



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECÁNICA

**VALIDACIÓN DE MATRIZ DE CÁLCULO PARA DISEÑO DE TANQUES API 650 DE
30000 GALONES MEDIANTE SIMULACIÓN ESTÁTICA**

Trabajo de titulación previa a la obtención del

Título de **INGENIERO MECÁNICO**

AUTOR: KEVIN STEVEN ORTIZ SIMBAÑA

TUTOR: CRISTIAN ANDRÉS LEIVA GONZÁLEZ

Quito - Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Kevin Steven Ortiz Simbaña con documento de identificación N° 1750282780 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 21 de enero del año 2025

Atentamente,



Kevin Steven Ortiz Simbaña

1750282780

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Kevin Steven Ortiz Simbaña con documento de identificación No. 1750282780, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor de la Propuesta Tecnológica: Validación de matriz de cálculo para diseño de tanques api 650 de 30000 galones mediante simulación estática, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 21 de enero del año 2025

Atentamente,



Kevin Steven Ortiz Simbaña

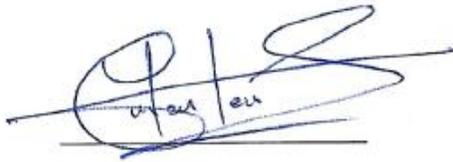
1750282780

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Cristian Andrés Leiva González con documento de identificación N° 1716424476, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación VALIDACIÓN DE MATRIZ DE CÁLCULO PARA DISEÑO DE TANQUES API 650 DE 30000 GALONES MEDIANTE SIMULACIÓN ESTÁTICA:, realizado por Kevin Steven Ortiz Simbaña con documento de identificación N° 1750282780, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 21 de enero del año 2025

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'C. Leiva', written over a horizontal line.

Ing. Cristian Andrés Leiva González, MSc.

1716424476

DEDICATORIA

Primordialmente, desearía entregar esta dedicatoria a mis dos pilares: mi papá, Marcelo Ortiz, y mi mamá, Alicia Simbaña, quienes, durante incontables noches y jornadas de trabajo, me brindaron apoyo moral, palabras de aliento y fuerzas para continuar mi camino. A pesar de las adversidades, siempre tenían una sonrisa y tiempo para mí. No importaba si caía; siempre me levantaban y estaban allí cuando más los necesitaba, siendo mi auxilio y mi lugar seguro.

También quiero dedicar esta obra a mis hermanos, Jordy y Dayra Ortiz, quienes son mi mayor motivo para seguir creciendo día a día, tanto como persona como profesional, con el objetivo de ser un ejemplo de que en esta vida todo es posible con esfuerzo y dedicación. Asimismo, a mis abuelitos, que ya no están conmigo pero que, durante el tiempo que estuvieron presentes, me ayudaron de muchas maneras en mi niñez, inculcándome valores que aún hoy salen a relucir.

Además, quiero mencionar a mis compañeros de clase, quienes no solo contribuyeron a formar otra faceta de mi personalidad, sino que también me ayudaron a tener diferentes mentalidades, ganas de competir y esforzarme más para ser un profesional más capaz. A mi mejor amiga, Alison Tipan, a quien tuve la oportunidad de conocer en esta universidad y que estuvo presente desde el inicio hasta el final, apoyándome moral y psicológicamente en los malos y buenos momentos, creciendo juntos como profesionales.

Kevin Steven Ortiz Simbaña

AGRADECIMIENTOS

Quisiera empezar este agradecimiento nombrando primeramente a Dios, quien, independientemente de la religión, me ha mostrado caminos que me han permitido llegar hasta donde estoy ahora. Su luz es, a veces, la guía que un ser humano necesita para mostrarnos el camino y lograr algo tan hermoso como obtener el título de ingeniera.

También quiero agradecer a mis compañeros de trabajo de Sertecpet S.A. y Energypetrol, quienes me proporcionaron herramientas útiles para poder realizar con labor y eficiencia mi tema de titulación. Su vasta experiencia y conocimientos han sido fundamentales para lograr este objetivo.

Agradezco al Ing. Cristian Leiva por su infinita paciencia hacia mi trabajo, comprendiendo con profesionalismo y dedicación que mis horarios y jornadas de trabajo no me permitían un seguimiento muy cercano, pero siempre eficiente, y por otorgarme oportunidades para culminar este documento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
Introducción	1
Antecedentes.....	1
Justificación.....	3
Objetivos.....	5
Objetivo general.....	5

Objetivos específicos	5
Capítulo I Marco Teórico	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Fundamentación teórica	8
1.2.1 Revisión detallada de la normativa API 650 y otros estándares pertinentes.....	8
1.2.2 Diseño de tanques.....	10
1.2.3 Tabla: Selección de Accesorios y Componentes.....	20
1.2.4 Caracterización de variables de diseño y métodos de validación	22
1.3 Marco conceptual	27
1.3.1 Factores de incertidumbre y sensibilidad	27
1.3.2 Optimización y mejora continua del diseño	27
Capítulo II Metodología de Investigación.....	29
2.1 Descripción detallada de los métodos y técnicas	29
2.1.1 Método de la investigación	29
2.1.2 Enfoque de la investigación	30
2.1.3 Diseño de la investigación.....	31
2.1.4 Tipo de estudio	31
2.2 Procedimiento para estructurar la matriz de cálculo y simulación estática.....	31
2.3 Elaboración de la matriz de validación	31
2.3.1 Selección del material del tanque.....	32
2.3.2 Diseño del cuerpo del tanque	33
2.3.3 Presiones debidas al viento	34
2.3.4 Espesor de la plancha de fondo	34
2.3.5 Cálculo del perfil de coronamiento	35

2.3.6	Análisis por viento	36
2.3.7	Análisis sísmico.....	36
2.3.8	Análisis de deslizamiento.....	37
2.3.9	Análisis del volcamiento	38
2.3.10	Análisis de falla local	38
2.3.11	Proceso de soldadura y tipo de junta.....	40
Capítulo III Resultados y Discusión.....		41
3.1	Presentación de los resultados.....	41
3.1.1	Contraste de resultados.....	55
3.2	Interpretación de hallazgos significativos y comparación con la literatura existente.	56
Conclusiones		59
Recomendaciones.....		61
Bibliografía.....		62
Anexos.....		66
Anexo A.....		66
Anexo B.....		68
Aspectos iniciales para el cálculo		68
Diseño del cuerpo del tanque.....		68
Espesor de la plancha del techo		70
Determinación de la carga de viento.....		71
Presiones debidas al viento		72
Espesor de la plancha de fondo.....		74
Cálculo del perfil de coronamiento.....		74
Análisis por viento		76

Análisis sísmico	76
Análisis de deslizamiento	78
Análisis del volcamiento.....	79
Análisis de falla local.....	80
Determinación de los anclajes	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Matriz de adaptación de la normativa api al estudio [11].	9
Tabla 2.- Matriz de adaptación de la normativa api al estudio [11, 16].	18
Tabla 3.- Criterios de selección para accesorios [11, 16].	20
Tabla 4.- Factor de importancia para tanques de hormigón [14]	26
Tabla 5.- Factor de reducción Ri y Rc [14].	26
Tabla 6.- Caracterización del software SolidWorks.....	28
Tabla 7.- Características para tanques de 30 000 galones según api 650 [11].....	29
Tabla 8.- Resumen de datos [19].	32
Tabla 9.- Resumen de cargas para análisis por viento	36
Tabla 10.- Resumen de cargas para análisis sísmico [19].	36
Tabla 11.- Resumen de cargas para análisis por volcamiento [19]	38
Tabla 12.- Resumen de cargas para análisis por tensión de la compresión.....	38
Tabla 13.- Resumen de cargas para análisis por tensión de la compresión.....	39
Tabla 14.- Características del acero A36 [22].	42
Tabla 15.- Contraste de resultados	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Tanque ventilando [14]	11
Figura 2.- Tanque proceso respiración [12]	14
Figura 3.- Tanque proceso llenado [14]	15
Figura 4.- Elementos que permiten la evaporación [12]	16
Figura 5.- Geometría del tanque para validación	33
Figura 6.- Esquema de aplicación de cargas	39
Figura 7.- Geometría del modelo	40
Figura 8.- Diseño del modelo con accesorios	42
Figura 9.- Sujeción de geometría fija.....	43
Figura 10.- Análisis estático del modelo sujeción rodillo deslizante.....	43
Figura 11.- Carga fuerza F1 (Cargas vivas y Muertas).....	44
Figura 12.- Carga fuerza sísmica	45
Figura 13.- Momento sísmico	45
Figura 14.- Carga debido a la gravedad	46
Figura 15.- Presión hidrostática	46
Figura 16.- Análisis estático (mallado)	47
Figura 17.- Convergencia de malla	48
Figura 18.- Esfuerzo de Von Misses	49
Figura 19.- Esfuerzo de Von Misses (Base del tanque).....	50
Figura 20.- Desplazamiento estático	51
Figura 21.- Desplazamiento estático máximo	51
Figura 22.- Deformaciones unitarias.....	53
Figura 23.- Factor de seguridad del tanque	53
Figura 24.- Factor de seguridad del tanque mínimo	54

RESUMEN

El diseño de tanques de almacenamiento de petróleo de 30,000 galones es una tarea crucial que requiere adherencia a normas internacionales como la API 650 para asegurar la seguridad y eficiencia. Por ende, la validación de la matriz de cálculo a través de simulación estática y su contraste con la norma API 650 se propone como un método riguroso para garantizar la robustez y fiabilidad del diseño. El objetivo de estudio se enmarcó para el diseño de tanques API 650 de 30,000 galones mediante simulación estática. Esta validación garantiza la seguridad, fiabilidad y eficiencia del almacenamiento de petróleo, beneficiando ampliamente a las industrias relacionadas. Los principales hallazgos se enmarcaron en que el diseño del tanque cumplió con requisitos normativos, asegurando espesores adecuados y capacidad estructural. Los resultados del análisis indican que el esfuerzo de Von Mises (tensión máxima) en el tanque es de 53.14 MPa, mientras que la mínima es de 0.0134 MPa. Con un límite elástico del material establecido en 250 MPa, se observa que las tensiones máximas están por debajo de este límite, indicando que el material no ha alcanzado su punto de fluencia y se encuentra en una zona segura de operación. En lo que respecta al desplazamiento, el valor máximo fue de 1.66 mm y un mínimo de $1e-30$ mm, con el máximo desplazamiento ubicado en el manhole. Aunque la norma API 650 no especifica límites exactos de desplazamiento, requiere que el diseño considere la estabilidad y resistencia del tanque bajo condiciones de carga. Un desplazamiento máximo de 1.66 mm parece razonable, pero el análisis indica que el desplazamiento mínimo es de 0.701 mm, lo que no compromete la integridad del tanque. En lo que respecta al factor de seguridad (FDS) del tanque muestra un rango de valores de 5.34 a 6. Según la norma API 650, se requieren ciertos factores de seguridad mínimos para asegurar la integridad estructural bajo diversas condiciones de carga siendo este de 1.41 a 2. Los puntos con valores de FDS bajos pueden representar áreas de preocupación que requieren refuerzo o rediseño para cumplir con las especificaciones de la norma.

Palabras claves: Tanques de almacenamiento, API 650, Matriz de cálculo, SolidWorks

ABSTRACT

The design of 30,000-gallon oil storage tanks is a crucial task that requires adherence to international standards such as API 650 to ensure safety and efficiency. Therefore, the validation of the calculation matrix through static simulation and its contrast with API 650 is proposed as a rigorous method to ensure the robustness and reliability of the design. The study objective was framed for the design of API 650 30,000-gallon tanks through static simulation. This validation ensures the safety, reliability and efficiency of oil storage, largely benefiting related industries. The main findings were that the tank design met regulatory requirements, ensuring adequate thickness and structural capacity. The results of the analysis indicate that the Von Misses stress (maximum stress) in the tank is 53.14 MPa, while the minimum is 0.0134 MPa. With a yield strength of the material set at 250 MPa, it is observed that the maximum stresses are below this limit, indicating that the material has not reached its yield point and is in a safe operating zone. For displacement, the maximum value was 1.66 mm and a minimum of 1e-30 mm, with the maximum displacement located at the manhole. Although API 650 does not specify exact displacement limits, it requires the design to consider the stability and strength of the tank under loading conditions. A maximum displacement of 1.66 mm seems reasonable, but the analysis indicates that the minimum displacement is 0.701 mm, which does not compromise the integrity of the tank. The factor of safety (FDS) of the tank shows a range of values from 5.34 to 6. According to API 650, certain minimum factors of safety are required to ensure structural integrity under various loading conditions and this ranges from 1.41 to 2.

Keywords: Storage Tanks, API 650, Calculation Matrix, SolidWorks

Introducción

Antecedentes

La base de este estudio es la necesidad de verificar la exactitud y confiabilidad de las métricas de diseño utilizadas en el diseño del tanque API 650 de 30 000 galones mediante modelado estático y comparación con la norma API 650, esto se debe a la importancia de asegurar los resultados de la simulación. Y desde esta perspectiva se reflejen los resultados con precisión al respecto de la carga real, las condiciones de presión y otros factores que afectan la integridad estructural de los tanques.

A partir del análisis de los criterios de Granada y Sandoval [1], se identifican desafíos y complicaciones en el diseño de tanques. Por un lado, está la naturaleza inherente de las matrices de cálculo, que pueden basarse en ecuaciones y suposiciones simplificadas que no siempre capturan todas las variables y condiciones del entorno real del tanque. Esta limitación puede llevar a resultados inexactos en el diseño. A la par también se consideran las pequeñas oscilaciones en la resistencia a la tracción o la elasticidad pueden influir significativamente en la integridad del tanque. Sin embargo, si no se considera adecuadamente en la matriz de cálculo, esto puede llevar a diseños imprecisos [2].

Muñoz [3], denota que otro aspecto importante es la correcta definición de los parámetros de modelado (material, espesor, dimensiones, presión, temperatura y carga). Una mala interpretación o un mal ajuste de estos parámetros puede resultar en una sobreestimación de ciertos aspectos del diseño, comprometiendo su precisión y confiabilidad. Por ende, recopilar datos de referencia también es un desafío porque cualquier error en la interpretación de los parámetros o en la medición de las cargas aplicadas al tanque puede resultar en diseños que no cumplan con las condiciones operativas reales.

Finalmente, otro aspecto a considerar radica en el uso incorrecto de fórmulas y ecuaciones que incrementan el riesgo de introducir inexactitudes en la matriz de cálculo y en las simulaciones estáticas, lo que afecta la precisión del diseño final del tanque. Por ende, el análisis de estos antecedentes subraya la complejidad del diseño de tanques y la importancia de validar la matriz de cálculo y las simulaciones estáticas para garantizar diseños precisos y confiables que cumplan con los requisitos de seguridad y normativos, lo que genera producto eficiente para su utilización.

Problema

La problemática de la investigación tiene su aplicabilidad en validar la exactitud y confiabilidad de la matriz de cálculo empleada en el diseño de tanques API 650 de 30 000 galones mediante simulación estática con el propósito de que estos componentes sean diseñados acorde a estándares y su aplicación sea efectiva dentro del mercado. En consecuencia, lograr estos aspectos implica analizar los resultados y contrastar estos con los cálculos manuales precautelando en todo momento la integridad estructural [4].

Dentro de este aspecto los problemas de diseño de tanques API 650 de 30 000 galones pueden surgir debido a varios factores, que incluyen:

- Inexactitud en las suposiciones de la matriz de cálculo: Las matrices de cálculo a menudo se basan en cálculos por medio de ecuaciones y fórmulas. Sin embargo, estos resultados pueden no reflejar completamente las condiciones reales del tanque, lo que conduce a resultados inexactos en el diseño [5]
- Las propiedades de los materiales utilizadas dentro de los tanques se destacan cuando produce variaciones en el desempeño, si estas variaciones no se consideran en la matriz de cálculo, los resultados del diseño pueden carecer de precisión [5]. Esto puede ver reflejado totalmente dentro del contexto de la selección del material.
- Parámetros de simulación: Las simulaciones estáticas pueden definir el comportamiento del tanque de manera muy cercana a la realidad, ajustándose a las necesidades y requerimientos del diseño (cargas puntuales, material, esfuerzos, factor de seguridad). Si no se toman de manera correcta puede conducir a una sobreestimación de ciertos parámetros de diseño, lo que afecta la exactitud del diseño final [5].
- Recolección de datos de entrada: Los datos empleados para alimentar la matriz de cálculo como las simulaciones estáticas, tales como las cargas aplicadas al tanque o las propiedades del material, podrían tener una incorrecta interpretación de las secciones de la norma [6].
- Incorrecto uso de fórmulas y ecuaciones: Los errores durante el proceso de diseño, como errores de cálculo por el mal uso de diagramas y ecuaciones otorgados por la norma, pueden introducir inexactitudes en la matriz de cálculo y las simulaciones estáticas, lo que afecta la precisión del diseño final del tanque [6].

En conjunto, estos problemas pueden llevar a un diseño ineficiente del tanque, donde las dimensiones, materiales o configuraciones no son las adecuadas para endosar la integridad. La no validación de los criterios pertenecientes al diseño puede resultar en tanques que no cumplen con los requisitos de resistencia estructural, durabilidad o seguridad operativa, lo que aumenta el riesgo de fallas y accidentes.

La validación de resultados otorgados por una matriz de cálculo busca confirmar que las deformaciones, esfuerzos y demás parámetros calculados por la matriz sean consistentes con las expectativas de diseño y los requisitos normativos establecidos por el API 650 y otras regulaciones aplicables. Se pretende identificar y resolver posibles discrepancias entre los resultados simulados y los datos de referencia, así como determinar el grado de precisión de la matriz de cálculo a la par de la simulación estática.

Justificación

La ratificación de la matriz de cálculo para el diseño de tanques con base en la norma API 650 mediante simulación estática y su correlación con la normativa puede resolver varios problemas relacionados con la seguridad, eficiencia y cumplimiento normativo en el diseño y operación de estos tanques pues se convalida el diseño *CAD* con los cálculos manuales de los elementos y es de esta manera que los resultados pueden permitir que el modelo diseñado pueda ser optimizado o reestructurado.

Además, de perfeccionar la exactitud del diseño, el cumplimiento normativo, permite asegurar que los tanques diseñados sean elaborados con base en estándares de seguridad y calidad requeridos. Es de esta manera que se puede identificar áreas de mejora con la intención de acrecentar la eficacia y suprimir costos, evaluación de riesgos inesperados, identificar posibles puntos críticos de falla y evaluar la estabilidad estructural [7].

Dentro del mismo contexto, en cuanto al cumplimiento normativo, es crucial que los tanques diseñados cumplan con los estándares y regulaciones establecidos por API; materiales, espesor de la pared, altura y diámetro del tanque, fundación y soporte, soldaduras y juntas, revestimientos y protección contra la corrosión y por último documentación y marcado. Por ende, la validación de

la matriz de cálculo y la simulación estática permite verificar que el diseño cumple con cada uno de los requisitos normativos [6].

Es por medio de este aspecto que la validación proporciona confianza en la seguridad operativa del tanque, lo que es fundamental para prevenir accidentes y garantizar la protección para el medio. Por ende, una matriz de cálculo validada y una simulación estática exacta brindan una base sólida para efectuar una decisión [6].

La investigación permite corregir deficiencias en el diseño, reduciendo riesgos de fallas estructurales y fomentando la innovación tecnológica. Teóricamente, la validación de la matriz de cálculo para tanques de 30 000 galones mediante simulación estática se fundamenta en principios de ingeniería estructural y mecánica. Es esencial emplear modelos matemáticos y simulaciones confiables para garantizar la integridad estructural y evaluar el desempeño de los tanques en distintas condiciones operativas y ambientales [7].

Desde una perspectiva social, la validación de la matriz de cálculo y la simulación estática tiene un impacto directo en la seguridad de las comunidades y el medio ambiente. Los tanques de almacenamiento mal diseñados o que no cumplen con los estándares de seguridad pueden representar un riesgo significativo, así como para el medio ambiente circundante. Por lo tanto, garantizar la precisión y confiabilidad de la matriz de cálculo y las simulaciones estáticas es crucial para proteger a las personas y el entorno en el que operan estos tanques.

Metodológicamente, la validación de la matriz de cálculo y la simulación estática implica el uso de técnicas y herramientas específicas de análisis estructural y simulación. Esto puede incluir la aplicación de software especializado de modelado y simulación, así como la comparación de los resultados. La metodología utilizada debe ser rigurosa y transparente para garantizar la fiabilidad de los resultados y su aplicabilidad en la práctica del diseño de tanques.

Los beneficiarios de la validación de la matriz de cálculo y la simulación estática son diversos e incluyen a: Ingenieros y Profesionales de Diseño: Obtienen una herramienta validada para diseñar tanques que cumplan con requisitos predefinidos, lo que les permite realizar su trabajo de manera más efectiva y confiable. Empresas de Ingeniería y Construcción: Se benefician al poder ofrecer servicios de diseño y construcción de tanques que cumplen con los requisitos normativos y brindan

una mayor seguridad y confiabilidad a sus clientes. Comunidades Locales: Se benefician al tener la tranquilidad de que los tanques de almacenamiento en su área cumplen con normas de seguridad.

La validación de la matriz de cálculo y la simulación estática desempeñan un papel crucial en la protección del medio, al prevenir derrames y fugas de materiales peligrosos que podrían afectar los recursos naturales. Para ellos se enlistan los siguientes objetivos:

Objetivos

Objetivo general

Validar la matriz de cálculo para diseño de tanques API 650 de 30,000 galones mediante simulación estática

Objetivos específicos

- Identificar el alcance de la norma API 650 para la definición de las variables críticas de diseño a usar en la matriz de cálculo.
- Estructurar una matriz de cálculo de acuerdo con los requerimientos de la norma API 650 considerando las variables definidas para el diseño de tanques de 30 000 galones.
- Verificar la matriz de diseño a través de simulación estática con el uso de software especializado.

