mínima desde el cuerpo a la cara de la brida J = 175 mm*

Segundo, se recurre a la tabla 14, donde se obtiene las dimensiones para las boquillas del cuerpo: tubos, placas y tamaño del filete de soldadura; además, con el espesor del primer anillo del tanque (desde el fondo) o el espesor de la placa de refuerzo seleccionada y de la figuras 30 y 33.

Tabla 14: Dimensiones de las boquillas del cuerpo: tubería, placas y tamaño del filete de soldadura [18]

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6
Thickness of Shell and Reinforcing Plate ^a t and T	Minimum Pipe Wall Thickness of Flanged Nozzles ^b t_n	Maximum Diameter of Hole in Shell Plate (D_p) Equals Outside Diameter of Pipe Plus	Size of Fillet Weld B	Size of Fillet Weld A	
				Nozzles Larger Than NPS 2	NPS $\frac{3}{4}$ to 2 Nozzles
5	12.7	16	5	6	6
6	12.7	16	6	6	6
8	12.7	16	8	6	6
10	12.7	16	10	6	6
11	12.7	16	11	6	6
13	12.7	16	13	6	8
14	12.7	20	14	6	8

De la tabla 14, ingresando con el espesor del primer anillo de $t = 6 \text{ mm}$ se obtiene los siguientes datos:

- *Mínimo espesor tubo de la boquilla $t_{nb} = 12.7 \text{ mm}$*
- *Valor añadido al diámetro de boquilla para obtener máximo diámetro de la placa del cuerpo $750 + D_p = 766 \text{ mm}$*
- *Tamaño del filete de soldadura $B = 6 \text{ mm}$*
- *Tamaño de filete soldadura A Boquillas de más de 2 pulgadas $= 6 \text{ mm}$*
- *Tamaño de filete soldadura A Boquillas de $\frac{3}{4}$ a 2 pulgadas $= 6 \text{ mm}$*

Ademas, los datos restantes para la selección de boquillas-bridas, se obtendrán de la tabla 15 y de la figuras 30 y 33.

Tabla 15: Dimensiones para boquillas - bridas [18]

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10	Column 11	Column 12
NPS (Size of Nozzle)	Minimum Thickness of Flange ^d Q	Outside Diameter of Flange A	Diameter of Raised Face D	Diameter of Bolt Circle C	Number of Holes	Diameter of Holes	Diameter of Bolts	Diameter of Bore		Minimum Diameter of Hub at Point of Weld	
								Slip-On Type: Outside Diameter of Pipe Plus B	Welding Neck Type ^a B ₁	Slip-On Type ^b E	Welding Neck Type ^c E ₁
60	79.4	1854	1676	1759	52	48	45	6.4	a	b	c
54	76.2	1683	1511	1594	44	48	45	6.4	a	b	c
52	73	1626	1461	1537	44	48	45	6.4	a	b	c
50	70	1569	1410	1480	44	48	45	6.4	a	b	c
48	70	1510	1360	1426	44	42	40	6.4	a	b	c
46	68	1460	1295	1365	40	42	40	6.4	a	b	c
44	67	1405	1245	1315	40	42	40	6.4	a	b	c
42	67	1345	1195	1257	36	42	40	6.4	a	b	c
40	65	1290	1125	1200	36	42	40	6.4	a	b	c
38	60	1240	1075	1150	32	42	40	6.4	a	b	c
36	60	1170	1020	1036	32	42	40	6.4	a	b	c
34	59	1110	960	1029	32	42	40	6.4	a	b	c
32	57	1060	910	978	28	42	40	6.4	a	b	c
30	54	985	855	914	28	33	30	6.4	a	b	c
28	52	925	795	864	28	33	30	6.4	a	b	c
26	50	870	745	806	24	33	30	6.4	a	b	c
24	48	815	690	750	20	33	30	4.8	a	b	c
22	46	750	640	692	20	33	30	4.8	a	b	c
20	43	700	585	635	20	30	27	4.8	a	b	c
18	40	635	535	577	16	30	27	4.8	a	b	c
16	36	595	470	540	16	27	24	4.8	a	b	c
14	35	535	415	476	12	27	24	4.8	a	b	c
12	32	485	380	432	12	25	22	3.2	a	b	c
10	30	405	325	362	12	25	22	3.2	a	b	c
8	28	345	270	298	8	23	20	3.2	a	b	c
6	25	280	216	241	8	23	20	2.4	a	b	c
4	24	230	157	190	8	19	16	1.6	a	b	c
3	24	190	127	152	4	19	16	1.6	a	b	c
2	20	150	92	121	4	19	16	1.6	a	b	c
1½	17	125	73	98	4	16	12	1.6	a	b	c

Para las boquillas del cuerpo de Manhole de 30 pulgadas de diámetro se obtiene los siguientes datos:

- *Mínimo espesor del borde Q = 54 mm*
- *Diámetro exterior del borde A = 985 mm*
- *Diámetro de la cara superior D = 855 mm*

- *Diámetro del círculo del perno C = 914 mm*
- *Numero de agujeros = 28*
- *Diámetro de los agujeros = 33 mm*
- *Diámetro de los pernos = 30 mm*

Para las boquillas del cuerpo para la salida de limpieza de 24 pulgadas se obtiene los siguientes datos:

- *Mínimo espesor del borde Q = 48 mm*
- *Diámetro exterior del borde A = 815 mm*
- *Diámetro de la cara superior D = 690 mm*
- *Diámetro del círculo del perno C = 750 mm*
- *Numero de agujeros = 20*
- *Diámetro de los agujeros = 33 mm*
- *Diámetro de los pernos = 30 mm*

Para las boquillas del cuerpo para el Drenaje de 4 pulgadas de diámetro se obtiene los siguientes datos:

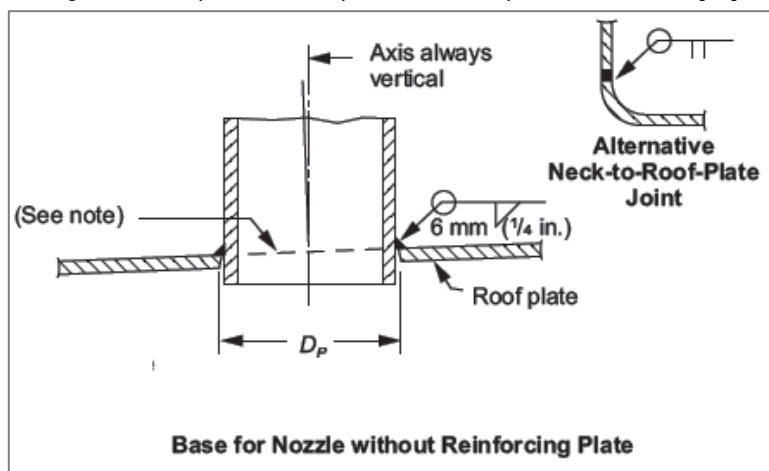
- *Mínimo espesor del borde Q = 24 mm*
- *Diámetro exterior del borde A = 230 mm*
- *Diámetro de la cara superior D = 157 mm*
- *Diámetro del círculo del perno C = 190 mm*
- *Numero de agujeros = 8*
- *Diámetro de los agujeros = 19 mm*
- *Diámetro de los pernos = 16 mm*

3.15. Boquillas - bridas en el techo.

Para las boquillas para techos la norma API 650 – sección 5.8.5.6, indica que se deben utilizar para colocar las válvulas de venteo, tales como las bocas de aforo, cuellos de ganso,

las dimensiones de estas boquillas se encuentran en la figura 34. Para el diseño de las bridas - boquillas se usará la base para boquilla sin placa de refuerzo.

