

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE UN TANQUE DE AGUA PARA AUMENTAR LA
CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DEL SISTEMA
CONTRA INCENDIOS EN LA REFINERÍA IQUITOS**

TESIS

Presentada por:

Bach. Froylan Gonzales Bautista

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO MECÁNICO

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

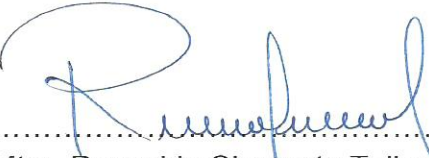
DISEÑO DE UN TANQUE DE AGUA PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DEL SISTEMA CONTRA INCENDIOS EN LA REFINERÍA IQUITOS

Tesis sustentada y aprobada el 07 de noviembre del 2025, estando el
Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Jesús Plácido Medina Salas

1er. MIEMBRO
(SECRETARIO)


.....
Mtro. Reynaldo Clemente Telles Ríos

2do. MIEMBRO
(VOCAL)


.....
Dr. Francisco Gamarra Gómez

ASESOR


.....
Dr. Francisco Gamarra Gómez

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Francisco Gamarra Gómez, en mi condición de Asesor acreditado por la Resolución de Facultad N°8465-2024-FAIN/UNJBG del 15 de febrero del 2024, del trabajo de tesis titulado: "DISEÑO DE UN TANQUE DE AGUA PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DEL SISTEMA CONTRA INCENDIOS EN LA REFINERÍA IQUITOS". Presentado por el bachiller Froylan Gonzales Bautista con código N° 2017-104044, para optar el título profesional de Ingeniero de Mecánico.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual TURNITIN**, cuenta con el **nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 10 %**. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 17 noviembre 2025



FIRMA ASESOR

Nombres y apellidos: FRANCISCO GAMARRA GÓMEZ

ORCID: 0000-0002-3737-5610

DNI: 00413878



Huella Digital



FIRMA TESISTA

Nombres y apellidos: FROYLAN GONZALES BAUTISTA

DNI: 72646750



Huella Digital

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre, Agripina, por su amor incondicional y constante apoyo a lo largo de los años. Gracias por ser un ejemplo de fortaleza, entrega y dedicación.

A mi hermana Gladis, por su respaldo y confianza en cada etapa de este camino.

Y a mis sobrinos Carlos y Andre, porque deseo ser para ellos un ejemplo y un guía.

A todos ellos, mi más profundo cariño y eterno agradecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a todas las personas que hicieron posible la culminación de esta etapa.

En primer lugar, a mi familia, por su apoyo emocional y su confianza.

A mis docentes y asesores, por compartir su conocimiento, orientación y compromiso durante este proceso.

A todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron con palabras de aliento, apoyo técnico o motivación en los momentos clave.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Antecedentes del problema a investigar.....	3
1.2. Descripción del problema.	4
1.3. Formulación del problema.	4
1.3.1. Problema general.....	4
1.3.2. Problemas específicos.....	5
1.4. Objetivos de la investigación.....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.	5
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	5
1.6. Limitaciones.....	6
1.6.1. Limitaciones temporales.	6
1.6.2. Limitaciones espaciales.....	6
1.6.3. Limitaciones económicas.....	6
1.7. Viabilidad del estudio.....	7

1.8.	Formulación de hipótesis.	7
1.9.	Variables.	7
1.9.1.	Variable independiente.	7
1.9.2.	Variable dependiente.	8
1.10.	Operacionalización de variables.	8
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO		10
2.1.	Antecedentes del trabajo de investigación.	10
2.1.1.	Antecedentes internacionales.	10
2.1.2.	Antecedentes nacionales.	10
2.2.	Bases teóricas.	11
2.2.1.	Metodología VDI 2221.	11
2.2.2.	Normas para la protección contra incendios (NFPA 22).	12
2.2.3.	Normas de construcción de tanques de acero (API 650).	14
2.2.4.	Análisis de criticidad y riesgo.	15
2.2.5.	Hidrostática y presión de diseño.	16
2.2.6.	Principios de resistencia de materiales.	17
2.2.7.	Análisis estructural (Teoría de elementos finitos).	18
2.2.8.	Ingeniería de materiales y corrosión.	20
2.3.	Definiciones conceptuales.	21
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO		24
3.1.	Planteamiento metodológico.	24
3.1.1.	Diagnóstico del problema.	24