Capítulo I

Marco Teórico

1.1 Antecedentes

El diseño e implementación de equipos especiales son esenciales en la ingeniería y la investigación aplicada, abordando problemas específicos para satisfacer las demandas industriales. Este enfoque, tanto a nivel nacional como internacional, impulsa el avance tecnológico y el desarrollo económico [8].

En este trabajo, se presentan los antecedentes de cuatro estudios, realizados en Ecuador y en otros países, abordan diversas problemáticas relacionadas con el diseño y la optimización de equipos para la extracción de fluidos, el almacenamiento de líquidos y la producción de derivados de plantas. Cada investigación se centra en resolver necesidades específicas de la industria, empleando metodologías y normativas reconocidas a nivel internacional.

La investigación liderada por Marchena [3], se centró en el diseño de un tanque. El principal objetivo fue establecer una terminal portuaria para gasóleo y *fuel oil*, para asegurar el suministro de buques y petroleros al puerto del Golfo de Algeciras. Zona estratégica conectada con la refinería de CEPSA en Gibraltar-San Roque, en el puerto de Isla Verde. Los objetivos incluyen la implementación de terminales portuarias, diseño de tanques según norma API 650, cumplimiento de la legislación necesaria, distribución de áreas de almacenamiento. Los métodos utilizados incluyen revisión de regulaciones nacionales e internacionales y aplicación de API 650. Los principales resultados de la investigación son el establecimiento de una terminal con capacidad de 100000 m^3 de combustible, el diseño de tanques verticales, el cumplimiento de la legislación de un sistema de protección contra incendios. Los beneficiarios son compañías petroleras como CEPSA, autoridades reguladoras y portuarias, comunidades locales y el medio ambiente, todos los cuales se benefician de infraestructuras seguras y que cumplen con la ley que reducen el riesgo de accidentes [3].

Molina [9] realizó un estudio de producción internacional por medio de la norma API 650 para verificar los procesos de soldadura. El proceso de soldadura utilizado es *FCAW*, que a pesar de ser costoso cumple con los estándares esperados. Los objetivos incluyen validar los procesos de

soldadura, hacer cumplir API 650 para garantizar la calidad y la seguridad y controlar la distorsión del tanque debido a cambios repentinos de temperatura.

Los principales resultados versaron en la verificación exitosa de los procesos de soldadura, el cumplimiento de estándares y seguridad, y el control efectivo de deformaciones en los tanques, asegurando su integridad estructural. Los beneficiarios incluyeron al Proyecto Ampliación Toquepala, trabajadores y soldadores, así como la comunidad local y el medio ambiente, todos beneficiados por la alta calidad y seguridad en las uniones soldadas y la mitigación de riesgos asociados a la contaminación y accidentes [9].

El trabajo de Santistevan [5] para la Universidad Estatal Santa Elena. Este proyecto de investigación tiene como propósito diseñar un tanque de almacenamiento para una edificación, asegurando su óptimo desempeño en términos de confiabilidad y eficiencia durante su periodo útil, cumpliendo con los estándares de calidad establecidos por las normas NT INEN y API 650

El diseño y análisis se basó en parámetros como la producción diaria de crudo, el porcentaje de agua y sedimentos, y la gravedad API del petróleo. La selección del tipo y tamaño del tanque se realizó según los requisitos del diseño y las necesidades del área, incluyendo la instalación de accesorios y la elección de materiales en cumplimiento con normativas nacionales e internacionales. Los objetivos del proyecto abarcaron el diseño de un tanque de almacenamiento eficiente y seguro, garantizando su confiabilidad durante su vida útil y asegurando el cumplimiento de las normas NT EN y API 650.

Los métodos empleados incluyeron el cálculo y diseño estructural en donde los principales resultados fueron un diseño validado mediante análisis estructural en CAD, que garantizó confiabilidad, eficiencia y seguridad, cumpliendo con los estándares de calidad. Los beneficiarios incluyen la industria petrolera ecuatoriana y las comunidades locales, quienes se benefician de la adopción de prácticas seguras y confiables en el almacenamiento de agua para aplicaciones en la industria petrolera [5].

Otro estudio realizado en Ecuador, Núñez [10] que abordó la necesidad de diseñar equipos para la extracción de fluidos supercríticos, ofreciendo una alternativa local a las industrias que suelen adquirir estos equipos en el extranjero a costos elevados. El diseño se basó en normativas

reconocidas como las de la *ASME* sección VIII div 1 y div 2, que permitieron el dimensionamiento mecánico de los tanques extractor, recolector y separador. Utilizando modelado en CAD, se diseñaron geoméricamente los tanques considerando los niveles de producción requeridos, y se evaluó su resistencia mediante simulaciones en condiciones de funcionamiento. Los objetivos del proyecto incluyeron diseñar una planta de extracción eficiente y segura, proporcionar una alternativa local a las industrias y garantizar la seguridad y resistencia de los tanques extractor, recolector y separador mediante normativas y simulaciones [10].

Los principales resultados fueron el diseño seguro y eficiente de los tanques, que demostraron poder soportar la presión. Se emplearon materiales como el Acero Inoxidable Súper Dúplex 2507 y el acero 316 L para asegurar la resistencia e integridad de los tanques bajo altas presiones [10].

1.2 Fundamentación teórica

1.2.1 Revisión detallada de la normativa API 650 y otros estándares pertinentes.

La revisión de la norma API 650 y otros estándares técnicos es esencial para validar la matriz de cálculo en el diseño de tanques de 30 000 galones mediante simulación estática. Este análisis proporciona un marco normativo que detalla los requisitos para el diseño, fabricación, instalación y prueba en tanques, utilizados para productos petrolíferos a presión atmosférica. La normativa aborda materiales, geometría, soldadura, pruebas de inspección y criterios de seguridad, asegurando el cumplimiento técnico y operativo en todas las etapas del proyecto [11].

Además de la API 650, es importante incluir estándares nacionales, internacionales y códigos de construcción relacionados con la industria del petróleo y gas, así como prácticas recomendadas por organizaciones profesionales y académicas, ya que estos también influyen en el diseño y validación de la matriz de cálculo. La **Tabla 1** destaca cómo API 650 establece un marco clave para el diseño y validación de tanques, siendo esencial en estudios de matrices de cálculo.

Tabla 1.- Matriz de adaptación de la normativa api al estudio

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	ADAPTACIÓN AL ESTUDIO
Norma API 650	Establece requisitos mínimos para el diseño, construcción, instalación y prueba de tanques de almacenamiento de acero soldados verticalmente para productos petrolíferos.	Es el estándar principal que rige el diseño de los tanques que se estudian, proporcionando los criterios fundamentales a seguir.
Requisitos de diseño estructural	Define parámetros para la geometría del tanque como: materiales, espesor de la pared, altura y diámetro del tanque, fundación y soporte, soldaduras y juntas, revestimientos y protección contra la corrosión y por último documentación y marcado.	Ayuda a validar la exactitud de la matriz de cálculo al comparar los resultados de la simulación estática con los requisitos de diseño.
Especificaciones de materiales	Establece los materiales aceptables para la construcción de tanques, incluyendo acero al carbono y aleaciones de acero.	Permite evaluar la precisión de los datos de entrada de la simulación, asegurando que se utilicen los materiales adecuados en el diseño.
Procedimientos de soldadura	Describe los requisitos de soldadura, inspección y pruebas	Facilita la validación de los procesos de simulación estática.
Pruebas de inspección	Específica los métodos de inspección no destructiva (NDT) y las pruebas hidrostáticas para verificar la integridad del tanque.	Proporciona criterios objetivos para evaluar la precisión de la simulación estática y la integridad estructural del tanque diseñado.

Fuente: [11].

En resumen, los principios de diseño de tanques API 650 establecen parámetros para certificar la seguridad, calidad y confiabilidad de los tanques de almacenamiento de petróleo y productos petrolíferos, abordando aspectos como el diseño estructural, consideraciones de carga, fabricación, y mantenimiento de elementos.

1.2.2 Diseño de tanques.

El diseño se parte desde la selección de materiales es fundamental en este proceso, ya que los tanques suelen construirse con acero al carbono o aleaciones de acero específicas, elegidas en función de factores como la corrosión, resistencia mecánica, temperatura de servicio y otros requisitos del producto almacenado. Además, se debe considerar el revestimiento interno del tanque para protegerlo contra la corrosión causada por el contenido del petróleo y otros elementos ambientales [3].

Por otro lado, la geometría del tanque, que incluye su diámetro, altura y forma, se determina según la capacidad de almacenamiento requerida, las limitaciones del sitio y los requisitos de seguridad. Los tanques cilíndricos verticales son comunes debido a su eficiencia en términos de espacio y construcción [3]. En la industria petrolera, el acopio de hidrocarburos es esencial para absorber las fluctuaciones entre la producción y la demanda, así como para facilitar un transporte estable y controlado. Sin embargo, evitar las pérdidas por volatilización del petróleo y sus productos durante el almacenamiento es un desafío constante, a fin de reducir el impacto de estas emisiones en el medio ambiente [10].

A pesar de las mejoras en el diseño y la construcción siempre es crucial seleccionar el tipo adecuado de tanque, como los de techo fijo o techo flotante, considerando su eficacia en la reducción de las pérdidas [4]. Los tanques de techo fijo experimentan pérdidas por evaporación que se dividen en pérdida de almacenamiento permanente y pérdida de trabajo [12].

La reducción de estas pérdidas se puede lograr mediante programas de mantenimiento que incluyan inspecciones regulares y la reparación de fugas, así como la implementación de prácticas operativas que minimicen los cambios de temperatura en el tanque y optimicen el rendimiento de las válvulas de alivio de presión [13]. Estas medidas no solo reducen las pérdidas económicas, sino que también

mitigarían el impacto ambiental al evitar la liberación de componentes volátiles en la atmósfera [10].

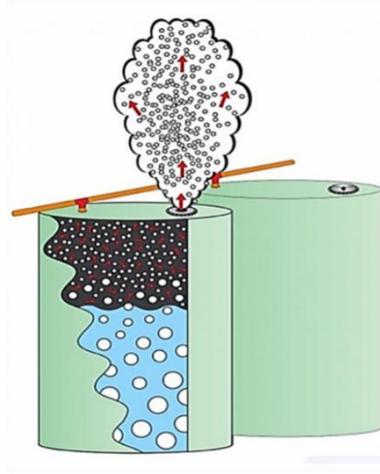


Figura 1.- Tanque ventilando [14]

La **figura 1** denota que, durante el ciclo diario de calentamiento, la carcasa del tanque se ve expuesta a diferentes condiciones solares y cambios térmicos. El lado expuesto al sol recibe radiación directa, reflejada y difusa, además de intercambiar calor con el aire circundante a través de la convección. En contraste, el lado sombreado también experimenta radiación solar difusa y reflejada, junto con intercambios térmicos por convección con el aire ambiental [4]. Durante la noche, tanto el techo como la carcasa del tanque liberan calor al aire circundante solo por convección, sin la influencia directa del sol.

Este ciclo diario de cambios de temperatura provoca fluctuaciones en la temperatura del cuerpo y el techo del tanque, así como el intercambio de calor con la mezcla de vapor y aire en el espacio de vapor del tanque [8]. En esta secuencia se presentan fórmulas comunes utilizadas en el diseño de tanques.

Capacidad del Tanque

La capacidad del tanque se calcula multiplicando el área de la sección transversal del tanque (A) por la altura del líquido (h). El tanque al ser cilíndrico, se utiliza la fórmula:

$$V = A \times h \quad (1)$$

Si el tanque tiene una forma diferente, la fórmula puede variar.

Espesor de Paredes

Este se calcula considerando la presión interna, la presión de diseño, el material utilizado y otros factores [15]. Una fórmula común es la fórmula de Barlow:

$$t = \frac{P \times D}{2 \times S \times F - 0.5P} \quad (2)$$

Donde

- t (mm) espesor de las paredes del tanque.
- P (psi) presión de diseño.
- D (m) diámetro.
- S (Mpa) esfuerzo admisible del material.
- F factor de seguridad

Presión de Viento sobre el Tanque

La presión de viento sobre el tanque se estima utilizando la fórmula:

$$P = 0.00256 \times V^2 \quad (3)$$

Donde:

- P presión de viento en psf (libras x pie cuadrado).
- V velocidad del viento (millas x hora).

Cálculo de la Presión Hidrostática

Se calcula usando:

$$Ph = \rho * g * H \quad (4)$$

Donde

- Ph presión hidrostática (Pa o psi)
- ρ densidad del líquido almacenado (kg/m^3 o lb/ft^3)

- g aceleración (9.81 m/s² o 32.2 ft/s²)
- H altura del líquido en el tanque (m o ft)

Cálculo del Espesor del Fondo del Tanque

Esto se puede determinar considerando la presión del líquido sobre el fondo:

$$t_f = \frac{P_h * D}{2 * S} \quad (4)$$

Donde:

- t_f espesor del fondo del tanque (mm o in)
- P_h presión hidrostática en la base del tanque (Pa o psi)
- D diámetro del tanque (m o ft)
- S esfuerzo permisible del material (Pa o psi)

Cálculo de las Tensiones en la Pared del Tanque

Para asegurar que las tensiones en la pared del tanque sean seguras, se puede usar la fórmula de la tensión circunferencial o tensión de aros:

$$\sigma_c = \frac{P * D}{2 t} \quad (6)$$

Donde:

- σ_c tensión circunferencial (Pa o psi)
- P presión interna (Pa o psi)
- D diámetro (m o ft)
- t espesor de pared (m o in)

Verificación de Estabilidad Contra Viento y Sismo

La estabilidad del tanque se calcula considerando las fuerzas y momentos inducidos por estas cargas. Para el análisis de viento:

$$F_w = \frac{1}{2} C_d * \rho_a * A * V^2 \quad (7)$$

Donde:

- F_w fuerza del viento (N o lb)
- C_d coeficiente de arrastre
- ρ_a densidad del aire (kg/m^3 o lb/ft^3)
- A área expuesta al viento (m^2 o ft^2)
- V velocidad del viento (m/s o ft/s)

Estas son las fórmulas comunes empleadas en el diseño de tanques. Dependiendo de la complejidad del diseño y los requisitos específicos, pueden requerirse fórmulas adicionales o modificaciones a estas. Es importante consultar las normativas y estándares pertinentes, como API 650, para obtener las fórmulas y procedimientos específicos recomendados [4].

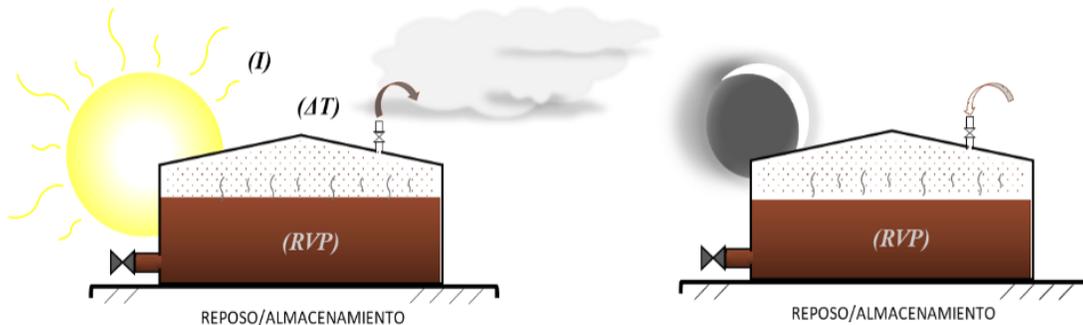


Figura 2.- Tanque proceso respiración [12]

Con base en la **Figura 2**, se puede decir que en el diseño del tanque es necesario tener en cuenta que la transferencia provoca un movimiento convectivo en la mezcla vapor-aire presente en el espacio de vapor. Durante el día, el calentamiento de esta mancha transfiere calor a la superficie

del líquido, aumentando su temperatura [3]. Como resultado de estos mecanismos, el vapor se mueve desde la superficie del líquido al área debajo de la válvula de prioridad y eventualmente pasa a través de la válvula de prioridad cuando la presión excede su ajuste [17].

En cuanto a las pérdidas por trabajo, estas se originan durante el llenado y vaciado del tanque. Durante el llenado, la compresión de la mezcla de aire y vapor en el espacio de vapor del tanque, al aumentar el nivel de líquido, resulta en la apertura de la válvula PV para liberar la mezcla y mantener la presión. La pérdida de trabajo se calcula considerando el desplazamiento de la mezcla de aire y vapor por el líquido que ingresa al tanque, con ajustes según la configuración de la válvula PV para tener en cuenta la condensación que puede ocurrir en configuraciones de ventilación más altas.

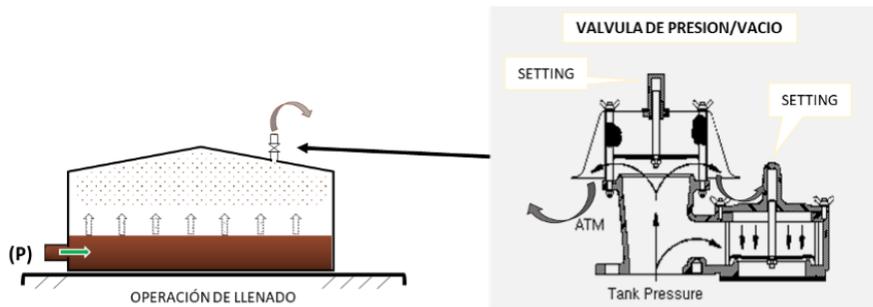


Figura 3.- Tanque proceso llenado [14]

Durante el vaciado del tanque, el descenso del nivel del líquido reduce la presión en el espacio de vapor. Al alcanzar el vacío establecido por la válvula PV, esta permite la entrada de aire. En un vaciado rápido, el volumen de líquido extraído equivale al de aire ingresado al espacio de vapor. Dicha información se connota en la figura 3 mostrada con antelación.

Durante este proceso, el líquido tiende a equilibrarse con el aire entrante por evaporación desde la superficie. El vapor evaporado se mueve hacia arriba por convección y difusión, mezclándose con el aire entrante en el espacio de vapor del tanque. La velocidad a la que el vapor satura el aire entrante durante la evacuación puede reducir la cantidad de aire entrante [3]. Estos mecanismos suelen provocar la estratificación del vapor. No se pierde vapor del tanque cuando se vacía, y cualquier pérdida de vapor posterior se contabiliza en el mecanismo de almacenamiento permanente y pérdida de llenado [6].

Por otro lado, el análisis y transformación, cada líquido almacenado posee una presión de vapor determinada por su temperatura y composición, lo que induce a su evaporación. En condiciones estáticas, se alcanzaría un equilibrio de concentración de vapores sobre la superficie del líquido, deteniendo la evaporación [12]. Los tanques de techo flotante presentan varios mecanismos que contribuyen a estas pérdidas por evaporación:

Pérdida de accesorios de cubierta (*Deck-fitting Loss*): Las penetraciones en la cubierta del techo flotante pueden generar aberturas que permiten la salida de vapores del líquido almacenado [4].

Pérdida en el Sello-Aro Externo (*Rim-seal Loss*): El viento es un factor determinante en la generación de pérdidas de sellado del aro externo del techo flotante, creando diferencias de presión que favorecen la evaporación [4].

Pérdida en la costura de la cubierta (*Deck-seam Loss*): Las uniones en la cubierta flotante pueden no ser completamente herméticas al vapor, convirtiéndose en puntos de pérdida por evaporación [4].

Pérdida por Adherencia en Pared (*Withdrawal Loss*): Durante la extracción del líquido, parte de este queda adherido a las paredes del tanque, exponiéndose a la atmósfera y evaporándose antes de que el área quede nuevamente cubierta [4].

Estos mecanismos de pérdida son influenciados por factores como el viento y la temperatura ambiental, contribuyendo así a la evaporación continua y a las emisiones atmosféricas. La comprensión detallada de estos procesos es fundamental para mitigar las pérdidas y reducir el impacto ambiental asociado al almacenamiento de líquidos en tanques de techo flotante; ver **figura 4**.

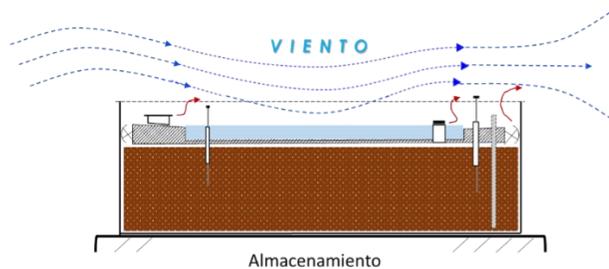


Figura 4.- Elementos que permiten la evaporación [12]

El diseño de tanques es un proceso crucial en la industria petrolera, ya que garantiza la seguridad, eficiencia y confiabilidad en el almacenamiento a largo plazo de este recurso [18]. El diseño estructural debe cumplir con requisitos específicos de resistencia, estabilidad y durabilidad, lo que implica la determinación del espesor de la placa, refuerzos estructurales, diseño de la base y techo, así como la consideración de cargas externas como el viento, la nieve y el suelo. Los procedimientos de soldadura y las especificaciones de las juntas son críticos para garantizar la integridad estructural y hermeticidad. Se deben seguir prácticas de soldadura calificadas y realizar inspecciones exhaustivas para detectar y prevenir defectos que puedan comprometer la seguridad del tanque [6]. A continuación, en la **tabla 2**, se enlistan diferentes tipologías de tanques al respecto de su aplicación dentro del ámbito petrolero.