Figura 34: Boquillas-Bridas para Techo sin placa de refuerzo [18]



3.15.1. Dimensionamiento de boquillas - bridas en el techo.

Para determinar las dimensiones de las boquillas - bridas del techo, se emplea el espesor de la boquilla de 12.7 mm, y con el diámetro de las boquillas que se requiere y con el uso de la tabla 16 y la figura 34, se procede a la selección de las dimensiones.

Tabla 16: Dimensiones para boquillas-bridas del techo [18]

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5
Nozzle NPS	Outside Diameter of Pipe Neck	Diameter of Hole in Roof Plate or Reinforcing Plate D_p	Minimum Height of Nozzle H_R	Outside Diameter of Reinforcing Plate ^a D_R
1 ^{1/2}	48.3	50	150	125
2	60.3	65	150	175
3	88.9	92	150	225
4	114.3	120	150	275
6	168.3	170	150	375
8	219.1	225	150	450
10	273.0	280	200	550
12	323.8	330	200	600

Para las boquillas del techo del tubo de aforamiento del tanque con una boquilla de 6 pulgadas de diámetro, se obtiene los siguientes datos:

- *Diámetro exterior del cuello = 168.3 mm*
- *Diámetro del agujero en la placa de refuerzo del techo DP = 170 mm*
- *Mínima altura de boquilla = HR = 150 mm*
- *Diámetro exterior de la placa de refuerzo DR = 375 mm*

Para las boquillas del techo del tubo de aforo del tanque con una boquilla de 10 pulgadas de diámetro, se obtiene los siguientes datos:

- *Diámetro exterior del cuello = 273 mm*
- *Diámetro del agujero en la placa de refuerzo del techo DP = 280 mm*
- *Mínima altura de boquilla = HR = 200 mm*
- *Diámetro exterior de la placa de refuerzo DR = 550 mm*

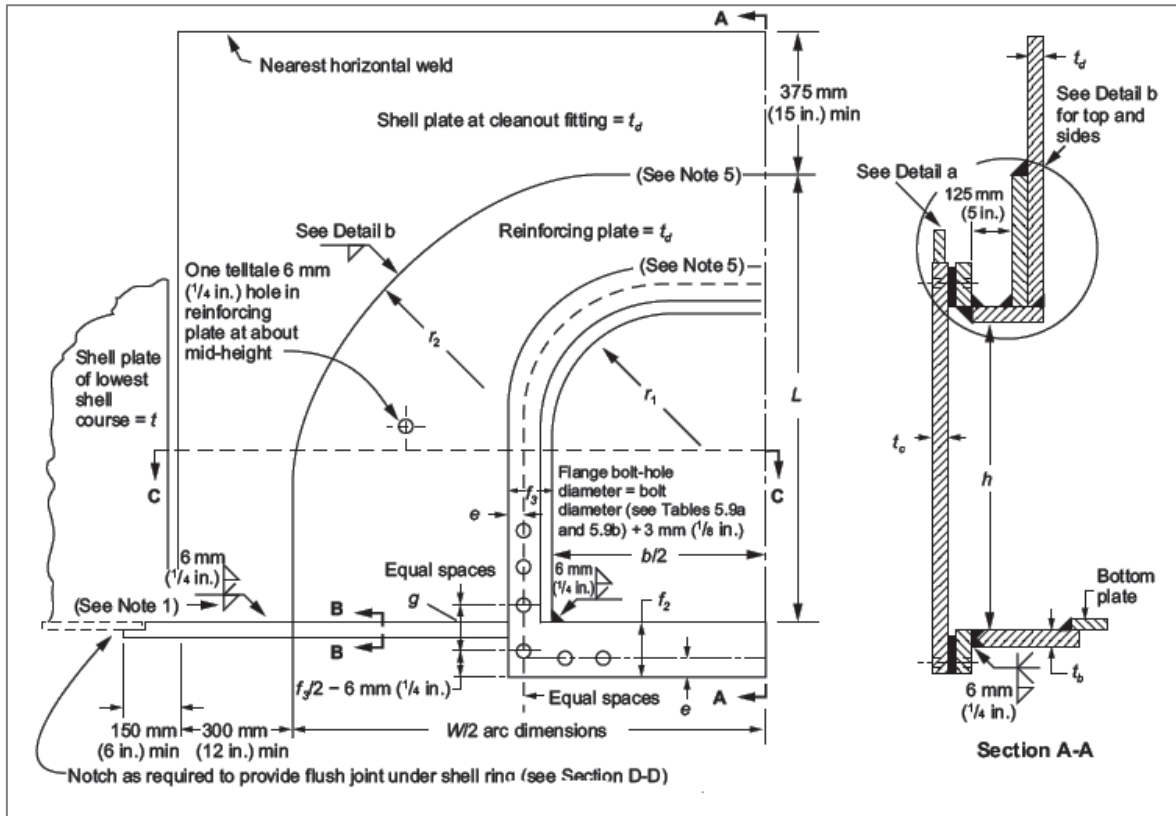
Para las boquillas del techo para el venteo del tanque con una boquilla de 12 pulgadas de diámetro, se obtiene los siguientes datos:

- *Diámetro exterior del cuello = 323.8 mm*
- *Diámetro del agujero en la placa de refuerzo del techo DP = 330 mm*
- *Mínima altura de boquilla = HR = 200 mm*
- *Diámetro exterior de la placa de refuerzo DR = 600 mm*

3.16. Acceso de limpieza tipo lápida o compuerta de sedimentos.

Los accesos de limpieza se utilizan para el ingreso de los equipos de mantenimiento y para la limpieza de sedimentos, la Norma API 650 – sección 5.7.7, indica que la abertura en el cuerpo del tanque es de forma rectangular en la base mientras que en las esquinas superiores debe tener un radio igual a un medio de la altura correspondiente a la abertura, comúnmente llamadas lápidas, como el cuerpo del tanque está construido con materiales del grupo I, el ancho o el alto de la abertura no debe exceder 1200mm (48in); además, el espesor del área extraída, así como el espesor de la placa de refuerzo y el cuello del acceso de limpieza será igual al espesor del primer anillo del cuerpo del tanque tal como se muestra en la figura 35.

Figura 35: Accesorio de limpieza a nivel (lápida) [18]



3.16.1 Dimensionamiento del acceso de limpieza de sedimentos.

El primer procedimiento es determinar el ancho y el alto del acceso de limpieza que se requiere, con la altura máxima del nivel del líquido con el uso de la tabla 17.

Tabla 17: Dimensiones para el acceso de limpieza [18]

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10	Column 11
Height of Opening h	Width of Opening b	Arc Width of Shell Reinforcing Plate W	Upper Corner Radius of Opening r_1	Upper Corner Radius of Shell Reinforcing Plate r_2	Edge Distance of Bolts e	Flange Width ^a (Except at Bottom) f_3	Bottom Flange Width f_2	Special Bolt Spacing ^b g	Number of Bolts	Diameter of Bolts
203	406	1170	100	360	32	102	89	83	22	20
610	610	1830	300	740	38	102	95	89	36	20
914	1219	2700	610	1040	38	114	121	108	46	24
1219 ^c	1219	3200	610	1310	38	114	127	114	52	24

Segundo, se recurre a la tabla 18, donde se obtiene los espesores de la placa de cubierta, pernos y reforzamiento del fondo para el acceso de limpieza.