3.1.2.	Recopilación de exigencias.....	24
3.1.3.	Generación de soluciones (Concepción).....	24
3.1.4.	Evaluación y selección de la solución.....	24
3.1.5.	Diseño de detalle.....	25
3.1.6.	Validación del diseño.....	25
3.2.	Población y muestra.....	25
3.2.1.	Población.....	25
3.2.2.	Muestra.....	25
3.3.	Equipos y materiales.....	25
3.4.	Procedimiento de las pruebas experimentales.....	27
3.5.	Técnicas de recolección de datos.....	27
3.5.1.	Revisión de documentación y normativas (Análisis documental).....	27
3.5.2.	Observación directa.....	27
3.5.3.	Entrevistas y consultas con expertos.....	28
3.5.4.	Medición de parámetros.....	28
3.6.	Técnicas para el procesamiento de datos.....	28
3.6.1.	Procesamiento de datos cuantitativos.....	28
3.6.2.	Procesamiento de datos cualitativos.....	28
3.6.3.	Síntesis y visualización.....	29
CAPÍTULO IV RESULTADOS		30
4.1.	Descripción de las pruebas experimentales.....	30
4.1.1.	Lista de deseo y exigencias.....	30

4.1.2. Caja negra.	31
4.1.3. Concepto de solución.	32
4.1.4. Estructura de funciones.	32
4.1.5. Matriz morfológica.	33
4.1.6. Alternativas de solución.	38
4.1.7. Evaluación de los conceptos de solución.	41
4.1.8. Evaluación del proyecto.	44
4.2. Elaboración del proyecto.	44
4.2.1. Criterios del diseño.	44
4.2.2. Cálculos geométricos.	46
4.2.3. Cálculos de elementos mecánicos.	48
4.2.4. Estabilidad estructural.	81
4.2.5. Ventilación del tanque.	92
4.3. Contrastación de hipótesis.	95
CAPÍTULO V DISCUSIÓN.	97
5.1. Pruebas de validación.	97
5.2. Alternativas de solución.	108
5.3. Contraste con trabajos de investigación similares.	109
CONCLUSIONES.	113
RECOMENDACIONES.	115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	116
ANEXOS.	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Operacionalización de variables independiente y dependiente.</i>	9
Tabla 2	<i>Tabla de equipos y materiales.</i>	26
Tabla 3	<i>Lista de exigencia del diseño de tanque de agua.</i>	30
Tabla 4	<i>Evaluación técnico de cada concepto.</i>	41
Tabla 5	<i>Evaluación económico de cada concepto.</i>	42
Tabla 6	<i>Evaluación técnico – económico.</i>	43
Tabla 7	<i>Condiciones Ambientales.</i>	45
Tabla 8	<i>Materiales para la construcción del tanque.</i>	45
Tabla 9	<i>Boquillas del tanque.</i>	46
Tabla 10	<i>Espesores de corrosión admisible en anillos del tanque.</i>	48
Tabla 11	<i>Niveles de líquido de diseño.</i>	49
Tabla 12	<i>Espesores de planchas de cilindro.</i>	51
Tabla 13	<i>Espesores de placa anular en mm.</i>	53
Tabla 14	<i>Dimensiones y propiedades del perfil W10x22 en SI y margen de corrosión de 1,5mm.</i>	60
Tabla 15	<i>Dimensiones y propiedades de la tubería 14”, sch.40, en SI y margen de corrosión de 1,5mm.</i>	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Caja negra del concepto de solución.	31
Figura 2. Estructura de funciones de la caja negra.	32
Figura 3. Matriz morfológica de cada concepto.	34
Figura 4. Tanque de agua de acero.....	39
Figura 5. Tanque de agua de hormigón armado.....	40
Figura 6. Tanque prefabricado modular.	41
Figura 7. Evaluación técnico - económico.....	44
Figura 8. Dimensiones del tanque.....	48
Figura 9. Dimensiones y propiedades de perfil I W10x22.	60
Figura 10. Diagrama de cargas en función de la longitud libre de la viga.	67
Figura 11. Diagrama de reacciones en los apoyos.....	67
Figura 12. Diagrama de fuerza cortante y momento flector.	68
Figura 13. Dimensiones y propiedades de tubería 14", sch.40.....	72
Figura 14. Dimensiones de placa base.....	76
Figura 15. Dimensiones de la junta frágil.....	79
Figura 16. Comprobación de vuelco para depósitos autoanclados.	81
Figura 17. Geometría cilíndrica del tanque de agua.	98
Figura 18. Enmallado para la simulación.	99
Figura 19. Condición de carga para el diseño.....	100
Figura 20. Presión hidrostática para el diseño.	101
Figura 21. Deformación del tanque de agua.	102
Figura 22. Análisis de estrés de tanque de agua.	102
Figura 23. Factor de seguridad para el tanque de agua.....	103