Tipos de tanques

Tabla 2.- Matriz de adaptación de la normativa api al estudio.

TANQUES PETROLEROS		
Techo Fijo		Techo en forma de cúpula que proporciona mayor resistencia estructural. Utilizado para productos químicos y derivados del petróleo.
Tanques de Doble Pared		Estos tanques tienen una pared interior y otra exterior con un espacio intermedio que puede detectar fugas. Ofrecen mayor seguridad y protección contra derrames.
Tanques Esféricos		Utilizados principalmente para almacenar gases licuados del petróleo (GLP) y otros productos gaseosos bajo presión. Su forma esférica ofrece una distribución uniforme de la presión interna.

Fuente: [11, 16]

Dentro de los criterios para su selección se pueden enlistar las siguientes instancias; al seleccionar un tipo de tanque, es importante considerar los siguientes criterios:

1. Tipo de Producto Almacenado

Líquidos vs. Gases: Los tanques esféricos son más adecuados para gases bajo presión (como GLP), mientras que los tanques de techo fijo y de doble pared son mejores para líquidos, especialmente productos químicos y derivados del petróleo [18].

2. Seguridad y Prevención de Derrames

Riesgo de Derrames: Para productos químicos peligrosos y líquidos que presentan un alto riesgo de derrame, los tanques de doble pared son preferibles debido a su capacidad de detección de fugas y mayor protección [16].

3. Presión Interna

Presión de Almacenamiento: Los tanques esféricos son ideales para productos que necesitan ser almacenados a alta presión, ya que su forma esférica distribuye la presión de manera uniforme [13].

4. Resistencia Estructural

Condiciones Ambientales: Los tanques de techo fijo con una cúpula son más adecuados para condiciones ambientales adversas, proporcionando mayor resistencia estructural [8].

5. Costo y Mantenimiento

Costo Inicial y de Mantenimiento: Los tanques de doble pared pueden ser más costosos debido a su diseño complejo, pero ofrecen mayores beneficios en términos de seguridad y por ende su valor se considera dentro del mantenimiento[16].

Accesorios en el diseño de tanques

Al respecto de los accesorios es importante detallar que cada elemento requiere de un criterio de selección muy particular tal y como se muestra en la **tabla 3**.

1.2.3 Tabla: Selección de Accesorios y Componentes

Tabla 3.- Criterios de selección para accesorios

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	CRITERIOS DE SELECCIÓN	DETALLES ADICIONALES
Accesorios	Elementos adicionales que mejoran la eficiencia y seguridad del tanque.	Selección basada en el tipo de producto almacenado, necesidades de mantenimiento y requisitos de seguridad.	Elementos: Escaleras, barandillas, ventilación. Normas API 650: Detallar los requisitos de diseño y seguridad especificados.
Válvulas	Dispositivos que controlan el flujo de líquidos o gases dentro y fuera del tanque.	Considerar el tipo de producto, presión de operación, material de construcción y compatibilidad química.	Tipos: Válvulas de bola, válvulas de mariposa, válvulas de compuerta. Normas API 650: Compatibilidad con las normas de presión y temperatura del tanque
Ingresos	Puntos de entrada para llenar el tanque con el producto almacenado.	Dimensionar según la capacidad del tanque, tasa de llenado requerida y tipo de conexión necesaria.	Tipos de Conexiones: Bridadas, roscadas, soldadas. Normas API 650: Cumplimiento con los estándares de entrada y salida, asegurando la estanqueidad y seguridad.

Tomas	Puntos de salida para extraer el producto del tanque.	Selección basada en la capacidad de descarga, presión de operación y tipo de producto.	Consideraciones: Prevención de fugas, facilidad de acceso. Normas API 650: Asegurar que las tomas estén diseñadas para la presión y temperatura del producto almacenado.
Sensores	Dispositivos que monitorean parámetros como nivel, presión y temperatura.	Elegir sensores compatibles con el producto almacenado, precisión requerida, y condiciones ambientales.	Tipos: Sensores de nivel (flotadores, radar), sensores de presión, termopares. Normas API 650: Compatibilidad con el sistema de control y monitoreo del tanque, resistencia a condiciones ambientales.
Medidores	Equipos que miden la cantidad de producto dentro del tanque.	Selección según la precisión requerida, tipo de producto y métodos de medición (por ejemplo, ultrasonido, radar).	Tipos: Medidores de flujo, medidores de nivel (ultrasonido, radar). Normas API 650: Asegurar precisión y fiabilidad en la medición, compatibilidad con el tipo de producto almacenado.

Fuente: [11, 16]

1.2.4 Caracterización de variables de diseño y métodos de validación

Este es un proceso fundamental en la ingeniería de tanques de almacenamiento de petróleo. Esto implica determinar qué aspectos del diseño son más significativos para el rendimiento y la seguridad del tanque, así como desarrollar métodos para verificar la eficacia de estos diseños.

Las variables críticas de diseño pueden incluir aspectos como la resistencia estructural del tanque, la selección adecuada de materiales, la capacidad de almacenamiento, la eficiencia energética y la minimización de pérdidas por evaporación. Identificar estas variables implica comprender los requisitos específicos del proyecto, las regulaciones aplicables y los estándares de la industria, así como considerar los riesgos potenciales y las condiciones operativas esperadas.

Una vez que se hayan identificado las variables críticas de diseño, se deben establecer métodos de verificación que concuerde con los requisitos establecidos y funcione acertadamente. Estos métodos pueden incluir pruebas de laboratorio, simulación por computadora, análisis de elementos finitos, pruebas de prototipos, revisión de literatura técnica y comparación con diseños similares previamente validados.

Es importante que los métodos de validación sean robustos y proporcionen resultados precisos y confiables. Algunos de ellos se destacan a continuación [19]:

- **Resistencia estructural:** Es clave para que el tanque soporte las cargas mecánicas durante su vida útil, incluyendo el peso del líquido y presiones externas como viento o sismos. Su diseño debe seguir normas específicas, como API 650, para garantizar seguridad e integridad estructural.
- **Selección de materiales:** La durabilidad y resistencia química dependen de materiales como acero al carbono, acero inoxidable o plásticos reforzados. La elección considera factores como la corrosión, abrasión, naturaleza del líquido y costos.
- **Capacidad de almacenamiento:** Determina el volumen máximo seguro y depende del tamaño, forma y altura del tanque. Es importante dimensionar el tanque para satisfacer necesidades actuales y futuras, incluyendo el crecimiento de producción.
- **Eficiencia energética:** Busca reducir pérdidas de energía, como evaporación o calor, mediante aislamiento térmico, cubiertas herméticas y recuperación de calor.

- **Minimización de pérdidas por evaporación:** Diseños como techos flotantes y sistemas de sellado reducen pérdidas en tanques de petróleo, mejorando eficiencia, reduciendo costos y minimizando impacto ambiental [14].

Diseño de placa, bases y soportes

Las consideraciones para el diseño de placa base, soportes y tapas según la API 650 son cruciales para la seguridad de los tanques de almacenamiento [8]. Esta información se destaca a continuación:

Placa Base

La placa base es la fundación sobre la cual se monta el tanque, distribuyendo las cargas del tanque y su contenido al suelo. En este tema es crucial considerar el espesor y material, la preparación del suelo, drenaje y aislamiento.

Espesor y material

Espesor: capacidad de carga y el peso

Material: Generalmente acero

Preparación del Suelo

Nivelación y Compactación: El suelo debe ser nivelado y compactado.

Base de Concreto: Puede ser necesaria una base de concreto para mejorar la estabilidad y la distribución de la carga.

Aislamiento

Barreras Contra Humedad: Uso de materiales impermeables para prevenir la entrada de humedad desde el suelo hacia la placa base.

Soportes

Los soportes son estructuras que sostienen el tanque y distribuyen su carga de manera uniforme [13]. Para su desarrollo es necesario considerar los soportes verticales; utilizados para tanques

cilíndricos verticales y anillos de Refuerzo; para tanques horizontales, proporcionando estabilidad lateral.

Material y Diseño

Material: Acero estructural compatible con el material del tanque.

Diseño: Calculado para soportar el peso del tanque y las fuerzas externas (viento y sismos).

Distribución de Cargas

Uniformidad: Los soportes deben distribuir la carga de manera uniforme para prevenir puntos de estrés concentrado [18].

Corrosión

Protección Anticorrosiva: Los soportes deben estar protegidos contra la corrosión, especialmente en ambientes agresivos [18].

Tapas

Las tapas son las cubiertas superiores del tanque, que pueden ser fijas o flotantes dependiendo del diseño del tanque y su uso [2]. En este caso es primero considera el Tipo de Tapas; como por ejemplo tapas fijas: Generalmente utilizadas en tanques de almacenamiento de líquidos no volátiles. También, existen tapas flotantes; utilizadas en tanques que almacenan líquidos volátiles para reducir las emisiones y la evaporación.

Material y Diseño

Material: Acero compatible con el contenido del tanque y resistente a la corrosión.

Diseño: Debe considerar la presión interna y externa, así como las condiciones ambientales [3].

Sistemas de Sellado

Sellos de Seguridad: Para prevenir fugas y emisiones, especialmente en tapas flotantes.

Accesibilidad

Escotillas y Accesos: Deben diseñarse para permitir inspección y mantenimiento seguro.

Refuerzos

Refuerzos Estructurales: Necesarios para soportar cargas adicionales como equipos, nieve o personas.

El diseño de tanques según API 650 requiere identificar y comprender variables clave para garantizar seguridad, durabilidad y eficiencia. Considerar cuidadosamente estas variables durante el diseño y validación asegura el cumplimiento de estándares operativos, ambientales y de seguridad. Además, identificar aspectos críticos y establecer métodos de verificación son pasos fundamentales para lograr un tanque que satisfaga los requisitos de calidad, rendimiento y seguridad: La carga sísmica y la presión del viento son variables que abordan un impacto significativo en la seguridad y estabilidad del tanque. Aquí se desarrolla la importancia y consideraciones de cada una:

Carga Sísmica

Es fundamental garantizar: seguridad e integridad estructural de los tanques. Esto, debido a su tamaño y contenido, están sujetos a fuerzas sísmicas significativas durante un terremoto. Estas fuerzas pueden causar desplazamientos y vibraciones que impactan la estructura del tanque y sus componentes. El cálculo de la carga sísmica implica considerar el peso total del tanque, incluyendo el contenido líquido y las estructuras asociadas, así como los coeficientes sísmicos específicos que reflejan la intensidad del evento sísmico y las características del suelo.

El movimiento del suelo está representado por un espectro de respuesta elástica, que puede obtenerse de terremotos reales registrados en el sitio o, como en este estudio, por analogía con sitios de suelo y características sísmicas conocidas. El factor de importancia permite al diseñador aplicar un FS basado en el tipo de líquido almacenado en el tanque, como se describe en la Tabla 4. Además, los factores de reducción de respuesta RWC y RWI ayudan a reducir el espectro elástico al rango inelástico, dependiendo de la flexibilidad de su estructura. Estos factores de reducción se abordan con base en las **Tablas 4 y 5**.

Tabla 4.- Factor de importancia para tanques de hormigón

FACTOR DE IMPORTANCIA	
III Tanques que albergan materiales peligrosos	1.5
II Tanques que deben ser funcionales después de un terremoto o son parte de líneas de vida	1.25
I Que no están en el grupo I y II	1

Fuente: [14]

Tabla 5.- Factor de reducción Ri y Rc

FACTOR DE REDUCCIÓN R		
Descripción	Ri	Rc
Tanques anclados, flexibles	3.25	1
Tanques fijos o con bisagras en su base	2	1
Tanques sin Anclajes	1.5	1
Tanques sobre pedestales	2	1

Fuente: [14]

- Seguridad Estructural: Las cargas sísmicas representan las fuerzas generadas por movimientos sísmicos, los cuales pueden ser catastróficos si no se consideran adecuadamente en el diseño del tanque.
- Prevención de Fallas: Un diseño de tanque robusto frente a cargas sísmicas puede prevenir colapsos, derrames y otros incidentes que podrían resultar en daños a la propiedad, lesiones o pérdidas de vidas.
- Zona Sísmica: La ubicación del tanque determina la intensidad de las cargas sísmicas. Es esencial conocer la zona sísmica específica y calcular las cargas en consecuencia.
- Coeficiente Sísmico: El coeficiente sísmico (a) varía según la ubicación y la clasificación de la zona sísmica.

- Masa Efectiva: La masa efectiva del líquido influye en la carga sísmica. Se calcula considerando la densidad del líquido y la altura del nivel de llenado del tanque.

1.3 Marco conceptual

1.3.1 Factores de incertidumbre y sensibilidad

Estos parámetros permiten analizar las cargas aplicadas y las condiciones de contorno, cuya variabilidad puede surgir debido a la variación en las propiedades del material, imprecisión en la estimación de las cargas, o simplificaciones y suposiciones realizadas en el modelo de análisis [6].

De igual manera es importante acotar que la sensibilidad de los parámetros se refiere a la influencia que tiene un cambio en un parámetro particular en los resultados del análisis estructural. La variabilidad en las condiciones de carga, las propiedades del material y los errores humanos en la recopilación de datos son aspectos que introducen incertidumbre en el análisis. Identificar y mitigar estas incertidumbres es esencial para garantizar la seguridad y el rendimiento adecuado de las estructuras en servicio [20]. Considerar los factores de incertidumbre y sensibilidad que pueden afectar la precisión de la simulación estática y la matriz de cálculo [7]. En el diseño de tanques de almacenamiento, es fundamental considerar factores de incertidumbre y realizar análisis de sensibilidad para garantizar la seguridad y fiabilidad del diseño. Algunos de ellos se enlistan:

1.3.2 Optimización y mejora continua del diseño

La optimización del diseño en ingeniería estructural es un proceso que busca maximizar la eficiencia, rendimiento y economía de las estructuras, mediante la identificación y aplicación de mejoras en su diseño, materiales, métodos de construcción y operación.

El CAD desarrollado por Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Este programa se utiliza principalmente para el diseño 3D de piezas, ensamblajes y dibujos técnicos en una variedad de industrias, como la ingeniería mecánica, el diseño de productos, la fabricación y la arquitectura. SolidWorks ofrece herramientas avanzadas de modelado sólido que permiten a los usuarios crear y modificar geometrías complejas con facilidad [21]. Una explicación un poco más profunda al respecto del software se detalla en la **tabla 6** expuesta a continuación.

Tabla 6.- Caracterización del software SolidWorks

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Modelado 3D	Permite crear modelos 3D de piezas y ensamblajes con herramientas intuitivas y versátiles.
Simulación	Proporciona capacidades de simulación para interpretar el comportamiento del sistema.
Generación de planos	Facilita la creación de planos de fabricación y documentación técnica a partir de modelos 3D.
Integración con <i>CAD/CAM</i>	Se integra con sistemas de fabricación asistida
Bibliotecas de materiales	Incluye una amplia gama de materiales predefinidos para asignar propiedades a los modelos.
Interfaz intuitiva	Tiene una interfaz fácil de usar
Colaboración	Facilita la colaboración entre equipos mediante la compartición de archivos y la visualización en 3D.

Además, cuenta con características para la simulación de movimientos, análisis de tensiones, generación de planos de fabricación, entre otras funcionalidades que facilitan el proceso de diseño. Es ampliamente utilizado por profesionales y empresas gracias a su capacidad para mejorar la productividad, la precisión y la eficiencia en el diseño y la ingeniería [21]. Por ende, su aplicación dentro de la presente investigación resulta muy importante y eficiente.

Capítulo II

Metodología de Investigación

En este apartado se enlista la metodología empleada para la consecución de la presente investigación. Dentro de este aspecto se analiza el método, enfoque, diseño, tipo de estudio y por último la fase de desarrollo y simulación.

2.1 Descripción detallada de los métodos y técnicas

2.1.1 Método de la investigación

La normativa API 650 implicó el análisis detallado de los requisitos y directrices establecidas por esta normativa para el diseño de tanques. Esto incluyó aspectos como los materiales, dimensiones, soldaduras, inspecciones, entre otros. El estudio experimental se llevó a cabo mediante simulaciones estáticas utilizando software especializado como SolidWorks. Estas simulaciones permitieron evaluar el rendimiento del diseño de los tanques bajo diferentes condiciones operativas y ambientales, identificando posibles áreas de mejora y validando la matriz de cálculo propuesta. Los parámetros expuestos en la **tabla 7**. descrita a continuación son los estándares mínimos para el diseño de tanques.

Tabla 7.- Características para tanques de 30 000 galones según api 650

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Capacidad del Tanque	30 000 galones (aproximadamente 113 562 litros)
Material	Acero al carbono A-36 cumpliendo con las especificaciones.
Diámetro del Tanque	Calculado según la capacidad y la altura deseada, típicamente en el rango de 15-20 pies (4.5-6 metros)
Altura del Tanque	Determinada en función del diseño específico y la capacidad; similar al diámetro para mantener proporciones equilibradas
Espesor de la Pared	Determinado por la fórmula de la presión de diseño. Ver ecuación 1
Espesor del Fondo	Calculado considerando la presión del líquido en el fondo. Ver ecuación 2
Presión de Diseño	Hasta 2.5 psi (17 kPa), ya que es un tanque atmosférico

Tipo de Techo	Techo fijo auto soportado, conforme a los requisitos de diseño del API 650
Ubicación	de Especificada según las necesidades operativas y los refuerzos requeridos alrededor de las aberturas
Tubuladuras	
Cargas de Viento y Sismo	Cumplimiento con los apéndices E (cargas de viento) y F (cargas sísmicas) del API 650 (Ver anexo A)
Revestimiento	y Revestimientos internos y externos según especificaciones para prevenir la corrosión
Protección	
Inspección y Pruebas	Pruebas hidrostáticas y no destructivas de las soldaduras; inspección periódica según el API 650

Fuente: [11]

Es necesario recordar que para asegurar el cumplimiento con los apéndices E y F del API 650, se deben seguir estos pasos:

- **Determinación de Datos Locales:** Obtener los datos específicos de viento y sismo para la ubicación del tanque.
- **Cálculos Estructurales:** Realizar los cálculos necesarios para determinar las fuerzas de viento y sismo.
- **Diseño Estructural:** Diseñar las estructuras del tanque para resistir las fuerzas calculadas, asegurando que se mantenga la integridad estructural bajo las cargas aplicadas.
- **Revisión y Verificación:** Revisar y verificar los cálculos y diseños para garantizar que cumplan con las directrices de la norma.

2.1.2 Enfoque de la investigación

El enfoque práctico del diseño de tanques API 650 prioriza la seguridad y eficiencia, cumpliendo con normativas y proponiendo soluciones técnica y económicamente viables. Se enfatiza la aplicación de resultados en diseños reales de tanques para productos petrolíferos, asegurando su utilidad en contextos prácticos.

2.1.3 *Diseño de la investigación*

La estructuración de la matriz de cálculo se basó en una comprensión profunda de los datos de diseño determinados por la normativa API 650. Se identificaron y definieron las cuantificaciones clave que influyen en el diseño, como la capacidad, la presión de diseño, entre otros. Las simulaciones estáticas se planificaron y ejecutaron meticulosamente para validar la matriz de cálculo desarrollada. Esto implicó la modelización del tanque y la aplicación de cargas y condiciones ambientales para evaluar su comportamiento y rendimiento en diferentes escenarios.

2.1.4 *Tipo de estudio*

El estudio experimental se destaca y/o orienta en la realización de simulaciones estáticas para validar la matriz de cálculo propuesta. Este enfoque permitió obtener datos cuantitativos y cualitativos sobre el rendimiento del diseño de los tanques bajo condiciones de cargas estáticas, variación de temperatura, presión interna y externa, terremotos y efectos del viento, corrosión. Además del componente experimental, se incluyó una revisión documental para comprender en profundidad los lineamientos de la norma API 650. Esto proporcionó un marco teórico sólido para fundamentar el diseño y la validación de la matriz de cálculo.

2.2 Procedimiento para estructurar la matriz de cálculo y simulación estática.

El proceso para estructurar la matriz de cálculo y llevar a cabo la simulación estática se desarrolló mediante una serie de pasos metodológicos específicos. Inicialmente, se realizó una recopilación y revisión exhaustiva de los requisitos de diseño establecidos en la normativa API 650 (ver tabla 7).

Nota: Para revisar los parámetros de diseño consultar Anexo A y Tabla 7. mostrada en la presente investigación.

2.3 Elaboración de la matriz de validación

Después de analizar los requisitos de diseño, se desarrolló una matriz de diseño que incluía variables clave como dimensiones, materiales, cargas y condiciones ambientales. A partir de esta matriz, se desarrollaron modelos de análisis estructural 3D detallados para simular condiciones operativas de la vida real, como presión interna, aire y temperatura. Utilizando software especializado como SolidWorks, se realizó un modelado estático de elementos finitos para estimar tensiones, deformaciones y desplazamientos. Este análisis proporcionó información sobre el

comportamiento estructural del yacimiento respaldado por cálculos de energía de deformación física.

2.3.1 Selección del material del tanque

Los cálculos se realizaron conforme a la norma API 650, incluyendo el diseño sísmico según el Apéndice E y la Norma NCh 2369 of. 2003, detallándose las especificaciones del material del tanque: el acero A-36, empleado en planchas de hasta 40 mm; el acero A-131 en sus grados A, B, C y EH36, con espesores de hasta 44.5 mm según el grado; el acero A-283, versátil para usos estructurales y tanques, con espesores de hasta 25.4 mm; el acero A-516, ideal para temperaturas moderadas en grados 55 a 70 con espesores hasta 38 mm; y los aceros A-53 y A-106 en grados A y B, usados principalmente en tuberías [4].