Tabla 18: Espesores de la placa de cubierta, pernos y reforzamiento del fondo para el acceso de limpieza [18]

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10
Maximum Design Liquid Level, m H	Equivalent Pressure ^a kPa	Size of Opening $h \times b$ (Height $\times$ Width)							
		200 $\times$ 400		600 $\times$ 600		900 $\times$ 1200		1200 $\times$ 1200	
		Thickness of Bolting Flange and Cover Plate t_c	Thickness of Bottom Reinforcing Plate ^b t_b	Thickness of Bolting Flange and Cover Plate t_c	Thickness of Bottom Reinforcing Plate ^c t_b	Thickness of Bolting Flange and Cover Plate t_c	Thickness of Bottom Reinforcing Plate ^d t_b	Thickness of Bolting Flange and Cover Plate t_c	Thickness of Bottom Reinforcing Plate ^e t_b
6	60	10	13	10	13	15	20	16	22
10	98	10	13	11	13	19	25	20	27
12	118	10	13	12	14	21	27	22	29
16	157	10	13	14	16	24	31	25	33
18	177	10	13	15	16	25	33	27	34
19.5	191	11	13	16	17	26	34	28	36
22	216	11	13	17	18	28	36	29	38

Finalmente, se recurre a la tabla 19, donde se obtiene los datos de espesores y alturas de placas de refuerzo del cuerpo para accesorios de limpieza.

Tabla 19: Espesores y alturas de placas de refuerzo del cuerpo para accesorios de limpieza [18]

Thickness of Lowest Shell Course t, t_d^a mm	Maximum Design Liquid Level ^c H m	Height of Shell Reinforcing Plate for Size of Opening $h \times b$ (Height $\times$ Width) mm			
		200 $\times$ 400	600 $\times$ 600	900 $\times$ 1200	1200 $\times$ 1200 ^b
All	< 22	350	915	1372	1830

3.17. Cálculo de cargas de viento en el tanque (estabilidad al volcamiento).

Para ello se recurre a la norma API 650 – sección 5.11, donde se especifica lo siguiente con respecto al cálculo de la estabilidad frente al viento:

3.17.1. Presión de viento.

La estabilidad al volcamiento deberá ser calculada usando las presiones de viento dadas en la sección 5.2.1(k).

k) Viento (W): La velocidad del viento de diseño (V) será:

- la velocidad del viento de diseño de ráfaga de 3 segundos determinada a partir de ASCE 7-05 multiplicada por $\sqrt{I}$, Figura 6-1; o
- la velocidad del viento de diseño de ráfaga de 3 segundos determinada por ASCE 7-10 para la categoría de riesgo especificada por el Comprador (Figura 26.5-1A, Figura 26.5-1B o Figura 26.5-1C) multiplicada por 0.78; o
- la velocidad del viento de diseño de ráfaga de 3 segundos especificada por el Comprador, que será para una ráfaga de 3 segundos basada en una probabilidad anual del 2% de ser excedida [intervalo de recurrencia promedio de 50 años].

A. Presión del viento del diseño (P_{WS} y P_{WR}) usando la velocidad del viento del diseño (V): La presión del viento del diseño en la envolvente (P_{WS}) será de 0,86 kPa $(V/190)^2$, $([18 \text{ lbf/ft}^2][V/120]^2)$ en áreas verticales proyectadas de superficies cilíndricas. El diseño la presión de elevación del viento sobre el techo (P_{WR}) será de 1,44 kPa $(V/190)^2$, $([30 \text{ lbf/ft}^2][V/120]^2)$ en áreas proyectadas de superficies cónicas o doblemente curvas. Estas presiones de viento de diseño están de acuerdo con ASCE 7-05 para la de exposición al viento categoría C. Como alternativas, las presiones se pueden determinar de acuerdo con:

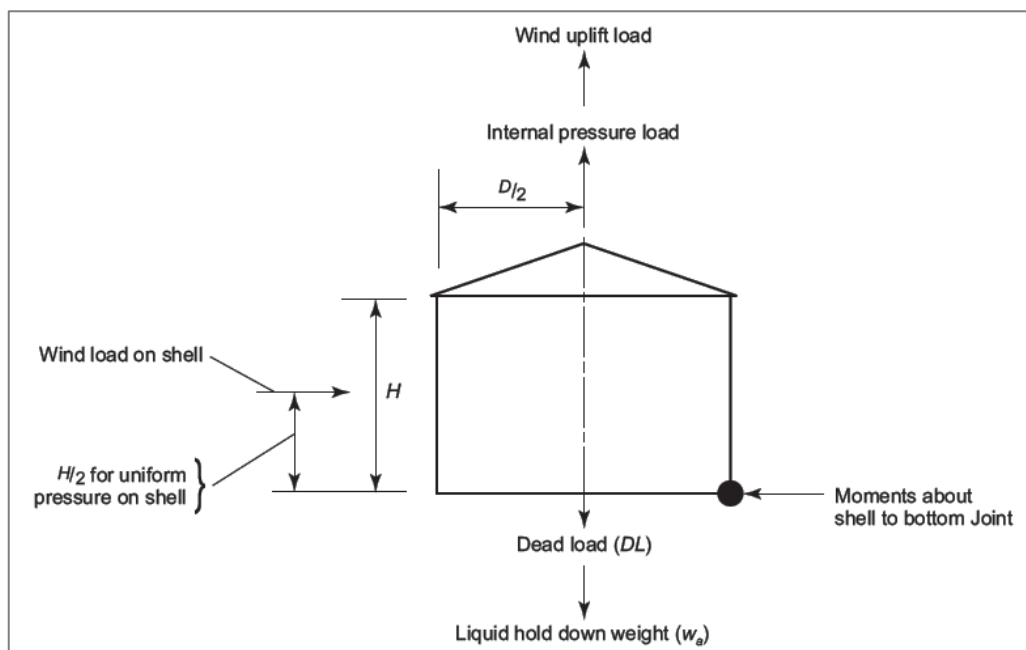
- a) ASCE 7-05 (categoría de exposición y factor de importancia proporcionada por el Comprador); o

- b) ASCE 7-10 (categoría de exposición y categoría de riesgo proporcionada por el Comprador) con la velocidad multiplicada por 0,78 o la presión ASCE 7-10 multiplicada por 0,6; o
 - c) Una norma nacional para las condiciones específicas del tanque que se está diseñando.
- B. La presión de elevación del diseño en el techo (viento más presión interna) no necesita exceder 1,6 veces la presión de diseño P determinada en el punto F.4.1.
- C. Las cargas de viento horizontal ventanas y sotavientos en el techo son conservativamente iguales y opuestas y por lo tanto no se incluyen en las presiones anteriores.
- D. La velocidad del viento de una milla más rápida 1.2 es aproximadamente igual a la velocidad del viento de ráfaga de 3 segundos (V).