Figura 24. Geometría de la columna central del tanque de agua.....	103
Figura 25. Enmallado para simulación de la columna central del tanque de agua.	104
Figura 26. Condiciones de carga de la columna central del tanque de agua.	105
Figura 27. Análisis de deformación de la columna central del tanque de agua.....	106
Figura 28. Análisis de estrés de la columna central del tanque de agua.	107
Figura 29. Factor de seguridad de la columna central del tanque de agua.	108

RESUMEN

La tesis aborda el problema del déficit de capacidad de almacenamiento de agua en el sistema contra incendios de la Refinería Iquitos. La justificación del proyecto surge de la necesidad urgente de mitigar los riesgos asociados a la antigüedad y deterioro de los tanques existentes, los cuales comprometen la seguridad operativa y el cumplimiento de normativas.

El objetivo general de la investigación es diseñar un tanque de agua para aumentar la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la refinería. Para lograrlo, la metodología del proyecto se basó en un enfoque sistemático de diseño de ingeniería como el VDI 2221, adhiriéndose a normativas clave como NFPA 22 (protección contra incendios) y API 650 (diseño de tanques de acero).

El diseño propuesto tiene una capacidad neta de 6 111,00 m³ y se valida a través de la simulación por elementos finitos (FEA) mediante Ansys. Esta prueba virtual demuestra la viabilidad técnica del diseño al confirmar su integridad estructural y su capacidad para soportar las cargas operativas.

La tesis demuestra que el diseño propuesto es una solución viable y segura para resolver el problema del déficit de agua. El proyecto no solo aumenta la capacidad de almacenamiento, sino que también garantiza la seguridad, la continuidad operativa y el cumplimiento de las regulaciones nacionales e internacionales.

Palabras clave: Diseño, Tanque de agua, Incendio.

ABSTRACT

The thesis addresses the problem of the deficit in water storage capacity in the firefighting system of the Iquitos Refinery. The justification for the project arises from the urgent need to mitigate the risks associated with the age and deterioration of the existing tanks, which compromise operational safety and compliance with regulations.

The general objective of the research is to design a water tank to increase the storage capacity of the firefighting system in the refinery. To achieve this, the project methodology was based on a systematic engineering design approach such as VDI 2221, adhering to key regulations such as NFPA 22 (fire protection) and API 650 (steel tank design).

The proposed design has a net capacity of 6,111.00 m³ and is validated through finite element simulation (FEA) using Ansys. This virtual testing demonstrates the technical feasibility of the design by confirming its structural integrity and ability to withstand operational loads.

The thesis demonstrates that the proposed design is a viable and safe solution to solve the problem of water deficit. The project not only increases storage capacity, but also ensures security, operational continuity and compliance with national and international regulations.

Keywords: Design, Water tank, Fire.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis, titulada "Diseño de un tanque de agua para aumentar la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos", aborda una problemática crucial: el déficit de capacidad de almacenamiento de agua en el sistema contra incendios de la Refinería Iquitos. Este problema se justifica por la antigüedad y el avanzado estado de deterioro de los tanques existentes, lo que representa un riesgo significativo para la seguridad operacional de la planta, su personal y el entorno. La urgencia de esta situación se ve acentuada por el crecimiento proyectado de la industria de hidrocarburos en Perú, lo que hace que la infraestructura actual de la refinería resulte insuficiente para garantizar una protección adecuada. Un análisis de criticidad y riesgo ha diagnosticado un déficit crítico, implicando una alta probabilidad de falla en una emergencia con consecuencias catastróficas.

Ante esta situación, el objetivo general del estudio es diseñar un tanque de agua para aumentar la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos. Para lograrlo, la investigación se apoya en una metodología de diseño sistemático de ingeniería, como la VDI 2221, y se rige por normativas internacionales clave como la NFPA 22 (para la protección contra incendios) y la API 650 (para el diseño y construcción de tanques de acero), garantizando que el diseño cumpla con los más altos estándares de seguridad industrial.