Considerando la aplicación del tanque, se seleccionó el acero A36 por su resistencia estructural, disponibilidad y costo. Según la norma, este material es adecuado para planchas de hasta 40 mm, pero se estimó que los espesores no superarían los 12 mm, dado que la temperatura mínima del sitio es de 19°C. Por ello, el diseño se realizó con un espesor máximo de 12.5 mm y una temperatura de 30°C. Una vez definido el material, se establecieron los datos iniciales del análisis, como se muestra en la **tabla 8**.

Tabla 8.- Resumen de datos

Dimensiones	Valores
Altura del Manto (m):	5,86
Altura del llenado (m):	4,68
Diámetro interno (m):	4,94
Volumen Nominal (m³):	112
Volumen útil (m³):	90
Tipo de techo:	Cónico soportado
Ángulo inclinación Techo-Manto (grad):	10
Número de anillos del casco:	4
Diámetro y N^o de Pernos de Anclaje (in):	1
Número de Pernos de Anclaje:	12
Espesor planchas manto:	
N.º Anillo	Espesor a utilizar (mm)
1º	6

Fuente: [19]

La **tabla 8** mostrada con antelación describe los datos de entrega del modelo para su diseño y por supuesto la geometría para el análisis. Tal y como lo ejemplifica la **figura 5**.

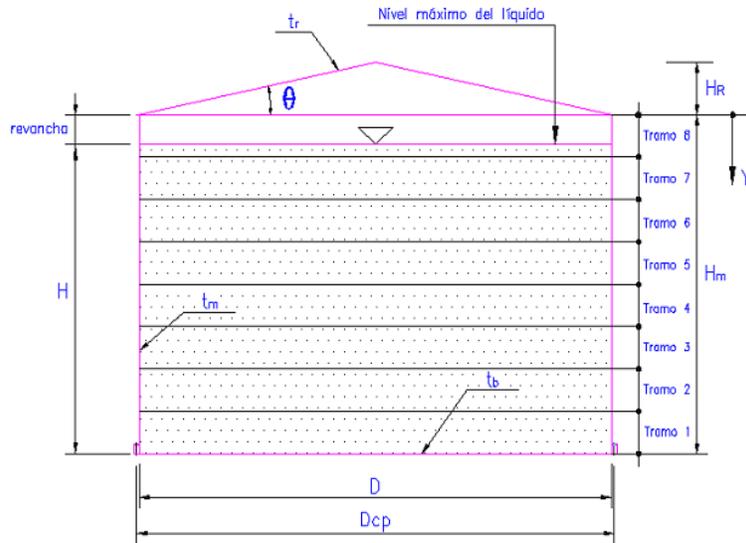


Figura 5.- Geometría del tanque para validación

Establecidas los datos de inicio para el diseño del modelo, se adopta el procedimiento generado por la matriz de cálculo. En este punto como segundo paso se abordan los espesores. En consecuencia, se abordan las condiciones del sitio (sitio meteorológico Inamhi) y dimensiones. Tal es el caso de la presión, temperatura, nivel de precipitación, humedad relativa, altura del casco, altura de llenado e inclusive la inclinación del techo. Para verificar los valores revisar el anexo B.

2.3.2 *Diseño del cuerpo del tanque*

En este punto se detallan las condiciones de diseño para tanques con las características descritas, teniendo en cuenta factores como temperatura del metal (temperatura ambiente), capacidad, ubicación, densidad del líquido, tolerancia a la corrosión, velocidad del viento y ubicación geográfica. Según la norma API surgen dos grandes recomendaciones: la temperatura máxima y la presión interna, que está limitada a 18 kPa según el Anexo F. Además, es necesario considerar el tipo y propiedades del producto a almacenar como el acero A36, mismo que es específicamente para líquidos. Dentro de este aspecto se considera la gravedad específica, corrosión y finalmente especificaciones del material.

Es importante destacar que el desarrolló para el análisis de los espesores de plancha con base en el literal 3.6.3.2 de la norma API 650 permite valorar el número de anillos que deberá poseer el tanque. Por otro lado, la eficiencia de la junta se establece en un 90% con el propósito de establecer un diseño ajustado y los 6 mm para espesores recomendados y comerciales.

Para el desarrollo del espesor de plancha se considera el literal 3.10 de la norma API 650 denominada techos en el cual se establecen todas las características que la plancha del techo debe cubrir con el propósito de aplicar la norma. Esto se destaca en el anexo B detallado como espesor de la plancha del techo. En este punto se destaca la carga total de 1.2 Kpa; espesor mínimo de 5 mm, espesor máximo de 12.5 mm, ángulo de 37 grados y finalmente un espesor de corrosión de 2 mm. Para más información ver Anexo B. Por otro lado, en lo que respecta a la carga de viento, esta información deja en evidencia la presión ejercida sobre el área proyectadas en las superficies cilíndricas (0.86 Kpa), cónicas curvas (0.72 Kpa) y planas verticales (1.4 Kpa) del tanque. Para más información ver Anexo B; determinación de la carga de viento.

2.3.3 Presiones debidas al viento

Las cargas aplicadas para los cálculos desarrollados en la matriz teniendo con consideración cargas vivas, muertas, peso del techo, presión debida al peso y presión total. Además, las cargas aplicadas al tanque teniendo en consideración la presión ejercida en las superficies cilíndrica, cónica y plana. A la par de las cargas debidas a personas y equipos con un valor de 1000 Kp respectivamente. Por último, se enlista la carga móvil de 2000 N. Para más información ver Anexo B. A la par también se exponen las cargas debidas a la presión con un valor de 1.028 KPa con el propósito de analizar el sistema a su máximo alcance y así valorar su resistencia.

2.3.4 Espesor de la plancha de fondo

De acuerdo con el literal 3.4.1 de la norma, las planchas del fondo deberán tener un espesor mínimo de 6 mm, al cual se le deberá agregar el espesor de corrosión del caso.

$$t_{min} = 6 \text{ mm}$$

En el caso del tipo de tanque considerado, la placa del fondo sólo cumple la función de asegurar la hermeticidad, razón por la cual corresponde utilizar el espesor mínimo aceptado por la norma.

$$t_{diseño} = t_{min} = 6 \text{ mm}$$

Desde esta perspectiva el espesor de la placa de fondo es entonces como se destaca en la expresión descrita a continuación:

$$t_b = t_{diseño} + t_{corrosión}$$

$$t_b = 6 + 3 \text{ mm}$$

$$t_b = 9 \text{ mm}$$

Nota: Desde esta perspectiva se selecciona un espesor comercial para el fondo.

2.3.5 Cálculo del perfil de coronamiento

Para el desarrollo de este apartado es necesario detallar que se emplea la figura 2 de la norma API 650; en la cual se considera el radio del tanque, el diámetro, espesor de pared y la longitud normal del techo. Para más información ver Anexo B. Al respecto del perfil de coronamiento para el desarrollo del tanque teniendo en consideración el espesor de la plancha del techo y finalmente el espesor aumentado. Por otro lado, el área participante de la unión del techo con la pared del estanque "S" se determina de acuerdo con el literal 3.10.5.2. Según el párrafo 3.1.5.9 API 650, para tanques de techo auto soportados de diámetros menores o iguales a 11 m, el mínimo perfil a usar es C4 x 5.4.

A partir de este punto se efectúa el cálculo del área participante con respecto a la superficie del tanque. Además, la norma requiere que el área participante A_p sea mayor que la sección mínima requerida S ; por ende:

$$A_p = 2060 \text{ mm}^2$$

$$S = 325 \text{ mm}^2$$

Teniendo en consideración que: $A_p > S$; para tal caso el área unión techo-manto es correcta.

2.3.6 Análisis por viento

El momento de volcamiento debido a las fuerzas producidas por el viento aplicadas en las áreas proyectadas del casco y el techo se denotan en la tabla 9, teniendo como referencia el literal 3.11.1 de la norma (estabilidad de vuelco).

Tabla 9.- Resumen de cargas para análisis por viento

TIPO DE CARGA	VALOR
Peso del tanque	5.19 Tn (Toneladas)
Peso total del tanque + accesorios	118.80 Tn (Toneladas)
Fuerza de roce	59.40 Tn (Toneladas)
Fuerza Sísmica	3.90 Tn (Toneladas)

Fuente: [19]

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

2.3.7 Análisis sísmico

El momento de volcamiento se analiza por medio de la siguiente expresión:

$$M = Z * I * (C_1 * W_s * X_s + C_1 * W_r * H_t + C_1 * W_1 * X_1 + C_2 * W_2 * X_2)$$

Tabla 10.- Resumen de cargas para análisis sísmico

TIPO DE CARGA	VALOR
Factor de zona sísmica Z	0.075
Factor de importancia I	1.20
Coefficiente de fuerza sísmica lateral modo impulsivo C1 API650	0.60
Coefficiente de fuerza sísmica lateral modo convectivo C2 API650	0.48
Coefficiente de fuerza sísmica lateral modo impulsivo C1 Nch 2369	0.32

Coeficiente de fuerza sísmica lateral modo convectivo $C2$ Nch 2369	0.159
Peso de manto W_s	2.61 Tn
Peso del techo W_r	1.22 Tn
Altura de aplicación de fuerza sísmica X_s	2.93 m
Altura total del casco H_t	5.86 m
Peso de la masa efectiva del contenido W_1	62 Tn
Distancia de aplicación de la fuerza sísmica W_1 desde la base X_1	2.17 m
Peso de la masa efectiva del modo de vibración del contenido W_2	46.6 Tn
Distancia de aplicación de la fuerza sísmica W_2 desde la base X_2	3.52 m

Fuente: [19]

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

Como indica la tabla 10, la Nch 2369 el Mínimo C2 debe ser equivalente a $0.1 \cdot A_0/g$ según Párrafo 11.8.8. Es decir, el coeficiente sísmico mínimo C2, se calcula como el 10% de la relación entre la aceleración máxima en la base del tanque y la aceleración de la gravedad. En este se destaca las dos tipologías de cargas o momentos a ser aplicadas dentro del diseño ya sea para la norma API 650 así como la Nch 2369 hasta llegar al valor puntual de 89 ton*m.

2.3.8 *Análisis de deslizamiento*

El desplazamiento muestra su presencia cuando la fuerza sísmica generada es mayor que la fuerza de fricción del suelo. Las fuerzas sísmicas y de fricción vienen dadas por las siguientes expresiones (las condiciones para las fuerzas sísmicas se dan en la Sección 5.1). Para más información ver Anexo B. En este punto se destaca que como $F_c > F_z$; por ende, el tanque no se desliza.

2.3.9 Análisis del volcamiento

En este aspecto se considera el peso de resistencia al volcamiento descrito en la **tabla 11**. expuesta a continuación, para tanques no anclados.

Tabla 11.- Resumen de cargas para análisis por volcamiento

TIPO DE CARGA	VALOR
Peso máximo del contenido Wl	22649 N/m
Wlmax	4531 N/m
Peso del manto y techo W_{s+r}	3.84 Tn
Peso por unidad del perímetro Wt	2445 N/m

Fuente: [19]

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

Para la compresión del manto, se evalúa la fuerza longitudinal máxima en la base de la pared considerando que, si $e \leq 0.785e \leq 0.785$, el tanque puede ser estable. Sin embargo, al determinar que $e > e_{\text{máx}}$, el tanque resulta inestable frente al volcamiento, por lo que requiere anclaje (ver Anexo B para más detalles).

2.3.10 Análisis de falla local

La falla se identifica al momento que la tensión de trabajo (Fb) supera la tensión de compresión máxima admisible (Fa). Esta información resumida se evidencia en la **tabla 12**:

Tabla 12.- Resumen de cargas para análisis por tensión de la compresión

TIPO DE CARGA	VALOR
Fuerza máxima de compresión b	47927 N*mm
Espesor del primero anillo sin corrosión t	4 mm
Tensión de trabajo Fb	11.98 Mpa

Fuente: [19]

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

El esfuerzo longitudinal de compresión Fb no debe exceder el esfuerzo máximo admisible Fa, por

ende, el tanque no excede los esfuerzos admisibles y se desarrollará con normalidad.

Tabla 13.- Resumen de cargas para análisis por tensión de la compresión

Tipo de carga	Valor
Esfuerzo máximo admisible F_a	67.21 MPa

Fuente: [19]

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

Al respecto de la **tabla 13** es destacable que, una vez analizado el valor de los esfuerzos, el de trabajo es menor que el admisible. En consecuencia, no existe sobrecarga en el diseño del tanque. Otro punto a considerar es la determinación de los anclajes; para el punto en específico se detallan cada uno de los pernos, sollicitación y diseño de llaves de corte. Para más información ver Anexo B. Por otro lado, la figura 8 destaca el esquema geométrico del tanque para su posterior simulación. Ver **figura 6**.

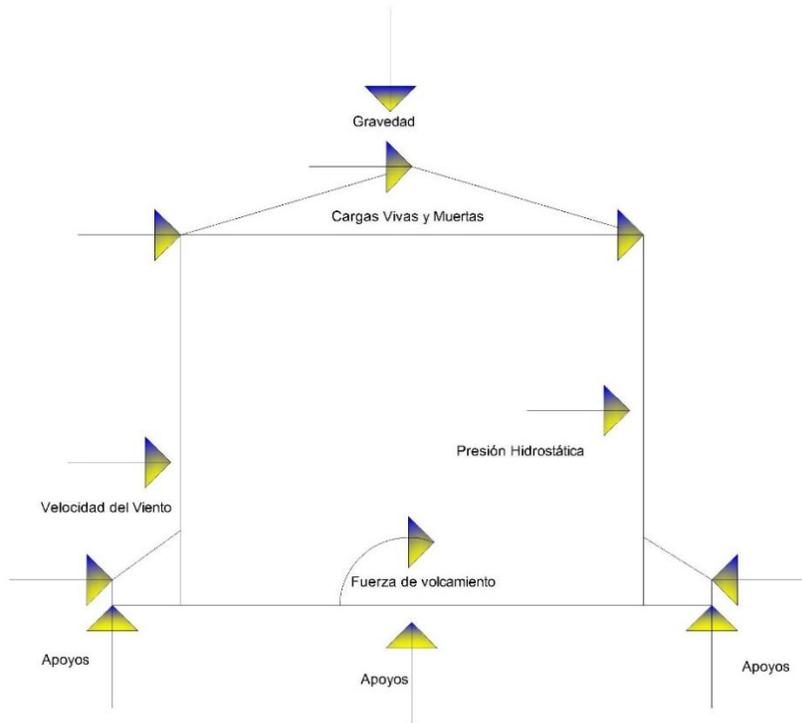


Figura 6.- Esquema de aplicación de cargas

2.3.11 Proceso de soldadura y tipo de junta

El proceso empleado fue (SMAW). En la construcción de tanques, se utilizan principalmente juntas traslapadas para las soldaduras del fondo y el techo, mientras que las juntas a tope se emplean en los anillos, con o sin biselado según el espesor del tanque. Para optimizar la fabricación de tanques mediante soldadura, se aplican procedimientos específicos como *WPS* y *PQR*, definidos en el estándar *AWS D.1.1*, que establecen las condiciones y el tipo de proceso a seguir. Además, la norma *API 650* determina los requisitos mínimos para el espesor nominal de las placas, considerando el diámetro nominal del tanque.

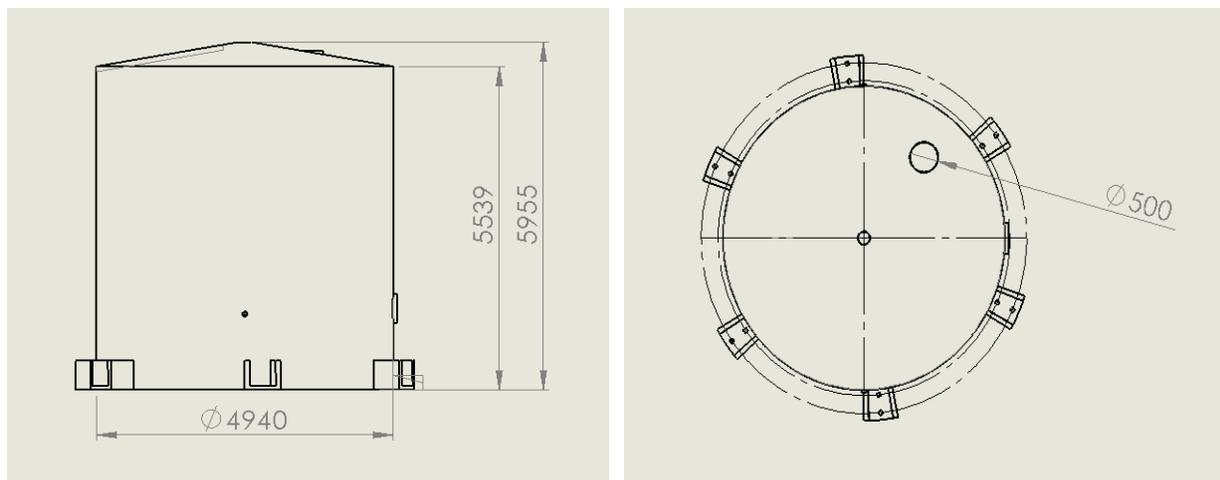


Figura 7.- Geometría del modelo

Por ende, la información destacada dentro de las figuras denotadas con antelación permitió definir geoméricamente el modelo. Con eso en mente se ejemplifica el diseño dentro del software *CAD* para su posterior análisis y simulación; ver **figura 7** descrita con antelación.

Capítulo III

Resultados y Discusión

3.1 Presentación de los resultados

En este punto se destaca los resultados de la simulación estática y la validación de la matriz de cálculo para el diseño del tanque, dentro de uno de los puntos más importantes se analizó el espesor total de la pared ajustado por efectos de corrosión. El procedimiento incluyó el dibujo del tanque en SolidWorks, donde se calculó el espesor necesario (ET) tomando en cuenta el espesor original de la pared más el espesor adicional debido a la corrosión, resultando en un valor de 7,62 mm, mismo espesor que fue valorado según el literal 3.6 denominado diseño del manto. Por otro lado, el espesor de la plancha del techo se abordó con base en el literal 3.10 teniendo en consideración que todos los techos deben soportar carga muerta más una carga viva uniforme de no menos que 1.2 Kpa y mantener un espesor nominal de 5 mm. Según el literal 3.4.1 de la norma, la plancha de fondo debe tener un espesor mínimo de 6 mm más un espesor adicional por corrosión, alcanzando un total de $t_b = 9 \text{ mm}$. Dado que su función principal es garantizar la hermeticidad, se utiliza el espesor mínimo permitido por la norma. Además, para el diseño del perfil de coronamiento del tanque, es esencial considerar tanto el espesor de la plancha del techo como el espesor aumentado.

Además, el área efectiva de la unión entre el techo y la pared del estanque, designada como "S", se calcula conforme al literal 3.10.5.2 de la norma. Según el párrafo 3.1.5.9 de API 650, para tanques con techos autoportantes y diámetros menores o iguales a 11 metros, el perfil mínimo recomendado es C4 x 5.4. Por otro lado, la norma exige que el área participante A_p sea mayor que la sección mínima requerida S. En este caso, $A_p = 2060 \text{ mm}^2$ y $S = 325 \text{ mm}^2$, cumpliendo la condición $A_p > S$, lo que valida la unión techo-manto del tanque. A continuación, se denota el modelo 3D del tanque con las dimensiones especificadas anteriormente en el capítulo del marco metodológico de este proyecto.



Figura 8.- Diseño del modelo con accesorios

La **figura 8** destaca los accesorios empleados para la simulación del tanque y posterior a realizar el dibujo del tanque y calcular el espesor total ajustado por corrosión, se procedió dentro del mismo programa a la selección del material para el tanque, tal es el caso del acero A36; con las propiedades descritas; ver **tabla 14.** expuesta a continuación:

Tabla 14.- Características del acero A36

Propiedad	Valor
Designación	<u>A36</u>
Tipo	Acero al carbono
Uso principal	Estructural
Composición química:	
- Carbono (C)	0.25% máximo
- Manganeso (Mn)	0.60-0.90%
- Fósforo (P)	0.04% máximo
- Azufre (S)	0.05% máximo
Resistencia a la tracción	400-550 MPa
Límite de elasticidad	250 MPa
Dureza (Brinell)	119-159
Densidad	7.85 g/cm ³
Módulo de elasticidad	200 <u>GPa</u>
Coefficiente de expansión térmica	12.5 <u>µm/m°C</u>
Conductividad térmica	48.6 <u>W/m·K</u>
Capacidad de conformado	Buena
Soldabilidad	Excelente
Maquinabilidad	Buena
Usos comunes	Vigas, columnas, placas, componentes estructurales

Fuente: [22]

Nota: Es importante detallar que la selección del material se efectuó en el literal 2.3.1 por ende no requiere de mayor dilación y únicamente se expone la información del material para el software.

Después de seleccionar y analizar el material en *SolidWorks Simulation*, el siguiente paso fue arreglar la geometría fija en el programa. Esto implicó definir las condiciones de contorno y las restricciones necesarias para simular con precisión el comportamiento del yacimiento bajo cargas específicas (ver **Figura 9**).