3.17.2. Tanques no anclados.

Los tanques no anclados deben cumplir los requisitos de la Norma API 650 – sección 5.11.1 y 5.11.2 según el gráfico indicado en la Figura 36:

Figura 36: Esquemas de cargas de viento en el tanque [18]



Según la Norma API 650 – sección 5.11.2.1, indica que los tanques no anclados, excepto los del techo cónico auto soportado deben reunir los requisitos detallados en el punto 5.10.4 ya mencionado anteriormente y además deben cumplirse los siguientes criterios:

$$1) 0.6M_W + M_{Pi} < M_{DL} / 1.5 + M_{DLR}$$

$$2) M_W + F_P(M_{Pi}) < (M_{DL} + M_F) / 2 + M_{DLR}$$

$$3) M_{WS} + F_P(M_{Pi}) < M_{DL} / 1.5 + M_{DLR}$$

Donde:

F_P = Factor de presión para combinación de cargas, ver sección 5.2.2

M_{Pi} = Momento de vuelco por presión interior

M_W = Momento total de vuelco por viento

M_{DL} = Momento resistente por peso de la envolvente y estructura

M_F = Momento resistente por el peso del líquido almacenado

M_{DLR} = Momento resistente por peso de las planchas de techo y accesorios

M_{WS} = Momento de vuelco por carga sobre la envolvente

3.17.3. Cálculo del momento de estabilidad al volcamiento.

Primero, se procede a analizar los datos que se tiene para iniciar el cálculo de la estabilidad frente al viento:

Diámetro Nominal (D) = 3.2 m

Altura Nominal (H) = 5.4 m

Presión de Diseño = 0 KPa

Tipo Techo = Techo cónico auto soportado

Velocidad de viento rafaga de 3 segundos (V) = 6.12 km/h

I. Cálculo de cargas y momento de vuelco.

Para hallar los datos para cumplir los parámetros indicados en el punto 5.11.2.1 hay que retroceder al punto 5.2.1.k, entonces se tiene:

a) Presión Estática Sobre la Envolvente (Pe).

Según los parámetros de la Norma API 650 - sección 5.2.1, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Pe = 860 * \left(\frac{V}{190}\right)^2$$

$$Pe = 860 * \left(\frac{6.12}{190}\right)^2$$

$$Pe = 0.89 \text{ N/m}^2$$

b) Área Expuesta de la Envolvente.

Se halla calculando el área de la envolvente:

$$A_{TOTAL} = D * H$$

$$A_{TOTAL} = 3.2 * 5.4$$

$$A_{TOTAL} = 17.28 \text{ m}^2$$

Para fines prácticos el área adicional que involucra el área de las escaleras, conexiones, etc. se asume como el 10% del área total de la envolvente, entonces se tiene:

$$A_{ACCESORIOS} = A_{TOTAL} * 10\%$$

$$A_{ACCESORIOS} = 17.28 * 0.1$$

$$A_{ACCESORIOS} = 1.73 \text{ m}^2$$

Se tiene entonces que el área total expuesta es la sumatoria de ambas áreas:

$$A_{EXPUESTA} = A_{TOTAL} + A_{ACCESORIOS}$$

$$A_{EXPUESTA} = 17.28 + 1.73$$

$$A_{EXPUESTA} = 19.01 \text{ m}^2$$

c) Carga de Viento sobre la Envolvente.

Se halla multiplicando la presión estática aplicada sobre la envolvente por el área expuesta de la envolvente:

$$C_{VIENTO} = A_{EXPUESTA} * Pe$$

$$C_{VIENTO} = 19.01 * 0.89$$

$$C_{VIENTO} = 16.92 \text{ N}$$

d) Momento de Vuelco por Carga Sobre la Envolvente (M_{WS}).

Se refiere a la carga de vuelco aplicada sobre la envolvente multiplicada por la mitad de la altura del tanque ya que según la Figura 3.47 ésta se aplica a esta altitud:

$$M_{WS} = C_{VIENTO} * \left(\frac{H}{2}\right)$$

$$M_{WS} = 16.92 * \left(\frac{5.4}{2}\right)$$

$$M_{WS} = 45.68 Nm$$

e) Presión por Succión del Techo.

Según los parámetros de la Norma API 650 – sección 5.2.1, se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_S = 1440 * \left(\frac{V}{190}\right)^2$$

$$P_S = 1440 * \left(\frac{6.12}{190}\right)^2$$

$$P_S = 1.49 N/m^2$$

f) Fuerza de Levantamiento de Techo por Succión.

Se refiere a la presión por succión del techo multiplicada por el área que éste ocupa en el suelo, se calcula usando la siguiente fórmula:

$$F_{LTS} = Area\ tanque * P_S$$

$$F_{LTS} = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) * P_S$$

$$F_{LTS} = \left(\frac{\pi * (3.2)^2}{4}\right) * 1.49$$

$$F_{LTS} = 11.98 N$$

g) Momento de Vuelco por Succión en el Techo.

Se refiere a la fuerza aplicada al centro del tanque por la succión del techo. Se calcula usando la siguiente fórmula:

$$M_{WR} = F_{LTS} * Radio\ del\ tanque$$

Reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$M_{WR} = 11.98 * 1.6$$

$$M_{WR} = 19.16 \text{ Nm}$$

h) Momento Total de Vuelco por Viento.

Se calcula sumando los dos momentos hallados anteriormente:

$$M_W = M_{WS} + M_{WR}$$

$$M_W = 45.68 + 19.16$$

$$M_W = 64.48 \text{ Nm}$$

II. Cálculo de estabilidad del tanque frente al viento.

En esta parte se realiza el cálculo según la Norma API 650 - sección 5.11, el cual hace referencia a los parámetros que debe cumplir el tanque para que sea estable frente al viento:

a) Momento resistente por peso de envoltente y estructura (M_{DL}).

Es el momento generado en el tanque debido al peso de la envoltente, en este apartado aún no se considera el techo por ser una estructura independiente, se calcula usando la siguiente fórmula:

$$M_{DL} = W_{envoltente} * D$$

Se considera que el peso de los accesorios es del 5%.

Donde:

$$W_{envoltente \text{ sin accesorios}} = 29940.90 \text{ N}$$

$$W_{Accesorios} = 1497.05 \text{ N}$$

Reemplazando en la ecuación se tiene que:

$$M_{DL} = W_{envoltente} * D$$

$$M_{DL} = 231437.95 * 3.2$$

$$M_{DL} = 740601.44 \text{ Nm}$$

b) Momento resistente por peso de planchas de techo y accesorios (M_{DLR}).

Es el momento generado en el tanque debido al peso del techo y de sus accesorios, se calcula usando la siguiente fórmula:

$$M_{DLR} = W_{techo} * D$$

Se considera que el peso de los accesorios es del 5%.

Donde:

$$W_{techo \text{ sin accesorios}} = 7388.21 \text{ N}$$

$$W_{Accesorios} = 369.41 \text{ N}$$

Reemplazando en la ecuación se tiene que:

$$M_{DLR} = 7757.62 * 3.2$$

$$\mathbf{M_{DLR} = 24824.38 Nm}$$

c) Peso del líquido resistente por metro lineal (W_L).

Donde, W_L es el peso resistente del contenido del tanque por unidad de longitud de la circunferencia de la cáscara basado en una gravedad específica (G) de 0.7 o la gravedad específica del producto real, la que sea menor, y una altura de la mitad de la altura del líquido de diseño H . Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W_L = \text{Min} \left(70.4HD; 70t_b \sqrt{(F_{by}GH)} \right)$$

Donde:

F_{by} = Límite elástico de la plancha de fondo o anillo perimetral (235 MPa)

G = es la gravedad específica real del líquido almacenado (0.7)

H = es la altura del líquido de diseño (5.2 m)

D = es el diámetro del tanque (3.2 m)

t_b = Espesor de la plancha de fondo o anillo perimetral corroído (6 mm)

Reemplazando:

$$W_L = 70 * 6 * \sqrt{(235 * 0.7 * 5.2)}$$

$$W_L = 12283.83 \text{ N/m}$$

d) Peso total del líquido resistente.

Es la resistencia total debido el peso del líquido almacenado, una vez hallado el peso del líquido resistente por metro lineal se procede a hallar el peso total aplicado en todo el fondo.