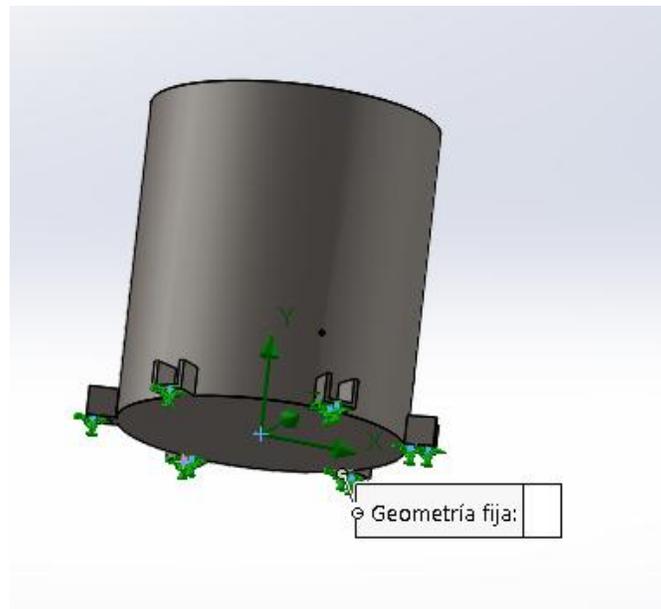


Figura 9.- Sujeción de geometría fija

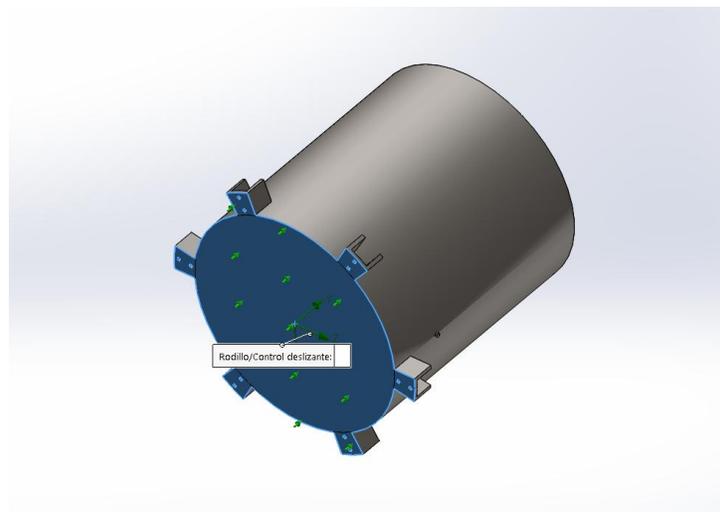


Figura 10.- Análisis estático del modelo sujeción rodillo deslizante

Por otro lado, en la **figura 10** se aplicaron restricciones adecuadas en puntos específicos del tanque para simular su comportamiento realista bajo carga. Esto aseguró que la simulación reflejara con precisión las condiciones reales a las que estaría expuesto el tanque durante su uso, ayudando a identificar áreas críticas de tensión, deformación o fallo potencial.

A partir de ese punto se definieron los parámetros de análisis, incluyendo el tipo de análisis (lineal), la precisión deseada y los criterios de convergencia. Para este caso en específico se colocaron 5 cargas, F1 (cargas vivas y muertas) y F3 (Fuerzas Sísmicas) como puntuales, se aplicó también un momento sísmico, gravedad y presión de fluidos para los tres ejes con base en el detalle de cómo afecta cada magnitud al tanque en situaciones normales. Dentro de este contexto se identifican los detalles de la sección 3 denominada cargas de diseño, sección 5; cargas adicionales (requisitos para cargas externas, como viento y sismos y procedimientos para el cálculo de cargas sísmicas según la ubicación del tanque). Esta información se complementa en el Apéndice E, detallando procedimientos para evaluar la estabilidad estructural bajo estas condiciones.

Además, el Anexo F que define criterios para tanques externa por encima de las condiciones atmosféricas, para asegurar su integridad estructural. Finalmente, el Apéndice G analiza los requisitos y métodos para el análisis sísmico teniendo en cuenta factores como la topografía, la interacción suelo-estructura y las fuerzas dinámicas que actúan sobre el yacimiento. Los esquemas representativos se enlistan a continuación:



Figura 11.- Carga fuerza F1 (Cargas vivas y Muertas)

La **figura 11** mostrada con antelación denota el valor y referencia de la carga aplicada para el análisis del tanque, siendo esta de 32.175 N aplicada en los alrededores del tanque

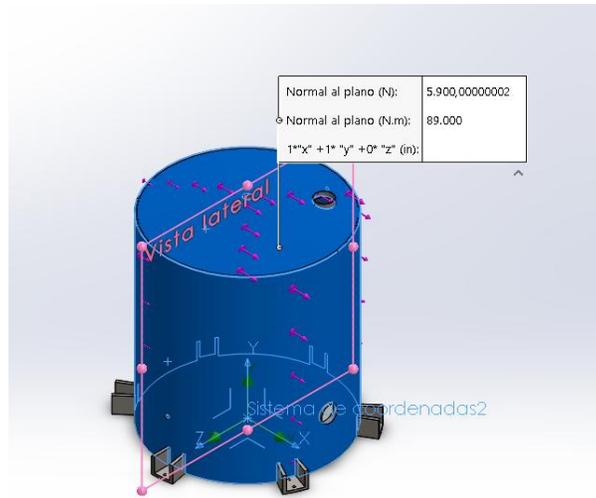


Figura 12.- Carga fuerza sísmica

De manera similar, la figura 12 denota el valor y referencia de la carga por fuerza sísmica en “x” aplicada normal al plano para el análisis del tanque. Esta carga se permite generar una relación con la velocidad del viento. Esta información fue contrastada con el literal 3.11.1 de la norma (estabilidad de vuelco).

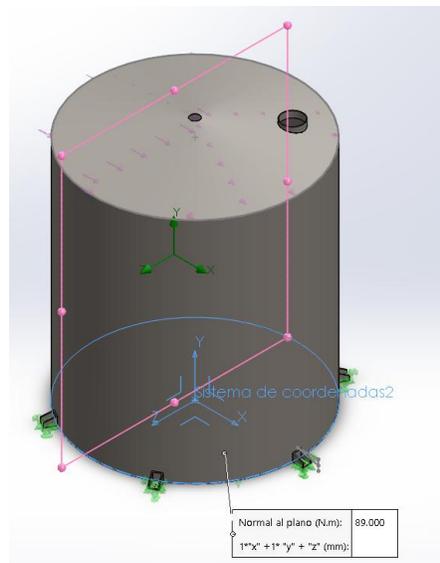


Figura 13.- Momento sísmico

La **figura 13** muestra la carga normal al plano de 89000 N*m aplicada al tanque con el propósito de establecer el comportamiento de este. Esta se localiza en la base del tanque.

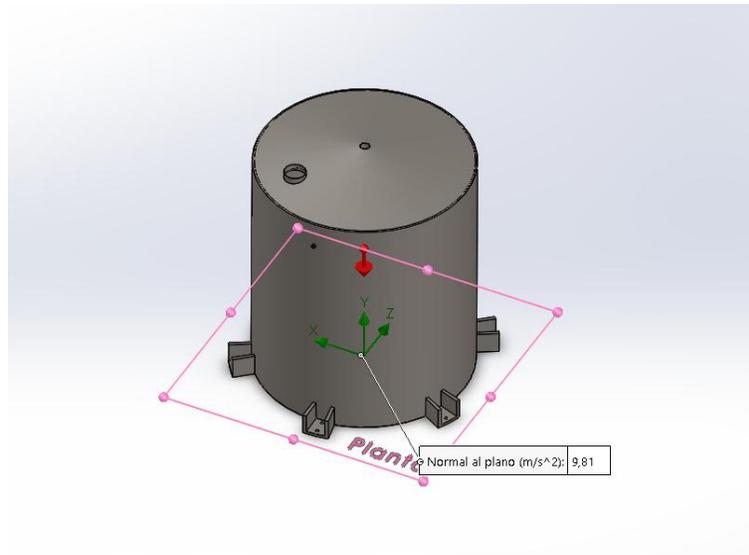


Figura 14.- Carga debido a la gravedad

La **figura 14** muestra la carga normal ejercida por la gravedad en sentido del eje y negativo para la simulación del tanque. Con respecto a estas cargas se analizó el comportamiento estructural del tanque, evaluando aspectos como la tensión máxima en las paredes, la deformación resultante y la seguridad estructural del diseño frente a dicha presión interna.

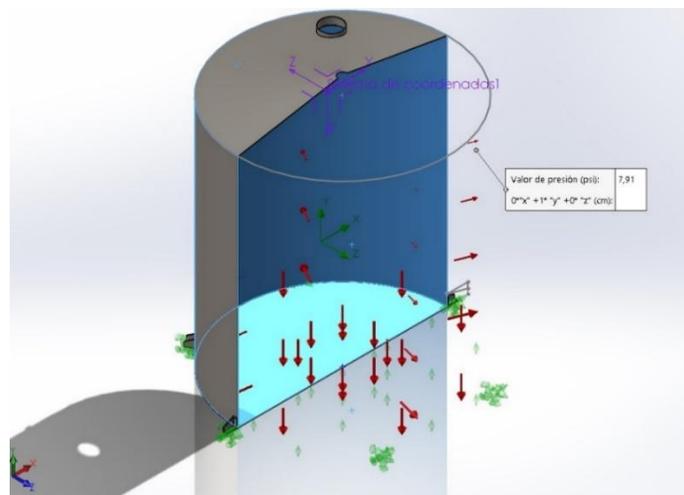


Figura 15.- Presión hidrostática

La **figura 15** destaca la presión hidrostática, misma que es aplicada en las caras internas del tanque en base al cálculo de la presión hidrostática de 7.91 Psi. Esta presión es ejercida en el eje Y puesto que el fluido se asienta en la base y por ende el eje puede ser considerado como negativo o positivo según la situación lo amerite. Es caso de ser necesario la presión hidrostática puede ejercer un equilibrio entre la fuerza de volcamiento ejercida por el viento. Por ende, dentro de la simulación puede ser obviada sin mayor dilación. Para esta valoración, es crucial considerar la tabla 2.4, de la norma chilena NCh 2369, que regula el diseño de estructuras sometidas a cargas sísmicas, y el párrafo 11.8.8, donde se establece que el coeficiente sísmico mínimo C2 debe ser igual al 10% de la relación entre la aceleración máxima en la base del tanque (A_0) y la aceleración de la gravedad (g), resultando en un valor específico de 89 ton*m. En cuanto al desplazamiento lateral, este ocurre únicamente si la fuerza sísmica generada supera la fuerza de fricción del suelo. Según la norma API 650, al cumplir la condición $F_c > F_z$, el tanque no se desliza, validando su estabilidad según las especificaciones de la Sección 5.1.

Como siguiente paso se abordó el mallado, este es un proceso fundamental en *SolidWorks Simulation* donde se divide la geometría del modelo en elementos más pequeños (como tetraedros o hexaedros) para facilitar el análisis numérico de tensiones y deformaciones. La calidad del mallado fue abordada por medio de la **figura 16** de convergencia de malla.

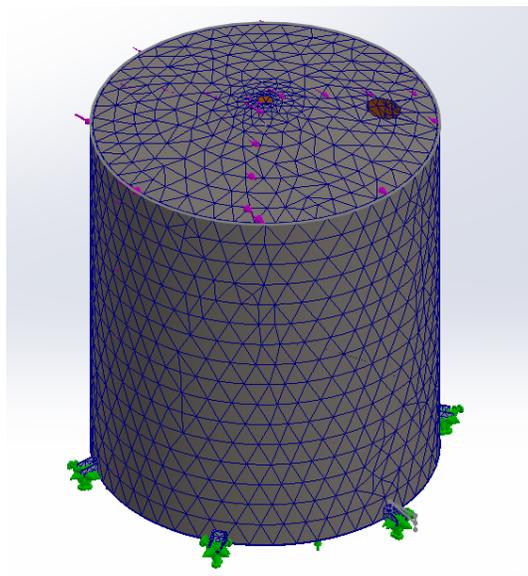


Figura 16.- Análisis estático (mallado)

A continuación, se enlista la **figura 16** denota la convergencia de la malla generada para 8 interacciones durante el análisis del modelo. Esto se efectuó con el propósito de obtener resultados fiables pues a medida que se incrementan el número de iteración los resultados se vuelven más estables y se maneja un error mínimo.

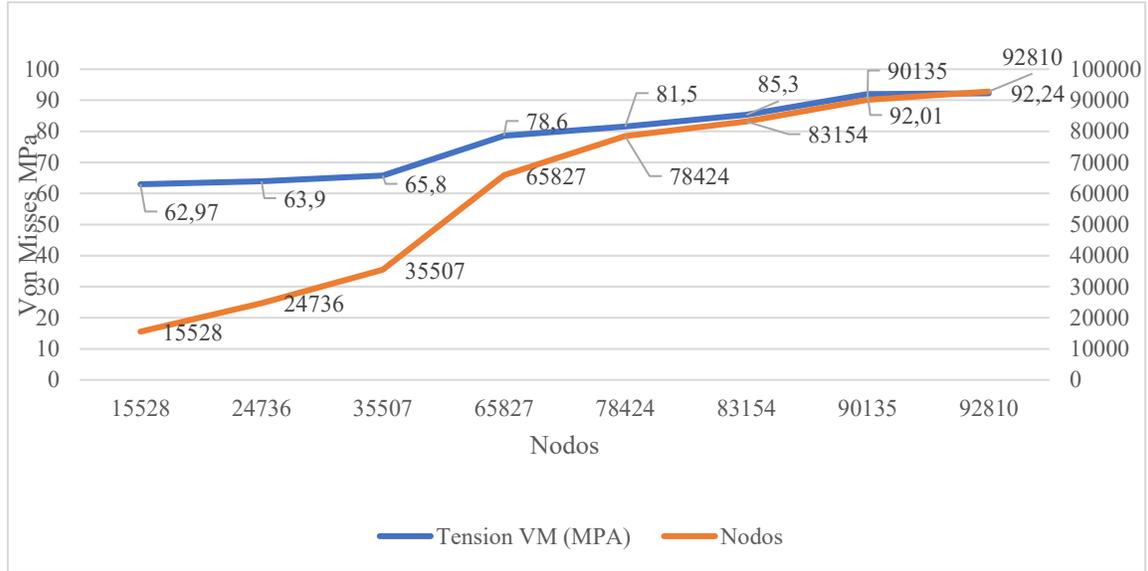


Figura 17.- Convergencia de malla

La **figura 17** mostrada con antelación denota la convergencia de malla, es dentro de ella que los cambios en la tensión son mínimos más allá de cierto punto de refinamiento, lo que sugiere que la malla es suficientemente fina para obtener resultados precisos sin necesidad de un mayor refinamiento, evitando así el aumento innecesario del tiempo de cálculo y los recursos computacionales. Con esto en mente se destacan los resultados de la simulación:

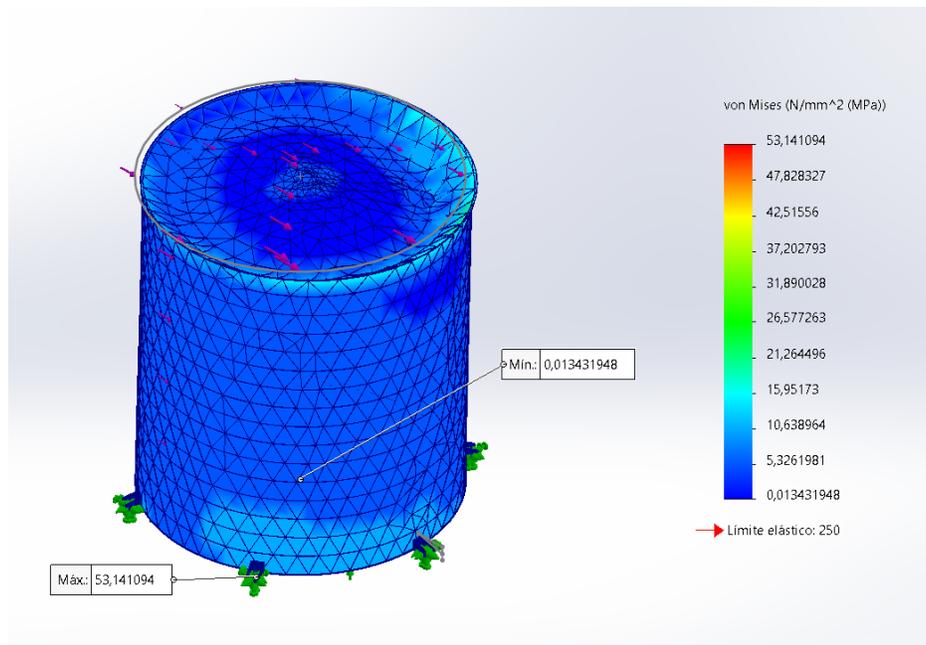


Figura 18.- Esfuerzo de Von Misses

En la **figura 18** se evidencian los resultados que detallan: esfuerzo de Von Mises es de 53.14 MPa, mientras que la mínima es de 0.0134 MPa. El límite elástico del material se establece en 250 MPa, lo cual sugiere que las tensiones máximas en el tanque están por debajo de este límite, indicando que el material no ha alcanzado su punto de fluencia y se encuentra en una zona segura de operación. La norma API 650 aborda la resistencia a tensiones mediante límites de esfuerzos permisibles, sin recurrir directamente al criterio de Von Mises, estableciendo parámetros para las tensiones en la pared, fondo y techo del tanque según los materiales y cargas aplicables. Estos límites, descritos en la Sección 5, consideran tensiones axiales, de flexión y circunferenciales bajo presión interna y externa, mientras que el Anexo P trata el diseño de refuerzos y tensiones localizadas en aberturas. Asimismo, la Sección 3.6 define factores de diseño basados en las propiedades del material para evitar fallas en condiciones normales, empleando enfoques simplificados para las tensiones combinadas. Por ende, el tanque cumple con las directrices de la API 650 en términos de resistencia a las tensiones.

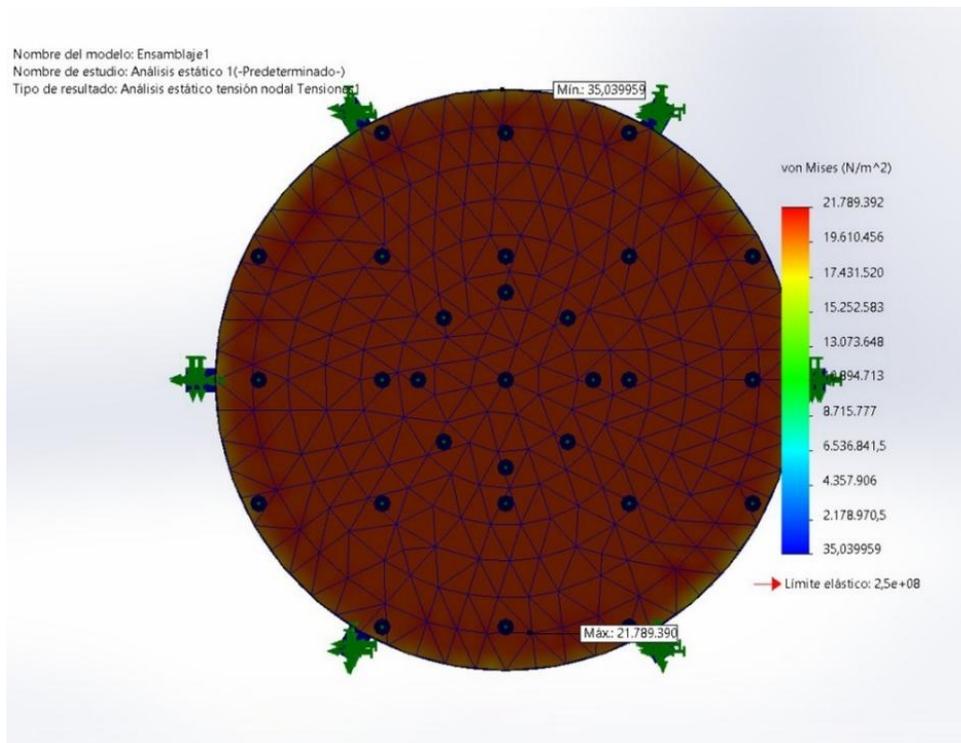


Figura 19.- Esfuerzo de Von Misses (Base del tanque)

La concentración de tensiones permite identificar áreas específicas donde las tensiones pueden ser significativamente mayores que en otras partes de la estructura. En el caso analizado, la **Figura 19** muestra una concentración de tensiones de Von Mises de 21,78 MPa en la base del tanque. Esto es consistente con el comportamiento mecánico esperado, ya que la base soporta el peso total del fluido almacenado, lo que genera esfuerzos circunferenciales y verticales máximos debido a la presión hidrostática. Es importante destacar que la ubicación de estas tensiones en la base del tanque también puede deberse a la interacción entre la tapa y el fondo, donde las condiciones de contacto y las posibles discontinuidades geométricas contribuyen a los aumentos de tensiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos, este valor de tensión se encuentra dentro de los límites aceptables establecidos por API 650, lo que sugiere que la estructura puede operarse de manera segura en las condiciones analizadas. Es importante destacar que la tensión de Von Mises proporciona una evaluación integrada de las tensiones principales, considerando su combinación para determinar la resistencia a la falla de un material. Y desde esta perspectiva es necesario

destacar los desplazamientos debido a las fuerzas aplicadas y los esfuerzos denotados; ver figura 20.