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W_{TL} = W_L * \pi * D$$

Reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$W_{TL} = 12283.83 * \pi * D$$

$$W_{TL} = 123490.53 \text{ N}$$

e) Momento resistente por peso del líquido (M_F).

Con el peso total del líquido resistente obtenido se procede a calcular el momento resistente que éste genera, se calcula con la siguiente fórmula:

$$M_F = W_{TL} * R$$

Reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$M_F = 123490.53 * 1.6$$

$$M_F = 197584.85 \text{ Nm}$$

f) Momento de vuelco por presión interior (M_{Pi}).

Debido a que el tanque será para uso con presión atmosférica se tiene que el momento de vuelco por presión interior es cero:

$$M_{Pi} = 0 \text{ Nm}$$

g) Factor de presión para combinación de cargas (F_p).

Es la relación entre la presión interna de funcionamiento normal y la presión interna de diseño, para esta esta condición se considera un mínimo de 0.4. Ambas presiones mencionadas en este apartado son iguales a cero, por lo que se considera el mínimo valor aceptado, entonces:

$$F_p = 0.4$$

Entonces, después de haber calculado todos los parámetros que exige la Norma API 650 – sección 5.11.2.1, se procede a realizar la comparación con los siguientes criterios:

$$1) 0.6M_W + M_{Pi} < M_{DL} / 1.5 + M_{DLR}$$

$$0.6 * 64.48 + 0 < 740601.44 / 1.5 + 24824.38$$

$$\mathbf{38.69 Nm < 518558.67 Nm}$$

$$2) M_W + F_P(M_{Pi}) < (M_{DL} + MF)/2 + M_{DLR}$$

$$64.48 + 0.4 * (0) < (740601.44 + 197584.85)/2 + 24824.38$$

$$\mathbf{64.48 Nm < 493917.53 Nm}$$

$$3) M_{WS} + F_P(M_{Pi}) < M_{DL} / 1.5 + M_{DLR}$$

$$45.68 + 0.4 * (0) < 740601.44 / 1.5 + 24824.38$$

$$\mathbf{45.68 Nm < 518558.67 Nm}$$

Finalmente, el tanque cumple las condiciones de estabilidad frente al viento y no necesita ser anclado.

CAPÍTULO 4:

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se van a analizar los resultados del diseño y calculo obtenidos según la norma API 650, para ello se va a realizar el modelado y la simulación del tanque de almacenamiento de petróleo (diésel 2) de 10000 galones mediante el programa ANSYS 18 (static strutural), en la cual se analizará los esfuerzos y deformaciones para afianzar y garantizar el diseño.

Para el estudio de simulación se utilizaron los programas:

- Autodesk inventor 2019 para el modelado tridimensional.
- ANSYS 18.0 para la simulación estructural.

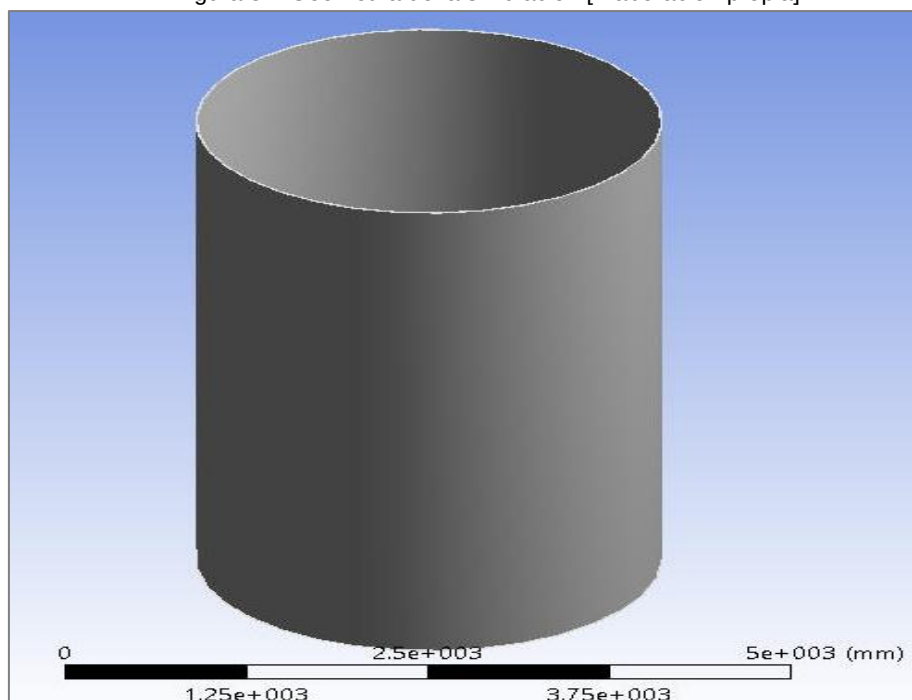
4.1. Modelado de cuerpo y base de tanque.

En el desarrollo de la simulación se utilizaron los parámetros (SI):

- Longitud
- Presión hidrostática

El modelo tridimensional se diseñó en el programa Autodesk inventor 2019 a escala real, con el objetivo de analizar su comportamiento. Para el modelado se consideró la plancha de la envolvente del cuerpo y la plancha de la base del tanque, como se aprecia en la figura 37.

Figura 37: Geometria de la simulacion [Elaboración propia]



Para llevar a cabo la simulación se exporto la geometría tridimensional al formato del programa ANSYS 18. Una vez realizado este procedimiento no se vieron inconvenientes con los paramentos.

4.2. Simulación de cuerpo y base de tanque.

La simulación estructural del tanque se realizó en “Static Structural” del programa ANSYS, por lo cual se sigue los siguientes pasos para una simulación adecuada:

4.2.1. Material.

El material que se utiliza en el diseño es el ASTM A131/A, según los requerimientos de la norma API 650 edición 2016. Los cuales se insertarán en la biblioteca de materiales como se observa en la tabla 20.

Tabla 20: Características del material ASTM A131/A [Elaboración propia]

PARAMTROS	VALORES	UNIDADES
Densidad	7850	Kg/m ³
Resistencia mínima a la Tracción	400	MPa
Resistencia mínima de Fluencia	235	MPa
Módulo de Young	97917	MPa

4.2.2. Mallado.

Las funciones modificadas y los parámetros que se consideraron en el mallado fueron:

Size function (función de tamaño), puesto que nuestro diseño es un cilindro es necesario que el mallado se adapte a este, por esa razón aplicamos un curvature (curvatura), para aumentar la calidad del mallado. también se modificó el tamaño del mallado con un mínimo de 160 mm y máximo de 200 mm como se muestra en la tabla 21.

Tabla 21: Forma y tamaño de mallado [Elaboración propia]

SIZING	
Size Function	Curvature
Min Size	2 mm
Max Face Size	30 mm

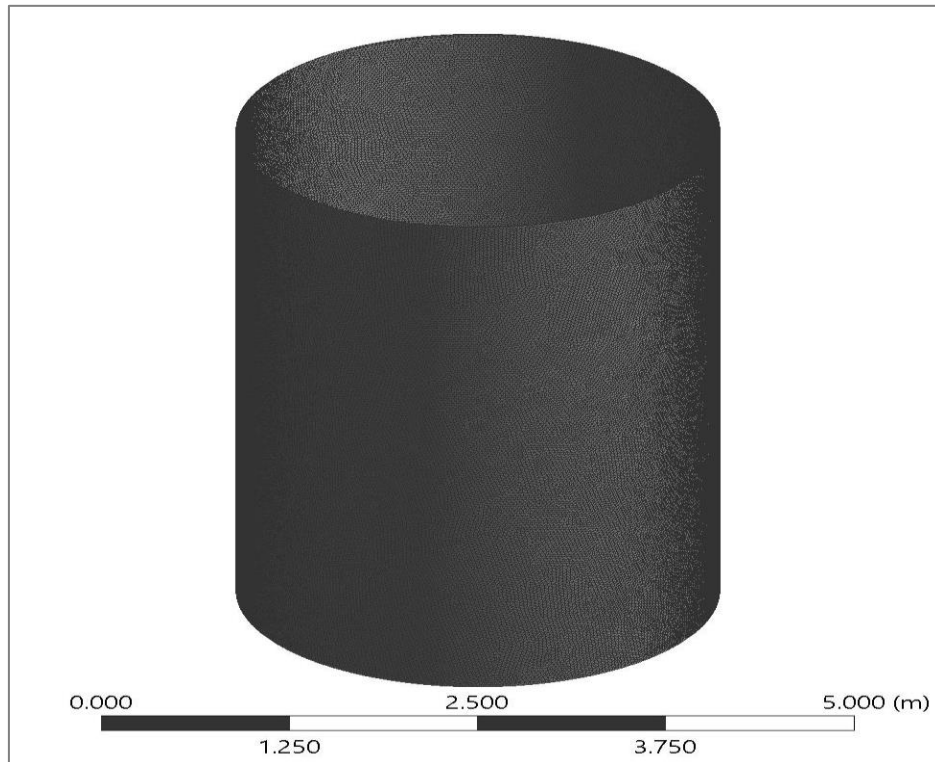
Además, la calidad promedio del mallado fue de 0.6728 y con una cantidad de 358279 elementos. Las características del mallado se visualizan en la tabla 22.

Tabla 22: características del mallado [Elaboración propia]

ESTADISTICAS	
Mallado	Cualidades de los elementos
Calidad Mínima	$5.4 \cdot 10^{-2}$
Calidad Máximo	0.58
Calidad promedio	0.36
Desviación Estándar	$6.73 \cdot 10^{-2}$
Cantidad de Nodos	970698
Cantidad de Elementos	483919

En el mallado no se utilizó ningún tipo método o refinado en específico. El desarrollo del mallado se generó por defecto, excepto la función “Sizing”, donde se modificaron algunas de sus funciones. En la figura 38, se aprecia el mallado del tanque.

Figura 38: Mallado del diseño de simulación [Elaboración propia]



4.2.3. Condiciones de frontera.

Las condiciones de fronteras tomadas en cuenta son:

- Presión hidrostática
- Superficie de soporte

a) Presión hidrostática.

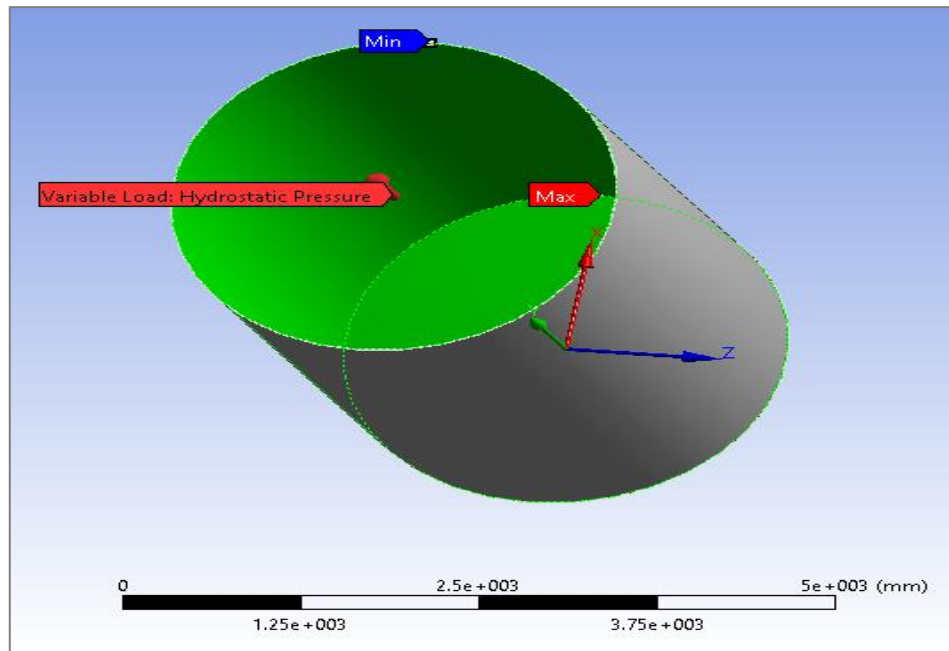
Los valores para las condiciones de frontera se visualizan en la tabla 23. cabe resaltar que el análisis del tanque fue efectuado en las condiciones máximas que especifica la norma API 650.

Tabla 23: valores para la condición de frontera [elaboración propia]

VALORES DE PRUEBA HIDROSTÁTICA		
PARAMETROS	VALORES	UNIDADES
Densidad del fluido	1000	Kg/m3
Gravedad	9.81	m/s2
Altura de diseño del fluido	5.2	m
temperatura	93	°C

Como se muestra en la figura 39, la presión hidrostática se aplicó en las caras interiores del tanque (plancha envolvente y la plancha base).

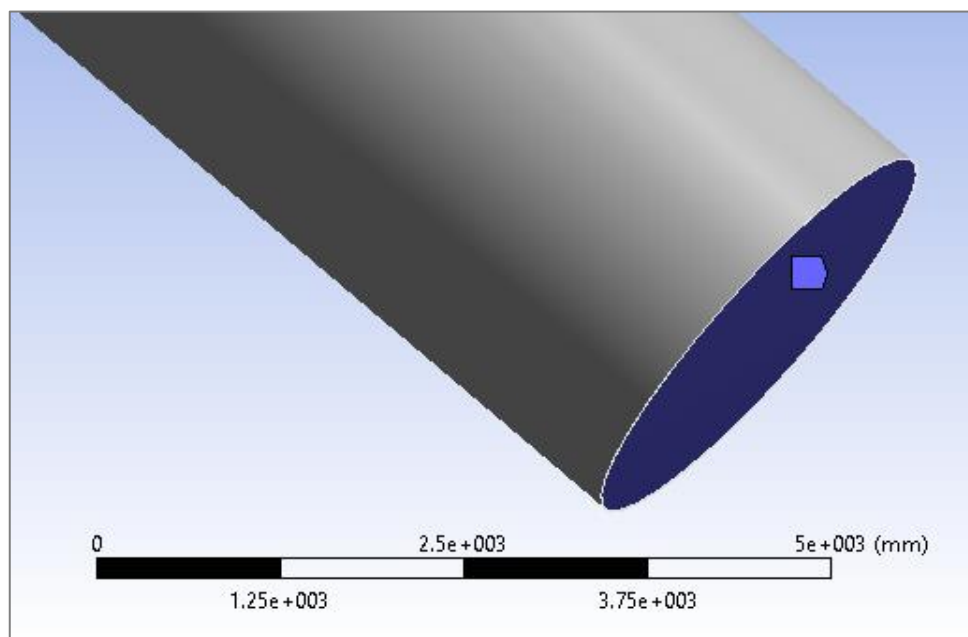
Figura 39: selección de caras para la presión hidrostática [Elaboración propia]



b) Superficie de soporte.

La superficie de soporte asumida es la base del tanque como se aprecia en la figura 40.