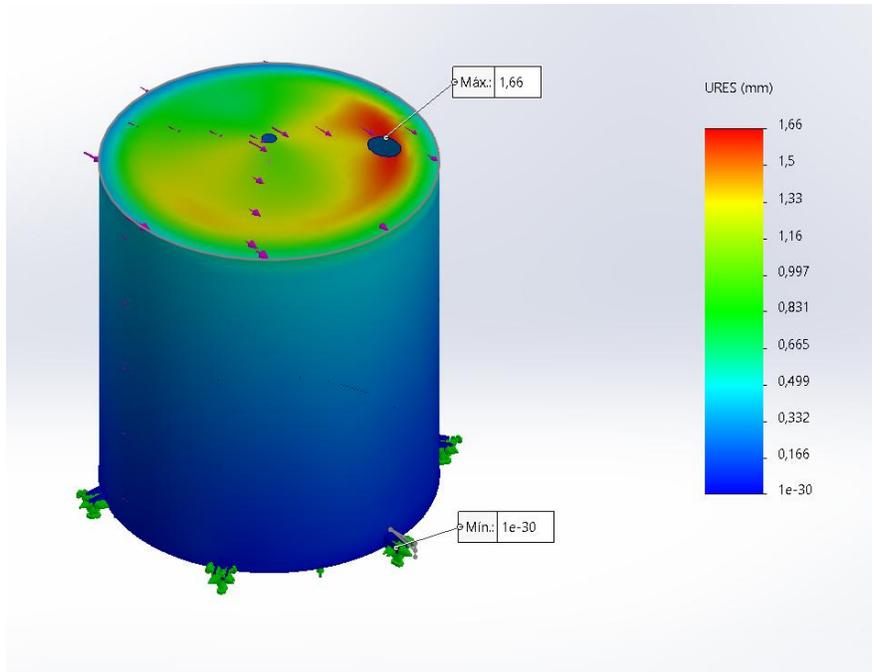


Figura 20.- Desplazamiento estático

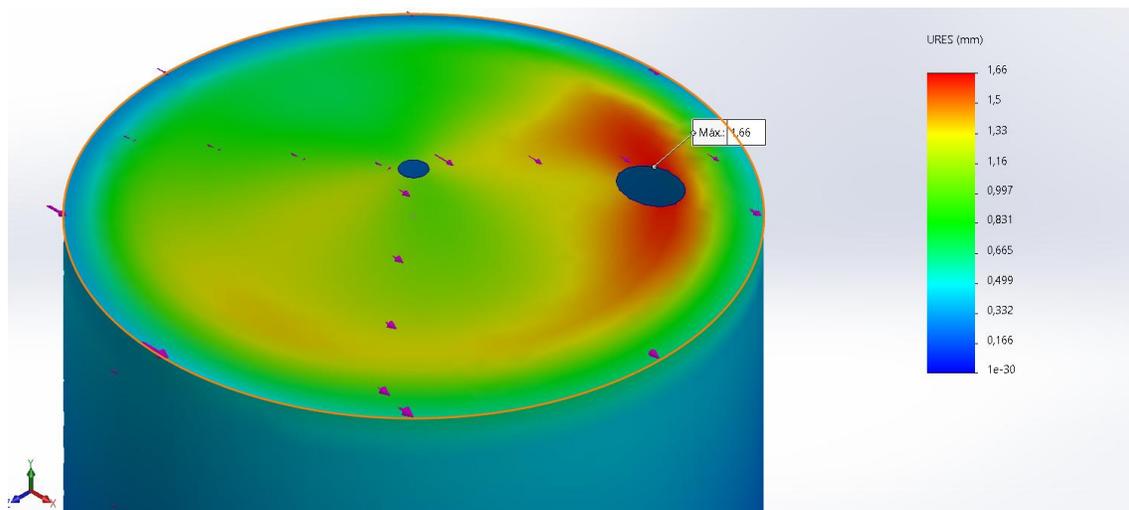


Figura 21.- Desplazamiento estático máximo

La **figura 21** presenta el análisis de desplazamiento de un tanque cilíndrico, revelando un desplazamiento máximo de 1.66 mm y un mínimo prácticamente nulo (1e-30 mm). El

desplazamiento máximo se localiza en la zona del *Manhole*. De acuerdo con la norma es fundamental que los desplazamientos y deformaciones permanezcan dentro de límites aceptables para garantizar el correcto desempeño del tanque. Aunque la norma no establece valores específicos para los desplazamientos, exige considerar la estabilidad y resistencia del tanque frente a las cargas aplicadas. El desplazamiento máximo de 1.66 mm es aceptable, pero su localización específica sugiere la posibilidad de reforzar esta área para mayor seguridad. La API 650 tiene en cuenta los movimientos de los tanques para garantizar su estabilidad e integridad estructural en diversas condiciones. Para movimientos laterales, se evalúa si la fuerza sísmica o del viento excede la resistencia de fricción entre el tanque y su base (Apéndice E). Para el asentamiento diferencial, la Sección 5.4 establece criterios para analizar los efectos base-suelo, que pueden inducir tensiones adicionales en el manto o las conexiones estructurales. Además, el diseño de techos y fondos toma en cuenta los desplazamientos causados por cargas internas y externas, tales como el peso propio, la presión del fluido o la presión atmosférica, con especial atención en el Anexo F para los tanques sujetos a presiones superiores a la atmosférica.

Adicionalmente, los resultados del análisis de tensiones nodales y desplazamientos estáticos se visualizaron y evaluaron detalladamente. Los mapas de desplazamiento mostraron cómo la estructura se deformaría bajo las cargas aplicadas, y se identificaron las áreas con los mayores y menores desplazamientos. Esto permitió verificar que el diseño del tanque cumpliera con los límites de diseño y los requisitos de seguridad ver **figura 22**.

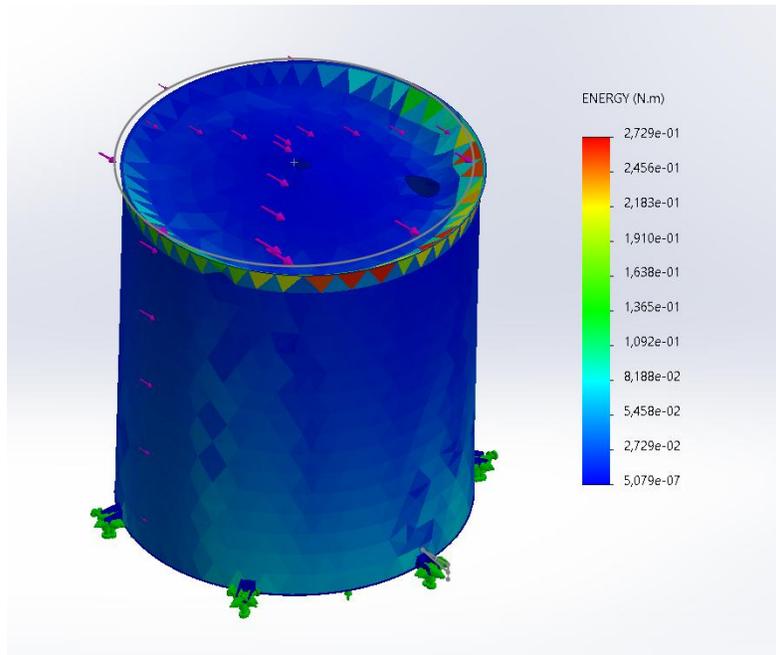


Figura 22.- Deformaciones unitarias

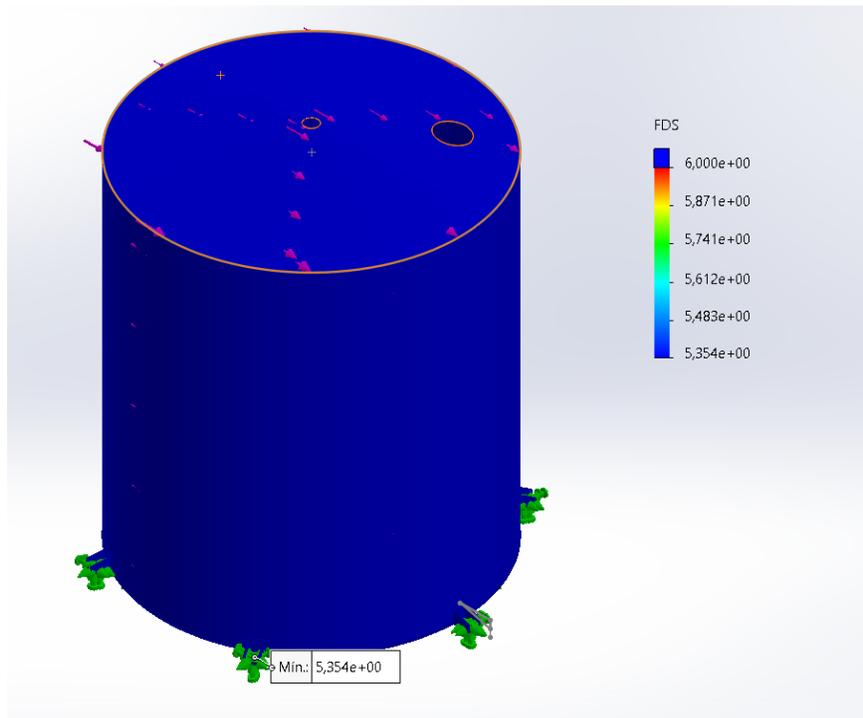


Figura 23.- Factor de seguridad del tanque

La **figura 23** muestra una representación del (FS) del tanque, con un rango de valores de 5.34 a 6. Según la norma API 650 se especifica que el factor de seguridad deber ser de 1,5 para materiales que no estén sujetos a condiciones extremas, cómo temperaturas muy altas, y de 2,0 para condiciones de presión interna, como aquellas sujetas a vacío o presión superior a la atmosférica que se encuentra en el tanque. Por ende, al poseer un valor mínimo de 5,34 el tanque responde a las necesidades del diseño. El objetivo de este enfoque es garantizar que, incluso en caso de cargas inesperadas o defectos del material, el tanque pueda soportar la tensión sin comprometer su seguridad o funcionalidad. Por otro lado, los puntos con valores de FDS bajos pueden representar áreas de preocupación que requieren refuerzo o rediseño.

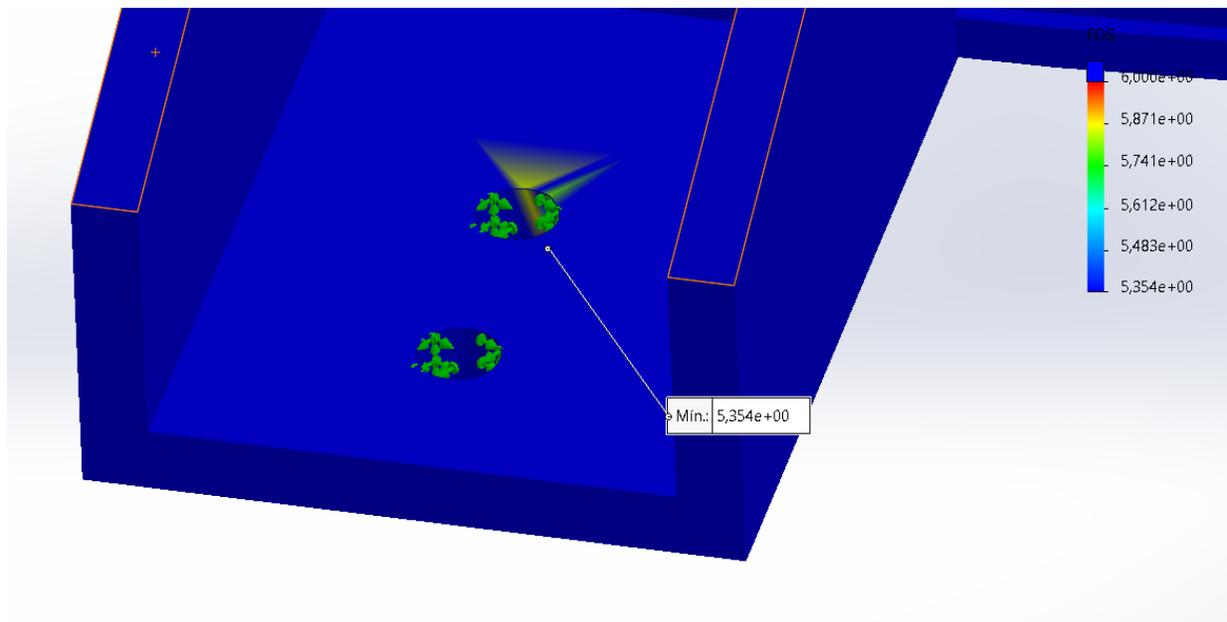


Figura 24.- Factor de seguridad del tanque mínimo

En lo que respecta a la **figura 24**, los puntos con valores de FDS bajos representan áreas de preocupación que requieren refuerzo o rediseño para dar por cumplidas las especificaciones de la norma. El lugar a destacar corresponde a los anclajes, por ende, se recomienda aplicar soldadura de filete con las especificaciones de la API 1104. Y revisar las secciones 5; diseño estructural, especialmente para las bases y anclajes a la par de la sección 3.6: factores de diseño de material, que pueden implicar la evaluación de la resistencia y el refuerzo de las uniones.

3.1.1 Contraste de resultados

Se muestra la **tabla 15**, que denota el contraste de resultados para validar la matriz de cálculo, simulación y la norma API 650.

Tabla 15.- Contraste de resultados

CONTRASTE DE RESULTADOS				
#	CRITERIO	VERIFICACIÓN		
		API 650	Matriz	Simulación
1	Generalidades del Tanque			
	Especificaciones del tamaño y capacidad	X	X	X
	Material del tanque	X	X	X
2	Fundaciones y Soporte			
	Diseño	X	X	X
	Verificación de resistencia y estabilidad	X	X	X
	Consideración de cargas adicionales	X	X	X
3	Diseño del Fondo del Tanque			
	Grosor mínimo del fondo	X	X	X
	Drenaje adecuado	X	Falta	Falta
4	Cuerpo del Tanque			
	Cálculo del grosor de las placas	X	X	X
	Análisis de juntas de soldadura	X	Falta	Falta
5	Cubierta del Tanque			
	Tipo de cubierta	X	X	X
	Grosor y diseño estructural	X	X	X
6	Aberturas y Accesorios			
	Número y ubicación de bocas de hombre	X	X	X
	Válvulas de entrada y salida	X	Falta	Falta
	Dispositivos de alivio de presión/vacío	X	Falta	Falta
7	Consideraciones de Carga y Resistencia			
	Cálculo de cargas de operación y diseño	X	X	X

CONTRASTE DE RESULTADOS				
#	CRITERIO	VERIFICACIÓN		
		API 650	Matriz	Simulación
	Verificación de factores de seguridad	X	X	X
	Análisis de resistencia a cargas externas	X	X	X
8	Protección contra Corrosión			
	Recubrimientos internos y externos	X	Falta	Falta
	Sistemas de protección catódica	X	Falta	Falta

El análisis de la **tabla 15** denominada verificación para un tanque de 30 000 galones revela que varios criterios de diseño cumplen con los estándares establecidos. Las especificaciones del tamaño y capacidad del tanque, el tipo de tanque, y el material de construcción cumplen con todos los criterios en la norma, la matriz de diseño y la simulación. Además, el diseño de la fundación, la verificación de la resistencia y estabilidad, y la consideración de cargas adicionales también cumplen con los requisitos. El grosor mínimo de fondo y el cálculo del grosor de las placas, así como el tipo de cubierta y su diseño estructural, están en conformidad con todos los criterios. Las aberturas y accesorios, en términos del número y ubicación de Manhole, también cumplen con todos los requisitos. Asimismo, el cálculo de cargas de operación y diseño, la verificación de factores de seguridad, y el análisis de resistencia a cargas externas se cumplen adecuadamente. Los elementos faltantes no pueden ser analizados pues dentro del modelo se considera la validación del tanque en lugar de los accesorios y lugar para su instalación.

3.2 Interpretación de hallazgos significativos y comparación con la literatura existente.

La seguridad estructural y la durabilidad son elementos críticos que aseguran tanto la protección del medio ambiente como la integridad operativa de las instalaciones industriales. Este estudio se centró en evaluar y discutir los hallazgos clave obtenidos durante el diseño de un tanque conforme a las normativas de API 650 y comparándolos con la literatura técnica disponible [2]. Estos elementos son cruciales no solo para cumplir con los estándares de seguridad establecidos, sino también para garantizar la robustez estructural del tanque frente a condiciones operativas variadas y adversas.

En este contexto, los hallazgos revelaron que el diseño del tanque superó los requisitos mínimos especificados por API 650 en términos de espesor del casco y capacidad de carga del techo, asegurando una mayor seguridad y durabilidad. La norma específica que el espesor mínimo del casco para tanques de almacenamiento es de 3/16 pulgadas (4,76 mm) para diámetros hasta 60 pies (18,3 metros) y 1/4 de pulgada (6,35 mm) para diámetros mayores. Además, los techos autoportantes deben soportar cargas mínimas de 25 libras por pie cuadrado (1,2 kN/m²) para nieve, y los techos con soporte estructural deben manejar cargas similares, incluyendo las cargas adicionales en las columnas. Los techos de cúpula también deben cumplir con estas cargas combinadas de viento y nieve según la sección 5.10 de API 650 [11]. Además, la comparación con la literatura técnica confirmó la precisión de los cálculos realizados y validó la selección de materiales y métodos de diseño empleados, pues soporta los valores definidos sin vacilación a la par de las cargas colocadas.

El espesor del techo del tanque, adecuadamente calculado para soportar cargas muertas y vivas, es esencial para prevenir deformaciones. Estos diseños son consistentes con los estándares de diseño para tanques de almacenamiento [3]. La capacidad del tanque para resistir fuerzas sísmicas, como se evidencia en un cortante sísmico de 4.8 m/s², muestra un diseño robusto que cumple con los requisitos de seguridad ante eventos naturales extremos [23]

En cuanto a la comparación con la literatura existente se expone: la norma API establece directrices cruciales para el diseño de tanques, asegurando que el modelo cumpla con estándares rigurosos de seguridad y rendimiento estructural [11]. La conformidad con estas normas es fundamental para la aceptación global y la confiabilidad del diseño. La revisión de estudios previos y literatura técnica valida la selección de espesores y materiales, mostrando coherencia con los estándares industriales y demostrando la aplicación efectiva de principios de ingeniería estructural en entornos prácticos [24].

La incorporación de innovaciones y prácticas avanzadas, como el uso de materiales modernos y técnicas mejoradas de análisis estructural, destaca un enfoque progresivo para optimizar el rendimiento del diseño de yacimientos. Los diseños de tanques de almacenamiento evaluados no solo cumplen con los requisitos estándar de seguridad y durabilidad según API 650, sino que también reflejan un compromiso con la excelencia técnica y la integración de avances recientes.

La comparación con la literatura existente fortalece la validez y confiabilidad de los métodos utilizados, asegurando que el tanque diseñado no solo sea seguro y funcional, sino que también esté adaptado a condiciones operativas diversas y exigentes.

Este enfoque integrado entre hallazgos significativos y revisión de literatura subraya la importancia de seguir prácticas estándar y adoptar innovaciones, asegurando diseños que sean tanto robustos como adaptativos a los desafíos presentes y futuros en la industria de almacenamiento de fluidos. Los resultados discutidos son de suma importancia tanto desde una perspectiva técnica como práctica. Aseguran que el tanque diseñado no solo cumple con los requisitos mínimos de seguridad y rendimiento estructural, sino que también incorpora innovaciones y mejores prácticas que mejoran su eficiencia y longevidad. Esta combinación de cumplimiento normativo, validación mediante literatura técnica y aplicación de avances tecnológicos asegura que el tanque no solo sea seguro y funcional, sino también adaptativo a las exigencias cambiantes del entorno industrial.

En resumen, los resultados no sólo confirman la solidez del diseño del tanque de almacenamiento en términos de seguridad y sostenibilidad, sino también su potencial para permanecer a la vanguardia de las prácticas industriales actuales y futuras. Es una solución confiable y eficiente para el almacenamiento de fluidos.

Conclusiones

- El presente proyecto se enmarcó en validar la matriz de cálculo para diseño de tanques API 650 de 30 000 galones mediante simulación estática, por lo que se concluye lo siguiente, teniendo en consideración que el diseño y análisis conforme a la norma API 650 ha resultado en hallazgos significativos que destacan la robustez y la conformidad del diseño con estándares industriales reconocidos.
- El alcance de la norma API 650 permite definir precisos de API 650, ha asegurado la selección adecuada de variables críticas como el espesor del casco, la capacidad de carga del techo y la resistencia a cargas sísmicas simuladas estáticamente. Estos elementos son fundamentales para garantizar la seguridad estructural y la durabilidad. La norma API 650 proporcionó el marco regulatorio y técnico esencial para la definición de variables críticas en el diseño del tanque.
- Se estructuró una matriz de cálculo detallada que incorporó todas las variables críticas definidas por la norma API 650. Esta matriz fue diseñada para evaluar aspectos clave como resistencia a la presión, capacidad de carga del techo bajo diferentes condiciones operativas, y respuesta sísmica. Cada parámetro fue meticulosamente integrado para asegurar un diseño robusto y eficiente del tanque de almacenamiento. Los resultados detallaron que la norma API 650 especifica que el espesor mínimo del casco para tanques de almacenamiento es de 3/16 pulgadas (4,76 mm) para diámetros hasta 60 pies (18,3 metros) y 1/4 de pulgada (6,35 mm) para diámetros mayores. Además, los techos autoportantes deben soportar cargas mínimas de 25 libras por pie cuadrado (1,2 kN/m²) para nieve, y los techos con soporte estructural deben manejar cargas similares, incluyendo las cargas adicionales en las columnas.

- La matriz de diseño fue verificada mediante simulaciones estáticas en SolidWorks, validando la integridad estructural del tanque bajo cargas simuladas. Los resultados muestran tensiones máximas de 53.14 MPa, por debajo del límite elástico del material (250 MPa), lo que confirma su operación segura. El desplazamiento máximo de 1.66 mm, ubicado en el manhole, no compromete la estabilidad ni funcionalidad del tanque, cumpliendo con API 650. El factor de seguridad, entre 5.34 y 6, también cumple con la normativa.