Figura 40: Superficie de soporte [Elaboración propia]



4.3. Análisis de la simulación.

Los parámetros de mayor importancia que se tomaron en cuenta fueron:

- Deformación total
- estrés equivalente (von - mises)

4.3.1. Deformación total.

Define en qué punto del diseño del tanque se genera el máximo desplazamiento. En la figura 41 y la tabla 24, se puede apreciar la deformación total del tanque.

Figura 41: Deformacion total del tanque [Elaboración propia]

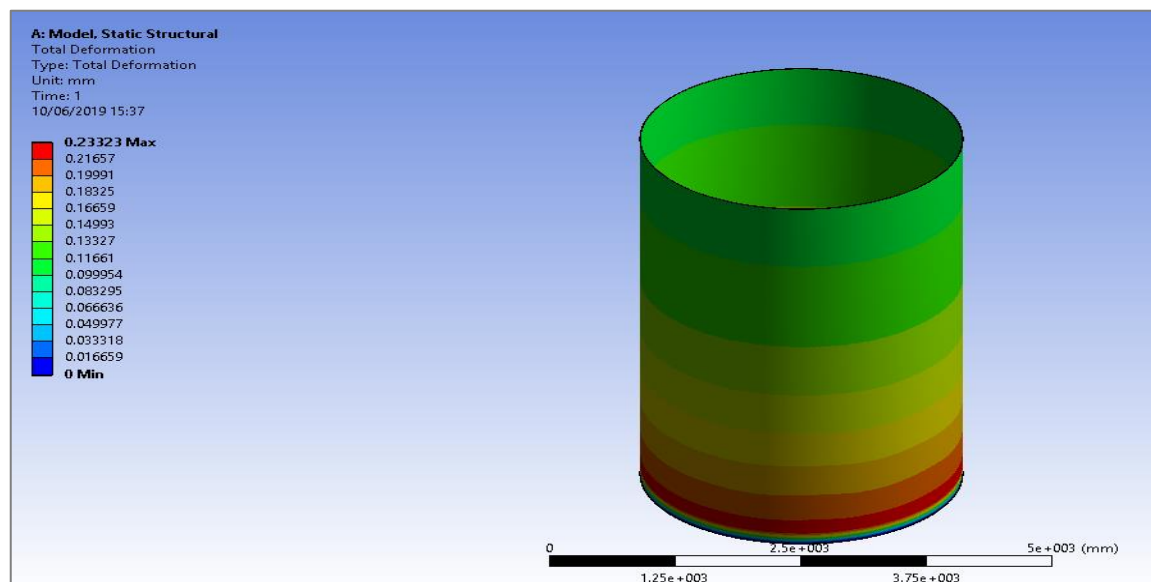


Tabla 24: Maxima y minima deformacion total [Elaboración propia]

DEFORMACIÓN TOTAL (mm)	
máximo	mínimo
0.23323	0.16659

4.3.2. Estrés equivalente (von - mises).

Define si el diseño del tanque es apto para ser fabricado. En la figura 42 y la tabla 25, se puede observar que el valor máximo de von-mises no afecta al diseño, ya que el valor máximo del esfuerzo de prueba de diseño del material ASTM A131/A es de 157 MPa. Se concluye que el diseño es apto para su fabricación.

Figura 42: estrés equivalente (von - mises) [Elaboración propia]

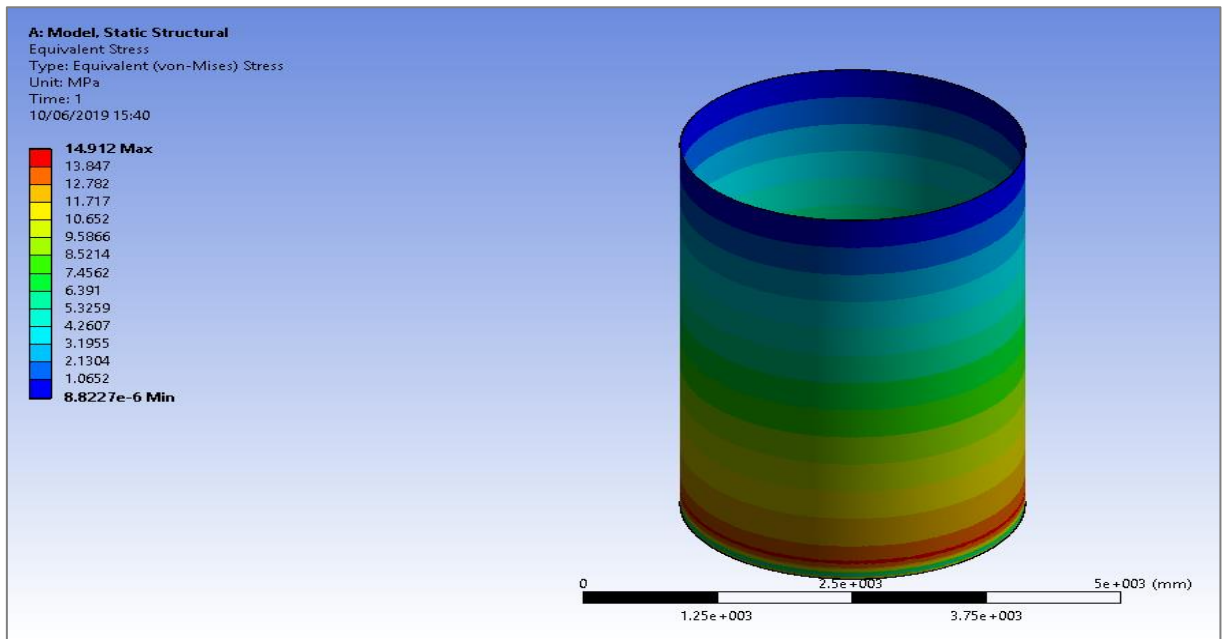


Tabla 25: valores máximos y mínimos de von-mises [Elaboración propia]

VON - MISSES (MPa)	
máximo	mínimo
14.91	$8.82 \cdot 10^{-6}$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. se concluye que el diseño de tanque de almacenamiento de petróleo de 10 000 galones mediante el uso del método de elementos finitos, es una herramienta fundamental que permite garantizar y brindar confianza en el diseño.
2. En los cálculos se pudo determinar los espesores adecuados de las planchas para poder dimensionar el tanque y por consiguiente se desarrolló el diseño óptimo para que trabaje en las condiciones de operación requerida.
3. A través de la simulación en el programa ANSYS 18.0 se pudo comprobar que las deformaciones y los esfuerzos del tanque se encuentran dentro del rango requerido por la norma API 650.
4. Existe una fuerte relación entre el análisis por el método de elementos finitos y el diseño según la norma API 650, cuando se realizó la simulación de la prueba hidrostática, concluyendo que el método sirve como herramienta de apoyo para complementar el diseño.
5. Los resultados de la simulación en condición de prueba hidrostática cumplieron con los requerimientos establecidos en el diseño. Cabe detallar que las posibles fallas en la construcción, así como una mala soldadura no están incluidas en la simulación, ya que el análisis realizado es en condiciones ideal.

Recomendaciones

1. Para avalar el diseño y cálculo del tanque de almacenamiento, es significativo conocer las condiciones de operación como el volumen, temperatura, densidad del líquido, velocidad del viento, y coeficientes sísmicos; las cuales deben ser suministradas por el cliente.
2. Es fundamental tener información de la cimentación del suelo debido a que se encarga de soportar la estructura del tanque y el fluido almacenado, afianzando a que el diseño no fallara cuando trabaje en condiciones de servicio y operación.
3. Para la simulación del tanque se recomienda un mallado refinado ya que ayuda a definir con mayor precisión la distribución de la presión hidrostática, permitiendo obtener resultados satisfactorios en el análisis estructural.
4. Se recomienda que la simulación del tanque se realice en softwares que este calificados para este tipo de diseños, puesto que consideran los factores como la fuerza del viento y movimientos telúricos debido a que dan resultados más precisos.

GLOSARIO

ANILLO O VIROLA: Son las uniones de cada nivel para conformar el cuerpo del tanque de almacenamiento.

API 650: Es la norma que da lineamientos para el diseño y construcción de tanques de acero soldados para almacenamiento de petróleo.

API: American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo), establece las normas sobre el diseño y fabricación en la industria del petróleo.

ASTM: American Society of Testing Materials (Asociación Americana de Ensayo de Materiales), es una asociación que se encarga de probar la resistencia de los materiales.

AWS: American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura), establece métodos para especificar operaciones y procesos de soldadura.

BOQUILLA: Es el orificio en el tanque de almacenamiento para la entrada y salida de un fluido o la instalación de un instrumento de medición.

BRIDA: Elemento que permite el acoplamiento de tuberías facilitando el armado y desarmado.

CARGA DE VIENTO: Es la fuerza ejercida por una masa de aire en movimiento, que provoca una presión en ciertas partes de la estructura del tanque.

CARGA MUERTA: Es la fuerza ejercida debido al peso propio de los elementos del tanque.

CARGA VIVA: Es la fuerza producida por cuerpos externos al tanque, tales como: nieve, lluvia, personas, objetos, etc.

CUERPO O ENVOLVENTE: Es la parte cilíndrica del tanque que está formado por planchas de acero al carbono.

DEFORMACIONES TOTALES: Es el cambio en la forma de la estructura del tanque que se generan cuando se aplican las cargas.

ESFUERZO DE VON MISES: Es un análisis estructural que permite conocer los esfuerzos resultantes debido a las cargas a la cual es sometido el tanque, es una magnitud

física proporcional a la energía de distorsión. Por lo que es usado como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles.

FONDO DEL TANQUE: Es la base del tanque en la cual se apoya el fluido, además está unido al cuerpo mediante una soldadura.

GALONES: Es la unidad de medida del volumen para líquidos que equivale a 3.78533 litros.

JUNTAS: Es la unión de dos piezas de metal por medio de un proceso de soldadura.

MALLADO: Es la división de la geometría analizada en múltiples partes.

PRESIÓN DE DISEÑO: Es la presión considerada para el cálculo del tanque.

PRESIÓN DE OPERACIÓN: Es la presión manométrica a la cual estará sometido el tanque en condiciones normales de trabajo.

PRESIÓN DE VIENTO: Es la presión que ejerce la acción del viento sobre el tanque.

PRESION HIDROSTÁTICA: Es la presión ejercida por un líquido en reposo.

PRUEBA HIDROSTÁTICA: carga debido al relleno del tanque con agua hasta el nivel de diseño del líquido.

TECHO: Es la estructura que se soporta por sí mismo, apoyado en su periferia del último anillo de la envolvente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Osinergmin, “Reporte semestral de monitoreo del mercado de hidrocarburos primer semestre del 2017”, 2017 [En línea]. Disponible en: http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/institucional/estudios_economicos/reportes_de_mercado/rsmmh-i-2017.pdf. [Accedido: 9-abr-2018]
- [2] C. E. M. Del Rosario y O. P. Nairel, “Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento de queroseno con diámetro 80ft x 40ft de altura bajo la norma API 650”, tesis doctoral, Instituto Politécnico Nacional, 2008 [En línea]. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/2840/tesis.pdf?sequence=1>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [3] C. V. G. Gustavo y H. L. J. Fernando, “Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento para nafta con diámetro de 70ft x 30ft de altura bajo la norma API 650”, Tesis doctoral, Instituto Politécnico Nacional, 2008 [En línea]. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/2699/DISENOYCALCULODEUNTANQUE.pdf?sequence=1>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [4] R. Torres Sabalza, “Diseño y evaluación de uniones soldadas por medio de herramienta computacional autodesk simulation multiphysics en tanque horizontal atmosférico ul-142”, Tesis de maestría, Universidad libre de Colombia, 2017 [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10901/9852>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [5] L. O. Jiménez Grijalva y C. E. Maldonado Ávila, “Diseño y construcción de dos tanques de 10000 gal y uno de 6000 gal para almacenamiento de combustible líquido bajo normas UL 58 y UL 1746 para la estación de servicio GAS-PLUS”, Tesis

- de licenciatura, Escuela Politécnica del Ejército, 2008 [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/706>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [6] P. F. García, “Diseño, cálculo y construcción de un depósito industrial de chapa de acero para fluidos”, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, 2016 [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/74580>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [7] A. Morchhale, “Study of Positioning and Dimensional Optimization of Angled Stiffeners Using Finite Element Analysis of Above Ground Storage Tank”, International Journal of Research in Mechanical Engineering, Volume 5, Issue 1, pp. 10-19, 2017 [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/313348703>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [8] C. G. G. Garino, A. E. Mirasso, M. A. Storti y M. E. Tornello, “Evaluación de fallas de tanques horizontales de almacenamiento de fluidos”, Mecánica Computacional, Vol XXXII, págs. 3463-3482, 2013 [En línea]. Disponible en: <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4564/4493>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [9] C. A. De la Cadena Ramos, & P. X. Larrea Esparza, “Diseño de un tanque de almacenamiento de petróleo tipo techo flotante de 100000 barriles de capacidad para la empresa TESCA Ingeniería del Ecuador”. Bachelor's thesis, QUITO, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4943>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [10] A. E. R. Andueza, “Failure pressure and fatigue analysis of the API 12F shop welded, flat bottom tanks”. Doctoral dissertation, Purdue University, 2016. [En línea]. Disponible en: https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/811. [Accedido: 9-abr-2018]
- [11] E. Azzuni, & S. Guzey, “Failure Modes of American Petroleum Institute 12F Tanks With a Rectangular Cleanout and Stepped Shell Design. Journal of Pressure Vessel

- Technology”, 140(6), 061203, 2018. [En línea].
<https://pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [12] G. Sánchez & V. Hugo, “Diseño y cálculo de un tanque para almacenamiento de petróleo para 3000 BBLS”. Bachelor's tesis, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3711>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [13] C. Félix, R. Ismael, N. Argüello, & W. Patricio, “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. Bachelor's tesis, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1251>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [14] A. Aro, “Diseño y cálculo de tanques de almacenamiento (inglesa)”. [En línea]. Disponible en: <http://www.inglesa.com.mx/books/DYCTA.PDF>. [Accedido: 9-abr-2018]
- [15] A. Díaz, “Método de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnético cerrados mediante el método de los elementos finitos”. Tesis, 2000. [En línea]. disponible en: <http://hdl.handle.net/10317/772>. [Accedido: 24-abr-2019]
- [16] A. Coll “Mejora de la calidad de mallas para elementos finitos”. 2003. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3384/31142-3.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. [Accedido: 24-abr-2019]
- [17] D. Ochoa, J. Vivas, E. Santafé, “uso del método de elementos finitos (MEF) para determinación de esfuerzos y deformaciones en un modelo de pozo”. Revista, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/360>. [Accedido: 22-abr-2019]
- [18] API Standard 650, “Welded steel tanks for oil storage”, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2016.

ANEXOS