Recomendaciones

- Para futuros proyectos de diseño estructural, se recomienda integrar desde el inicio herramientas especializadas como ETAP o SAP 2000, especialmente en estructuras sujetas a cargas sísmicas significativas. Estas herramientas permiten una modelización precisa de las vibraciones y fuerzas dinámicas generadas por movimientos telúricos, asegurando una evaluación exhaustiva de la respuesta estructural. Esto no solo mejora la precisión del diseño, sino que también garantiza que las estructuras sean más resistentes y seguras ante eventos naturales extremos.
- Es fundamental establecer un proceso de diseño iterativo que incluya revisiones periódicas de las normativas actualizadas y las mejores prácticas de la industria. Esto asegurará que los diseños se mantengan alineados, mejorando así la eficiencia operativa y la seguridad de las instalaciones. Además, la colaboración estrecha entre ingenieros estructurales y especialistas en software de análisis dinámico puede facilitar la integración efectiva de herramientas avanzadas en el flujo de trabajo de diseño.
- Invertir en la formación continua del equipo de ingeniería en el uso de herramientas avanzadas enfocadas en modelos de índole estructural es crucial para maximizar el rendimiento y la efectividad en la evaluación de diseños complejos. Esto no solo fortalece las capacidades técnicas del equipo, sino que también fomenta una cultura organizacional.

Bibliografía

- [1] C. Granda y D. Sandoval, «Metodología para el cálculo de la matriz de transición laboral Diciembre 2018 – Diciembre 2019,» 2019. [En línea]. Available: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/EMPLEO/2019/Matrices_de_Transicion/Diciembre/Documento%20Metodologico%20MTL_dic2018_dic2019.pdf.
- [2] L. Aparecida, V. Conceição, F. Costa, S. Valente, D. Ferro y I. Carvalho, «API 650,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.scielo.br/j/rlae/a/XBBSs6w1234XcKw9TYpck6sTBvp/?lang=es&format=pdf>. [Último acceso: 2 abril 2024].
- [3] J. Muñoz, 2021. [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/proyectos/objetos/proyecto175.pdf>. [Último acceso: 3 abril 2024].
- [4] D. González, 2018. [En línea]. Available: https://oa.upm.es/51986/1/TFG_DAVINIA_GONZALEZ_DORTA.pdf. [Último acceso: 2 abril 2024].
- [5] A. Santisteban, 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/4401/1/UPSE-TIP-2018-0009.pdf>. [Último acceso: 4 abril 2024].
- [6] N. Quispe, «Diseño de un tanque de almacenamiento de petróleo de 10 000 galones según norma API 650 y su análisis empleando un programa CAD/CAE»,» 2019. [En línea]. Available: <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/4401/1/UPSE-TIP-2018-0009.pdf>. [Último acceso: 5 abril 2024].

- [7] G. Suarez, «Ejemplo de Cálculo Con API-650,» 2018. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/154800175/Ejemplo-de-calculo-con-API-650>. [Último acceso: 3 abril 2024].
- [8] N. Colón , «Percepción de los estudiantes de ingeniería sobre el desarrollo sostenible. Un análisis desde las dimensiones económicas, sociales y ambientales en un país en desarrollo,» Universidad de Córdoba, 2024.
- [9] D. Pacheco, «Aplicación del estándar API 650-2019 en las uniones soldadas del tanque espesador atmosférico de 40 M CU - MO del Proyecto Ampliación Toquepala - Tacna,» 2021. [En línea]. Available: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10401/1/IV_FIN_111_TSP_Pacheco_Molina_2021.pdf. [Último acceso: 4 abril 2024].
- [10] D. García, 2023. [En línea]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/37592/3/Tesis%20I.M.%20736%20-%20Garc%3%ADa%20Nu%3%B1ez%20Daniel%20Andr%3%A9s.pdf>. [Último acceso: 3 abril 2024].
- [11] API, «API STANDAR 650,» 2021. [En línea]. Available: [file:///C:/Users/User/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/5ON3Y3TL/API%20650-2021%20Welded%20Steel%20Tanks%20for%20Oil%20Storage-1\[1\].pdf](file:///C:/Users/User/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/5ON3Y3TL/API%20650-2021%20Welded%20Steel%20Tanks%20for%20Oil%20Storage-1[1].pdf).
- [12] V. GONZÁLEZ, J. MENDOZA y N. PÁEZ, 2020. [En línea]. Available: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/4a3e2bd2-b272-4b83-a4c4-23a6ae33a41d/content>. [Último acceso: 4 abril 2024].
- [13] F. Pérez, 2021. [En línea]. Available: https://www.ugr.es/~fjperez/textos/calculo_diferencial_integral_func_una_var.pdf. [Último acceso: 3 abril 2024].

- [14] Colab Gestion del Mantenimiento , 11 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://predictiva21.com/proceso-de-evaporacion-de-petroleo-y-sus-derivados-en-tanques-de-almacenamiento/>. [Último acceso: 08 Julio 2024].
- [15] J. Salazar, 2022. [En línea]. Available: https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/es_ec/topics/tax/ey-labor-alert-ago1-listas-cumplimiento-obligaciones-seguridad-salud.pdf?download. [Último acceso: 4 abril 2024].
- [16] M. Del Sole y E. Sanchez, 2021. [En línea]. Available: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/149321/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 3 abril 2024].
- [17] C. Serrano, E. Calispa y J. Orozco, 2021. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9043035.pdf>. [Último acceso: 3 abril 2024].
- [18] J. Castillo, L. Guzmán, B. Escola y Reyes.E, «Influencia de las Condiciones de Almacenamiento en la Presión de Vapor Reid, Formación de Gomas y el Número de Octano Research de la Gasolina,» 2023. [En línea]. Available: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v52n1/2477-8990-rpolit-52-01-00063.pdf>.
- [19] Desarrollo de análisis de tanques , [En línea]. Available: [https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Ffiledn.com%2Flnot7xuzuezF89IKyTMOMkf%2FHVAC-ENG.COM%2Fxls%2FpipingTools%2FTank_sulfuric_acid_storage_API_650-1998._\(Spanish\)\(hvac-eng.com\).xls&wdOrigin=BROWSELINK](https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Ffiledn.com%2Flnot7xuzuezF89IKyTMOMkf%2FHVAC-ENG.COM%2Fxls%2FpipingTools%2FTank_sulfuric_acid_storage_API_650-1998._(Spanish)(hvac-eng.com).xls&wdOrigin=BROWSELINK). [Último acceso: 31 07 2024].
- [20] P. Pérez, 2022. [En línea]. Available: <https://www.fnmt.es/documents/10179/10666378/Dise%C3%B1o+y+c%C3%A1culo+de+tanques+de+almacenamiento.pdf/cf73a420-13f2-248f-034a-d413cb8a3924>. [Último acceso: 2 abril 2024].

- [21] SOLIDWORKS, «INTRODUCCIÓN A SOLIDWORKS,» 2022. [En línea]. Available: https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf. [Último acceso: 4 abril 2024].
- [22] G. López y F. Guzhñay, «Estudio del comportamiento del acero A36 mediante ensayos de tracción para determinar fallas en elementos estructurales, mediante la norma ASTM E-8,» Universidad Técnica de Ambato , 2012.
- [23] V. Muñoz, «Diseño, cálculo y optimización de un depósito estándar de productos derivados del petróleo según el código API 650,» 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/9920/tfg-mu%C3%B1oz-dis.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 3 abril 2024].
- [24] J2MECH, «Diseño de tanques según API 650,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.j2mech.com/wp-content/uploads/2019/10/Webinar-Dise%C3%B1o-de-tanques-API-650-3.pdf>. [Último acceso: 4 abril 2024].
- [25] D. Gallegos, F. Balderas, C. Garza y J. Morones, «Métodos para evitar la evaporación de agua en reservas abiertas,» 2024. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/377910667_Metodos_para_evitar_la_evaporacion_de_agua_en_reservas_abiertas.
- [26] Inamhi, 13 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.inamhi.gob.ec/>. [Último acceso: 05 Julio 2024].

Anexos

Anexo A

Para cumplir con los apéndices E (cargas de viento) y F (cargas sísmicas) del API 650, es esencial calcular las fuerzas que estas cargas imponen sobre el tanque y diseñar en consecuencia para garantizar la estabilidad y seguridad del tanque. A continuación, se presentan los valores y consideraciones específicas para cada apéndice.

Apéndice E: Cargas de Viento

Velocidad del Viento

La velocidad básica del viento (V) se determina según la ubicación geográfica del tanque. Generalmente, se obtiene de los mapas de velocidad del viento que proporcionan valores de velocidad del viento en términos de probabilidad anual de excedencia.

Valores típicos: En áreas expuestas, la velocidad del viento puede variar entre 85 y 150 mph (aproximadamente 136 a 241 km/h).

Cálculo de la Presión del Viento

Área Expuesta

Determinación del área expuesta del tanque que está sujeta a la presión del viento. Esta incluye la superficie lateral y el techo del tanque.

Fuerza del Viento

La fuerza total del viento se calcula multiplicando la presión del viento por el área expuesta:

Apéndice F: Cargas Sísmicas

Coefficiente Sísmico

Determinado por la ubicación geográfica y la zona sísmica del tanque. Se obtiene de mapas de zonificación sísmica y códigos de construcción locales.

Valores típicos: Los coeficientes sísmicos varían dependiendo de la actividad sísmica de la región y pueden estar en el rango de 0.1 a 0.4.

Aceleración Sísmica de Diseño

Calculada utilizando la aceleración gravitacional (g) y el coeficiente sísmico:

Espectro de Respuesta

El espectro de respuesta sísmica se utiliza para determinar las fuerzas sísmicas en diferentes alturas del tanque. Este espectro varía dependiendo de la frecuencia natural del tanque y la aceleración sísmica de diseño.

Cálculo de Fuerzas Sísmicas

Las fuerzas sísmicas se calculan considerando la masa del tanque y su contenido, así como la distribución de la carga a lo largo de la altura del tanque.

Anexo B

Aspectos iniciales para el cálculo

Establecidas los datos de inicio para el diseño del modelo, se adopta el procedimiento generado por la matriz de cálculo. En este punto como segundo paso se abordan los espesores. En consecuencia, se abordan las condiciones del sitio (sitio meteorológico Inamhi) y dimensiones; tal como se muestra a continuación:

Presión	(kPa abs) :	60	
Temperatura	(°C) :	30	
Precipitaciones	(mm/año) :	400	
Evaporación	(mm/d) :		
Viento	(km/h) :	15	
Humedad Relativa Promedio	(-) :	80	
Zona Sísmica	(-) :	2	2
$Ao/g =$	(-) :	0,25	
Tipo de suelo (Según E-030) (Tabla 5.4)	(-) :	S-III	S-III
(Tabla 5.4)	T = (s) :	0,62	
	n = (-) :	1,8	

Dimensiones.

Altura del casco	(m) :	5,86	altura de la lamina (m) :	8
Altura Máxima de llenado	(m) :	4,68	fact. aire en el tanque	0,2
Diámetro interior	(m) :	4,94		
Volumen Nominal	$V_{nom} = (m^3) :$	114		
Volumen neto	$(m^3) :$	108		
Tipo de techo	Cónico soportado		Cónico soportado	
Angulo inclinación techo	$\beta = (^\circ) :$	10		
Número de anillos del manto	:	4		

En el cuadro deja en manifiesto los valores sombreados del color azul claro, mismos que representan las condiciones o datos de entrada para el diseño teniendo en cuenta las necesidades del campo. Tal es el caso del número de anillos, inclinación del y tipo de techo, diámetro interior y altura de lámina.

Diseño del cuerpo del tanque

En la se detallan las condiciones de diseño para tanques con las características descritas, teniendo en cuenta factores como temperatura del metal (dependiendo de la temperatura ambiente), capacidad, ubicación, densidad del líquido, tolerancia a la corrosión, velocidad del viento y

Espesor planchas tanque :

t_d = Espesor de Diseño
 t_t = Espesor Prueba hidrostática

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

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

D = 4,94 m (Diámetro del tanque)
 H = 5,86 m (Nivel del líquido para el punto de diseño)
 G = 1,00 - (Gravedad específica de diseño)
 S_d = 159,8 MPa (Esfuerzo admisible para las condiciones de diseño)
 S_t = 171,6 MPa (Esfuerzo admisible prueba hidrostática)
 E = 0,9 - (Eficiencia de la junta)
 CA = 2,0 mm ($S_{Coor.tanque}$ Espesor de corrosión considerado)

Anillo	Hidrostática	de prueba	sin Corrosión	de diseño	Comercial utilizar
[-]	Hidrostática (m)	t_t (mm)	t_d (mm)	t_d (mm)	t (Nota 1) (mm)
1	5,9	0,87	0,94	2,94	6
2	4,1	0,59	0,63	2,63	6
3	2,3	0,3	0,33	2,33	6
4	0,5	0,0	0,03	2,03	6

Nota: La eficiencia de la junta se establece en un 90% con el propósito de establecer un diseño ajustado y los 6 mm para espesores recomendados y comerciales.

Espesor de la plancha del techo

Para el desarrollo del espesor de plancha se considera el literal 3.10 de la norma API 650 denominada techos en el cual se establecen todas las características que la plancha del techo debe cubrir con el propósito de aplicar la norma. Esto se destaca en la figura mostrada a continuación:

Tipo de techo Cónico soportado

Esesor del techo	t_r		
Carga total mínima:	$C_{tot.min} =$	1,2 kPa	[1] #3.10.2.1
Esesor mínimo:	$t_{min} =$	5 mm	[1] #3.10.2.2
Esesor máximo:	$t_{max} =$	12,5 mm	
Angulo mínimo:	$\beta_{min} =$	9,5 °	
Angulo máximo:	$\beta_{max} =$	37 °	
Esesor de corrosión:	$S_{Coor.techo} =$	2,0 mm	

$$t_r = \frac{D}{4.8 \cdot \text{sen}(\beta)} + CA \quad [1] \# 3.10.5.1$$

D =	4,94 m
b =	10 °
$S_{Coor.techo} =$	2,0 mm
$t_r =$	7,93 mm

Factor de corrección para el esesor del techo

Presión total Ct

$$Ct = C_v + C_m$$

Carga Vivas

Cargas Muertas (peso propio)

Cv: Presión por Cargas por vientos + Cargas por Personas

Cm: Presión por Peso techo Cónico + Accesorios

En el caso que la carga total Ct exceda 2,2 kPa (0.022 kp/cm²) se multiplica el esesor de la Plancha del techo por el siguiente factor:

$$F : \sqrt{\frac{C_v + C_m}{0.022}}$$

$$t_{\text{corregido}} = t_r * F$$

La figura destaca el esesor del techo con relación a la carga necesaria a soportar, teniendo en consideración el factor de corrección y la corrosión.

Determinación de la carga de viento

En lo que respecta a la carga de viento, esta información se describe en la figura detallada a continuación. Esta deja en evidencia la presión ejercida sobre las áreas proyectadas en las superficies cilíndricas, cónicas curvas y planas verticales del tanque.

Presión del viento para diferentes elementos

	Presión P	
Sobre Areas proyectadas de superficies cilíndricas	0,86	kPa
Sobre Areas proyectadas de superficies cónicas y curvas	0,72	kPa
Sobre Areas proyectadas superficies planas verticales	1,4	kPa

Estas presiones están basadas en una velocidad de viento de V = 160 km/h

Para velocidades de viento diferentes a 160 km/h, se debe utilizar el siguiente factor de corrección

$$f = \left(\frac{V}{160} \right)^2$$

V = 15 km/h
f = 0,009 [-]

La figura muestra que la carga de viento aplicada requiere de un análisis exhaustivo que considere las áreas proyectadas: cilíndricas, cónicas, curvas y planas verticales.

Presiones debidas al viento

En este apartado se destacan las cargas aplicadas para los cálculos desarrollados en la matriz teniendo con consideración cargas vivas, muertas, peso del techo, presión debida al peso y presión total. Esta información se encuentra destacada en las figuras mostradas a continuación con base en las estimaciones de la norma API 650.

		Presión	Presión corregida	
		P kPa	P _{corregida} kPa	kp/cm ²
C1	Superficie cilíndrica	0,86	0,01	8E-05
C2	Superficie cónica	0,72	0,01	6E-05
C3	Superficie plana	1,4	0,01	1E-04

Presiones debidas a cargas por personas

Cargas vivas debidas a personas y equipos

Carga por Personas (Cp)	10000 N	1000 Kp
Carga por equipos (Ce)	10000 N	1000 Kp

Carga móvil Mmov = Cp + Ce
Mmov = 20000 N 2000 Kp

Superficie afectada A = Atecho

$$A_{techo} = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = 4,94 \text{ m}$$

$$A_{techo} = 19,5 \text{ m}^2$$

$$A_{techo} = \pi \left(\frac{D}{2} \right) \left(\frac{D}{2 \cos(\beta)} \right)$$

En la figura se deja en evidencia las cargas aplicadas al tanque teniendo en consideración la presión ejercida en las superficies cilíndrica, cónica y plana. A la par de las cargas debidas a personas y equipos con un valor de 1000 Kp respectivamente. Por último, se enlista la carga móvil de 2000 N.

Presión debida a la carga móvil

C4 = Mmov / A		Cargas vivas		
Mov = 2000 N	2041 Kp		Cv = C2 + C4	
A = 19,5 m ²			C2 = 0,006	0,000 Kp/cm ²
C4 = 1027,6 Pa	105 Kp/m ²		C4 = 1,028 kPa	0,010 Kp/cm ²
C4 = 1,028 kPa	0,0105 Kp/cm ²		Cv = 1,03 kPa	0,011 Kp/cm ²

En la figura se exponen las cargas debidas a la presión con un valor de 1.028 KPa con el propósito de analizar el sistema a su máximo alcance y así valorar su resistencia.

Peso techo Cónico:

$$W_b = \pi \left(\frac{D}{2} \right) \left(\frac{t_b}{1000} \right) \left(\frac{D}{2 \cos(\beta)} \right) \cdot \gamma$$

D = 4,94 m
 t_{techo} = 8 mm
 β = 10 °
 γ = 7850 kp/m³ (Peso específico Acero)
 W_b = 1,2 Ton 11990 N
 Area proyectada techo
 A_{techo} = 19,5 m²

Presión debida al peso

$$C_m = \frac{W_b}{A_{techo}}$$

W_b = 11990 N
 A_{techo} = 19,5 m²
 C_m = 616,068 Pa 0,62 kPa

Presión total

$$C_t = C_v + C_m$$

C_v = 1,03 kPa
 C_m = 0,6 kPa
 C_t = 1,65 kPa Ct < 2.2 kPa
 No se requiere usar factor de corrección (F = 1)

$$t_{\text{corregido}} = t_r \cdot F$$

t_r = 7,93 mm
 F = 1
 t_{corregido} = 7,927 mm

Espesor corregido

t_{techo} = **8 mm**

En la figura se evidencia que estas cargas permiten solventar los requerimientos puntuales de la norma API 650 con el objetivo de generar un sistema que pueda mantenerse estable en el tiempo y desde luego efectuar la aplicación para la cual fue destinado.

Espesor de la plancha de fondo

De acuerdo con el literal 3.4.1 de la norma, las planchas del fondo deberán tener un espesor mínimo de 6 mm, al cual se le deberá agregar el espesor de corrosión del caso.

$$t_{min} = 6 \text{ mm}$$

En el caso del tipo de tanque considerado, la placa del fondo sólo cumple la función de asegurar la hermeticidad, razón por la cual corresponde utilizar el espesor mínimo aceptado por la norma.

$$t_{diseño} = t_{min} = 6 \text{ mm}$$

Desde esta perspectiva el espesor de la placa de fondo es entonces como se destaca en la expresión descrita a continuación:

$$t_b = t_{diseño} + t_{corrosión}$$

$$t_b = 6 + 3 \text{ mm}$$

$$t_b = 9 \text{ mm}$$

Nota: Desde esta perspectiva se selecciona un espesor comercial para el fondo.

Cálculo del perfil de coronamiento

Para el desarrollo de este apartado es necesario detallar que se emplea la figura 2 de la norma API 650.

$R_c =$	$D / 2$	Radio del tanque
$D =$	4940 mm	Diámetro del tanque
$R_c =$	2470 mm:	
$t_c =$	6 mm:	Espesor de la pared del tanque, anillo superior
$R_2 =$	$R_c / \sin(b)$	Longitud de la normal al techo , medida desde el eje vertical de Figura F-2, [1]
$R_c =$	2470 mm	
$b =$	10 °	
$R_2 =$	14224 mm	

En la figura se destaca que para establecer el perfil de coronamiento se debe considerar el radio del tanque, su diámetro, espesor de pared y por último la longitud de la normal al techo.

t_h	8 mm:	Esesor plancha del techo
t_s	8 mm:	Esesor plancha pared con esesor aumentado (N/A)
$w_c =$	$0.6 * (R_c * t_s)^{0.5}$	Esesor máximo de la pared participante
$R_c =$	2470 mm	
$t_s =$	8 mm	
$w_c =$	84 mm:	
Ancho máximo del techo participante.		
$w_h =$	$0.3 * (R_2 * t_h)^{0.5}$	o $w_h =$ 300 mm
$R_2 =$	14224 mm	
$t_h =$	8 mm	
$w_h =$	101 mm:	
y se elige el valor menor		
$w_h =$	101 mm	

La figura destaca el perfil de coronamiento para el desarrollo del tanque teniendo en consideración el esesor de la plancha del techo y finalmente el esesor aumentado. Por otro lado, el área participante de la unión del techo con la pared del estanque "S" se determina de acuerdo con el literal 3.10.5.2.

$$S = (D^2)/(0.432 * \sin(b))$$

$$D = 4,94 \text{ m}$$

$$b = 10^\circ$$

$$S = 325 \text{ mm}^2;$$

Según el párrafo 3.1.5.9 API 650, para tanques de techo auto soportados de diámetros menores o iguales a 11 m, el mínimo perfil a usar es C4 x 5.4.

Medidas a Usar	76,2	x	38,1	x	6,93
A_{PERFIL} mm ² :	744 mm ² :				

El área participante A_p de acuerdo a la figura F-2 [1]
 Esta es la suma de las áreas indicadas en cada caso de la figura F-2

$$A_p = t_c * w_c + t_h * w_h + P_{\text{perfil}}$$

$t_c =$	6 mm
$w_c =$	84 mm
$t_h =$	8 mm
$w_h =$	101 mm
$P_{\text{perfil}} =$	744 mm ²
$A_p =$	2060 mm ²

La figura denota el cálculo del área participante con respecto a la superficie del tanque. Además, la norma requiere que el área participante A_p sea mayor que la sección mínima requerida S ; por ende:

$$A_p = 2060 \text{ mm}^2$$

$$S = 325 \text{ mm}^s$$

Teniendo en consideración que: $Ap > S$; para tal caso el área unión techo-manto es correcta.

Análisis por viento

El momento de volcamiento debido a las fuerzas producidas por el viento aplicadas en las áreas proyectadas del casco y el techo se denotan a continuación, teniendo como referencia el literal 3.11.1 de la norma (estabilidad de vuelco). Esta información se destaca en la tabla expuesta a continuación.

TIPO DE CARGA	VALOR
Peso del tanque	5.1911 Tn (Toneladas)
Peso total del tanque + accesorios	118.8 Tn (Toneladas)
Fuerza de roce	59.4 Tn (Toneladas)
Fuerza Sísmica	3.9 Toneladas

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

Análisis sísmico

El momento de volcamiento debido a las fuerzas sísmicas en la base del manto queda determinado por la siguiente relación y también se muestra su resumen en la tabla 2.4. mostrada a continuación:

$$M = Z * I * (C_1 * W_s * X_s + C_1 * W_r * H_t + C_1 * W_1 * X_1 + C_2 * W_2 * X_2)$$

TIPO DE CARGA	VALOR
Factor de zona sísmica Z	0.075
Factor de importancia I	1.2
Coefficiente de fuerza sísmica lateral modo impulsivo C1 API650	0.60

Coeficiente de fuerza sísmica lateral modo convectivo C2 API650	0.48
Coeficiente de fuerza sísmica lateral modo impulsivo C1 Nch 2369	0.32
Coeficiente de fuerza sísmica lateral modo convectivo C2 Nch 2369	0.159
Peso de manto W_s	2.61 Tn
Peso del techo W_r	1.22 Tn
Altura de aplicación de fuerza sísmica X_s	2.93 m
Altura total del casco H_t	5.86 m
Peso de la masa efectiva del contenido W_1	62 Tn
Distancia de aplicación de la fuerza sísmica W_1 desde la base X_1	2.17 m
Peso de la masa efectiva del modo de vibración del contenido W_2	46.6 Tn
Distancia de aplicación de la fuerza sísmica W_2 desde la base X_2	3.52 m

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

Como indica la tabla 2.4, la Nch 2369 (norma chilena que se refiere al diseño y construcción de estructuras sometidas a cargas sísmicas) el Mínimo C2 debe ser equivalente a $0.1 \cdot A_0/g$ según Párrafo 11.8.8. Es decir, el coeficiente sísmico mínimo C2 se calcula como el 10% de la relación entre la aceleración máxima en la base del tanque y la aceleración de la gravedad.

C_2 mínimo a utilizar : 0,159

Por lo tanto:

M_{API} = MOMENTO SISMICO (Según API 650) (ton*m) : **15**

M_{NCh} = MOMENTO SISMICO (Según Nch 2369) (ton*m) : **89**

$$M = \text{Max}(M_{API}, M_{NCh})$$

$$M = 89 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

En la figura se destaca las dos tipologías de cargas o momentos a ser aplicadas dentro del diseño ya sea para la norma API 650 así como la Nch 2369 hasta llegar al valor puntual de 89 ton*m.

Análisis de deslizamiento

El desplazamiento lateral se da lugar si la fuerza sísmica generada es mayor que la fuerza de fricción del suelo. Las fuerzas sísmicas y de fricción vienen dadas por las siguientes expresiones (las condiciones para las fuerzas sísmicas se dan en la Sección 5.1).

$$F_Z = Z \cdot I \cdot (C_1 \cdot W_S + C_1 \cdot W_r + C_1 \cdot W_1 + C_2 \cdot W_2)$$

$$F_C = W_{total} \cdot \mu$$

Donde:

W_{total} Peso total del estanque
 $W_{total} = W_S + W_t + W_T + W_f$

W_S peso del manto (shell)

$$W_S = \text{Pi}() \cdot d \cdot g \cdot H \cdot (s_1 + s_2)$$

$$D = 4,94 \text{ m}$$

$$g = 7,8 \text{ ton/m}^3$$

$$H_{anillo} = 1,8 \text{ m}$$

$$s_1 = 0,006 \text{ m} \quad \text{Espesor anillo 1}$$

$$s_2 = 0,006 \text{ m} \quad \text{Espesor anillo 2}$$

$$W_S = 2,61 \text{ ton}$$

$W_r =$ Peso del techo

$$W_r = 1,22 \text{ ton} \quad (\text{de Hoja espesores})$$

W_T Peso del contenido

$$W_T = V_{nom} \cdot g$$

$$V_{nom} = 114 \text{ m}^3$$

$$g = 1,000 \text{ ton/m}^3 \quad (\text{Peso específico Fluido})$$

$$W_T = 114 \text{ ton}$$

$W_b =$ Peso del fondo

$$W_b = (\pi/4) \cdot D^2 \cdot s_b \cdot g$$

$$D = 4,94 \text{ m}$$

$$t_b = 0,009 \text{ m}$$

$$g = 7,85 \text{ Ton/m}^3$$

$$W_b = 1,4 \text{ Ton}$$

Es destacable de la figura 2.15 que con el propósito de que el estanque no deslice producto de los movimientos sísmicos.

FC	Fuerza de roce	(ton) :	59,4
FZ	Fza. Sísmica	(ton) :	3,93

La figura 2.16 por su parte destaca que: como $F_c > F_z$; el tanque no se desliza, este valor representa la apreciación puntual de la norma API 650.

Análisis del volcamiento

En este aspecto se considera el peso de resistencia al volcamiento descrito en la tabla 2.5. expuesta a continuación, para tanques no anclados.

TIPO DE CARGA	VALOR
Peso máximo del contenido W_l	22649 N/m
W_{lmax}	4531 N/m
Peso del manto y techo W_{s+r}	3.84 Tn
Peso por unidad del perímetro W_t	2445 N/m

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

Para el caso de la compresión del manto. Se inicia con la evaluación de la fuerza longitudinal máxima en la parte inferior de la pared. Teniendo en consideración que Si el valor "e" es menor o igual a 0,785. Esta información se destaca en la figura.

$$e = M / (D^2 * (w_L + w_t))$$

$M = 88,9 \text{ ton m}$
 $D = 4,94 \text{ m}$
 $w_L = 0,46 \text{ ton/m}$
 $w_t = 0,25 \text{ ton/m}$
 $e = 5,138 \quad \text{Valor mayor que } 0.785$

Por otro lado, la figura establece que la fuerza longitudinal máxima "b" en la base de la pared, en N/m de la circunferencia de la pared, solo para el caso en que $e < 0.785$ está dada por:

$$b = wt + 1.276 * M / D^2$$

$$wt = 0 \text{ ton/m}$$

$$wt = 2425 \text{ N/m}$$

$$M = 89 \text{ ton * m}$$

$$M = 872273 \text{ N m}$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$b = 48034 \text{ N/m}$$

$$b = 5 \text{ ton/m}$$

Esfuerzo máximo admisible de compresión en la pared
 $e_s = b / (1000 * t) * b / (12 * t)$

t: espesor del anillo inferior, excluido el espesor de corrosión
 $b = 48034 \text{ N/m}$
 $t = 0,94 \text{ mm}$
 $e_s = 219698$

emax valor limite del índice de volcamiento : 1,57
e índice de volcamiento : 5,14

Nota: Por lo tanto: como $e > e_{max}$; es decir el tanque es inestable al volcamiento necesita anclaje.

Análisis de falla local

La falla se presenta si la tensión de trabajo (F_b) supera la tensión de compresión máxima admisible (F_a). La tensión de trabajo está dada por la expresión destaca a continuación y la información resumida se evidencia en la tabla 2.6:

$$F_b = \frac{b}{t}$$

TIPO DE CARGA	VALOR
Fuerza máxima de compresión b	47927 N*m
Espesor del primero anillo sin corrosión t	4 mm
Tensión de trabajo F_b	11.98 Mpa

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

El esfuerzo longitudinal de compresión F_b no debe exceder el esfuerzo máximo admisible F_a , por ende, el tanque no excede los esfuerzos admisibles y se desarrollará con normalidad.

Tipo de carga	Valor
Esfuerzo máximo admisible Fa	67.21 MPa

Nota: para más información de las cargas verificar el anexo B

Al respecto de la tabla es destacable que, una vez analizado el valor de los esfuerzos, el de trabajo es menor que el admisible. En consecuencia, no existe sobrecarga en el diseño del tanque.

Determinación de los anclajes

Para el punto en específico se detallan cada uno de los pernos, sollicitación y diseño de llaves de corte. Esta información se destaca en la figura.

PERNOS DE ANCLAJE	
Material Pernos de Anclaje	A307
Tensión Fluencia	A307 kp/cm ² : 2320
Tensión Admisible	kp/cm ² : 1160,00
Mínimo Diámetro Perno	pulg : 1,0
Cantidad	: 12
Angulo separación	grad : 45
Arco de separación	m : 2,10
wt	ton : 2,66
SOLICITACIÓN	

Fuerza solicitante	ton : 69,16
Fuerza sobre el perno	ton : 5,76
Tensión de trabajo pernos	kp/cm ² : 0,33
DISEÑO LLAVES DE CORTE	
Diámetro interno casco	m : 4,94
Diámetro exterior casco	m : 4,95
Diámetro de pernos	m : 5,34
Diámetro exterior fondo de tanque	m : 5,74
Tensión Fluencia Llaves de Corte	kg/cm ² : 2530
Tensión Admisible Llaves de Corte	kg/cm ² : 1265
Carga por llave de Corte Vcorte	Ton 0,33
Area mínima llave de Corte	cm ² : 0,35
Espesor Llave de Corte	mm 8
Largo Mínimo Llave de Corte	cm : 10
Altura mínima Llave de Corte	cm : 10
Tensión fluencia Hormigón Hormigón	kg/cm ² : 210
Tensión Admisible Hormigón	kg/cm ² : 137
Tensión Contacto Llave - Hormigón	kp/cm ² : 3

Por lo tanto:

como $F_h > R_y$ tensión de contacto llave de corte hormigón, Resiste

Factor de Seguridad	F_h/R_y	[-]	41,7
Area Total Llave		cm^2 :	15
Tensión Admisible Llave de Corte	V_{adm}	Ton :	9,7

Por lo tanto: Como $V_{adm} > V_{corte}$ Llave Corte Resiste los esfuerzos

Factor de Seguridad	V_{adm}/V_{corte}	[-]	29,7
---------------------	---------------------------------------	-----	------

El momento de volcamiento debido a las fuerzas producidas por el viento aplicadas en las áreas proyectadas del casco y el techo se denotan a continuación, teniendo como referencia el literal 3.11.1 de la norma (estabilidad de vuelco). Esta información se destaca en la figura expuesta a continuación.

Carga cuerpo cilíndrico	C1	$0.0087 * f$	$8E-05$ [kp/cm ²]
Carga viento techo cónico	C2	$0.0073 * f$	$6E-05$ [kp/cm ²]

$$H_t = 5,86$$

$$H_{cono} = 0,436$$

$$H_{total} = 6,296$$

A1	Área Proyectada Cuerpo Cilíndrico	cm^2	289484
A2	Área Proyectada Techo Cónico	cm^2	10758

F1:	Fuerza Aplicada en el Cuerpo Cilíndrico	C1*A1 Ton	0,0223
F2:	Fuerza Aplicada en el Techo Cónico	C2*A2 Ton	0,0007
W	Peso estanque	Ton	5,1911

El momento resistente al viento esta determinado por la siguiente expresión

$$M_R = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{W \cdot D}{2} \right) \quad \#3.11.2$$

M	MOMENTO POR VIENTO	(ton*m) :	0,0695
M _R	MOMENTO RESISTENTE AL VIENTO	(ton*m) :	4,3828

	Peso del Manto sin corrosión	(ton) :	1,7431
	Peso del Techo sin corrosión	(ton) :	0,9167
	Peso del Fondo sin corrosión	(ton) :	0,0018
	Peso Total Estanque sin corrosión	(ton) :	2,6616

$$\begin{aligned}
 W_{total} &= W_s + W_t + W_T + W_f \\
 W_s &= 2,61 \text{ ton} \\
 W_r &= 1,22 \text{ ton} \\
 W_T &= 113,6 \text{ ton} \\
 W_b &= 1,35 \text{ ton} \\
 W_{total} &= 118,8 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Fuerza de roce

FC	Fuerza de roce
μ	Coefficiente de roce
N	Fuerza normal o Peso Total (Wtotal)

$$\begin{aligned}
 FC &= m * N \\
 m &= 0,50 \\
 N &= 118,8 \text{ ton} \\
 FC &= 59,4 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Fuerza sísmica

$$\begin{aligned}
 F_z &= Z * I * (C1 * W_s + C1 * W_r + C1 * W1 + C2 * W2) \\
 Z &= 0,075 \\
 I &= 1,20 \\
 C1 &= 0,32 \\
 W_s &= 3 \\
 W_r &= 1,22 \\
 W1 &= 62 \\
 C2 &= 0,48 \text{ (API)} \\
 W2 &= 46,6 \\
 F_z &= 3,9 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

En este aspecto se considera el peso de resistencia al volcamiento descrito en la tabla expuesta a continuación, para tanques no anclados.

$$w_L = 99 * t_b * (F_{by} * G * H)^{0.5} \quad \text{N/m}$$

w_L : peso max del contenido utilizado para resistir el momento de volcamiento
 t_b : Espesor de la placa bajo la pared
 F_{by} : Tensión de fluencia
 G : Gravedad específica
 H : Nivel de diseño máximo del líquido

Espesor de placa a ser aplicado de acuerdo a [1] E.4.2
 $t_b = 6 \text{ mm}$

$$w_L = 99 * t_b * (F_{by} * G * H)^{0.5}$$

$t_b = 6 \text{ mm}$
 $F_{by} = 248,1 \text{ Mpa}$
 $G = 1$
 $H = 5,86 \text{ m}$
 $w_L = 22649 \text{ N/m}$

Sin embargo, el valor máximo que puede tener w_L es

$$w_{Lmax} = 196 * G * D * H$$

$G = 1$
 $D = 4,94 \text{ m}$
 $H = 4,68 \text{ m}$
 $w_{Lmax} = 4531$

Valor a utilizar

$$w_L = \text{MIN}(w_L, w_{Lmax})$$

$w_L = 4531 \text{ N/m}$
 $w_L = 0,46 \text{ ton/m}$

Peso del manto y techo

w_t peso del manto y la porción fija de techo (ton/m circunf.) :
 soportada por el manto
 $W_{str} = W_s + W_r$
 $W_s = 2,61 \text{ ton}$ peso del manto
 $W_r = 1,22 \text{ ton}$ peso del techo
 $W_{str} = 3,84 \text{ ton}$

El momento de volcamiento debido a las fuerzas sísmicas aplicadas en la base del manto queda determinado por la siguiente relación:

$$M=Z \cdot I \cdot (C_1 \cdot W_S \cdot X_S + C_1 \cdot W_r \cdot H_t + C_1 \cdot W_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot W_2 \cdot X_2)$$

Donde:

M	Momento de volcamiento aplicado a la base del estanque	N-m	
Z	Factor de zona sísmico (Según API 650) Appendix E.	1	0,075 <input type="text" value="1"/>
I	factor de importancia instalaciones (Según API 650)	:	<input type="text" value="1,2"/>
Ao/g	Aceleración Sísmica Efectiva Máxima (Según E-030)	(m/s ²)	: 0,25
T	Datos tipo de suelo	(s)	: 0,62
n	Datos tipo de suelo	(-)	: 1,8
R	Factor de Reducción Estructural	(-)	: 1 <input type="text" value="1"/>
ξ	Razón de Amortiguamiento	(-)	: <input type="text" value="0,005"/>
W_S	peso del manto	(ton)	: 2,61
W_r	peso del techo	(ton)	: 1,22
W_T	peso del contenido	(ton)	: 114
W_b	peso del fondo	(ton)	: 1,35
X_s	altura de aplicación de la fuerza sísmica	(m)	: 2,93
H_t	altura total del casco	(m)	: 5,86
S	coeficiente de suelo (Según API 650) S3	:	1,50 <input type="text" value="S3"/>
k	Factor K (Según API 650)	:	<input type="text" value="0,58"/>
T	periodo natural del 1er modo de onda (Según API 650)	(seg)	: 2,33
C₁	Coef. fza. sísmica lateral modo Impulsivo (Según API 650)	:	<input type="text" value="0,60"/>
C₂	Coef. Fza. sísmica lateral modo Convectivo (Según API 650)	:	0,48
C₁	Coef. fza. sísmica lateral modo Impulsivo (Según Nch 2369)	:	<input type="text" value="0,32"/>
C₂	Coef. Fza. sísmica lateral modo Convectivo (Según Nch 2369)	:	0,159
D/H	razón de diámetro v/s altura	:	1,06
W₁/W_T	Factor W ₁ /W _T . [1] E.3.2.1., Figura E-2		<input type="text" value="0,55"/>
W₂/W_T	Factor W ₂ /W _T . [1] E.3.2.1., Figura E-2		<input type="text" value="0,41"/>
W₁	peso de la masa efectiva del contenido de trabajo con el manto. W1 = WT * (W1/WT)	(ton)	: 62 [↗]
W₂	peso de la masa efectiva del modo de vibración del contenido W2 = WT * (W2/WT)	(ton)	: 46,6 [↗]
X1/H	Factor X1/H. [1] E.3.2.2., Figura E-3		<input type="text" value="0,37"/>
X2/H	Factor X2/H. [1] E.3.2.2., Figura E-3		<input type="text" value="0,60"/>
H	Nivel de líquido de diseño, máximo	m	4,68
X₁	distancia de aplicación de la fuerza sísmica W1 desde la base. [1] E.3.2.2.	(m)	: 2,17 [↗]
X₂	distancia de aplicación de la fuerza sísmica W2 desde la base	(m)	: 3,52 [↗]

Tensión a la compresión

Valor auxiliar r

$$r = \frac{G \cdot H \cdot D^2}{t^2}$$

$$G = 1$$

$$H = 4,68 \text{ m}$$

$$D = 4,94 \text{ m}$$

$$t = 4,00 \text{ mm}$$

$$r = 7$$

$$\text{Si } r \geq 44$$

entonces :

$$F_a = \frac{83 \cdot t}{D}$$

$$t = 4,0 \text{ mm}$$

$$D = 4,94 \text{ m}$$

$$F_a = 67,21 \text{ MPa}$$

$$\text{Si } r < 44$$

entonces :

$$F_a = \frac{83 \cdot t}{2,5 \cdot D} + 7,5 \cdot (G \cdot H)^{0,5}$$

$$t = 4,0 \text{ mm}$$

$$D = 4,94 \text{ m}$$

$$G = 1$$

$$H = 4,68 \text{ m}$$

$$F_a = 43,1 \text{ MPa} \quad \text{Caso } r < 44$$

Valor de F_a , correspondiente al valor calculado de r

$$F_b = 12,0 \text{ MPa} \quad \text{Esfuerzo de trabajo}$$

$$F_a = 43,1 \text{ MPa} \quad \text{Esfuerzo máximo admisible}$$

CALCULO DE VOLUMENES DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

RELACION $\emptyset \times H=1.2$				CUANDO CONOZCO EL VOLUMEN							
CASO 1 CUANDO LA ALTURA ES MAYOR AL DIAMETRO DEL TANQUE				CASO 4 CUANDO QUIERO CONOCER EL DIAMETRO							
DATOS:				DATOS:							
$\emptyset=$	4,94	m	VOLUMEN=	113,6195	m ³	VOLUMEN=	0	m ³	$\emptyset=$	#iDIV/0!	m
R=	2,47	m				ALTURA	0	m			
PI=	3,1416	-	AREA=	19,1665874	m ²	PI	3,1416	-	FACTOR 1.2>	#iDIV/0!	
ALTURA=	5,928	m									
CASO 2 CUANDO LA ALTURA ES MENOR AL DIAMETRO DEL TANQUE				CASO 5 CUANDO QUIERO CONOCER EL DIAMETRO							
DATOS:				DATOS:							
$\emptyset=$	5,57	m	VOLUMEN=	113,1033	m ³	VOLUMEN=	0	m ³	ALTURA=	#iDIV/0!	m
R=	2,785	m				\emptyset	0	m			
PI=	3,1416	-	AREA=	24,3669565	m ²	PI	3,1416	-	FACTOR 1.2>	#iDIV/0!	
ALTURA=	4,64166667	m									
CASO 3 CUANDO NO HAY NINGUNA RELACION											
DATOS:											
$\emptyset=$	0	m	VOLUMEN=	0	m ³						
R=	0	m									
PI=	3,1416	-	AREA=	0	m ²						
ALTURA=	0	m									

Nota: La información de color azul permite modificar el programa conforme en los requerimientos del modelo a diseñar o testear.