El diseño propuesto tiene una capacidad neta de 6 111,00 m³ y su viabilidad técnica se valida a través de la simulación por elementos finitos (FEA) mediante Ansys, una prueba virtual que confirma su integridad estructural y su capacidad para soportar las cargas operativas.

La estructura del documento está organizada para guiar al lector a través de las diferentes fases de la investigación, se desarrolla en los siguientes capítulos:

Capítulo I. Planteamiento del problema: Aquí se presentan los antecedentes, la descripción, formulación del problema, los objetivos de la investigación, su justificación e importancia, las limitaciones, la viabilidad del estudio, la formulación de hipótesis y la operacionalización de variables.

Capítulo II. Marco teórico: Este capítulo profundiza en los antecedentes del trabajo de investigación, las bases teóricas que sustentan el diseño, incluyendo la metodología VDI 2221, las normas NFPA 22 y API 650, el análisis de criticidad y riesgo, la hidrostática y presión de diseño, los principios de resistencia de materiales, el análisis estructural (Teoría de elementos finitos), y la ingeniería de materiales y corrosión, así como las definiciones conceptuales clave.

Capítulo III. Marco metodológico: Describe el nivel y diseño de la investigación, el planteamiento metodológico que incluye el diagnóstico del problema, la recopilación de exigencias, la generación y selección de soluciones, el diseño de detalle y la validación del diseño. También se detallan la población y muestra, los equipos y materiales utilizados, y las técnicas de recolección y procesamiento de datos.

Capítulo IV. Resultados: Presenta la descripción de las pruebas experimentales, la elaboración del proyecto (incluyendo criterios de diseño, cálculos geométricos y cálculos de elementos mecánicos), y la contratación de hipótesis.

Capítulo V. Discusión: Se detallan las pruebas de validación, la aplicación de la tecnología encontrada y el contraste con trabajos de investigación similares.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes del problema a investigar.

Esta investigación se enmarca en la necesidad urgente de modernizar y expandir la capacidad de almacenamiento de agua para el sistema de protección contra incendios de la Refinería Iquitos. Este proyecto se justifica por múltiples factores que convergen en un riesgo significativo para la seguridad y la continuidad operativa.

El contexto macro del problema reside en el crecimiento proyectado de la industria de hidrocarburos en Perú. Con las proyecciones de Petroperú de aumentar su producción para el año 2026, la infraestructura actual de la refinería resulta insuficiente para garantizar una protección adecuada. La tesis identifica este desajuste entre la capacidad de almacenamiento existente y los nuevos requerimientos de seguridad. La alta densidad de riesgo asociada a una refinería, que maneja materiales inflamables, exige un sistema contra incendios robusto y fiable, el cual debe estar respaldado por una fuente de agua segura y con la capacidad suficiente.

El problema específico se concentra en la obsolescencia y el deterioro de los tanques de agua actuales. Un análisis de riesgos, amparado en normativas nacionales como el Decreto Supremo 043-2007 y el Decreto Supremo N°036-2020-EM, ha diagnosticado un déficit crítico en la capacidad de almacenamiento de la refinería. La antigüedad de los tanques representa una alta probabilidad de falla en el momento de una emergencia, lo que podría tener consecuencias catastróficas, incluyendo pérdidas económicas, daños a la infraestructura y, lo más importante, un riesgo para la vida del personal y el medio ambiente.

Ante este escenario, la tesis propone el diseño de un nuevo tanque de agua como la solución. Esta tesis no es una simple mejora, sino una medida crucial para mitigar el riesgo inminente y asegurar que la refinería cumpla con las normativas internacionales de seguridad industrial. El diseño se guía por estándares como la NFPA 22 para la protección contra incendios y la API 650 para la construcción de tanques de acero, garantizando una solución que sea técnicamente viable y que resuelva el problema de fondo del déficit de capacidad, fortaleciendo así la seguridad y la fiabilidad de las operaciones.

1.2. Descripción del problema.

El problema central que aborda este proyecto es el déficit de capacidad de almacenamiento de agua en el sistema contra incendios de la Refinería Iquitos, lo cual genera un riesgo significativo para la seguridad operacional y el cumplimiento normativo.

La refinería cuenta con tanques de almacenamiento de agua que son antiguos y se encuentran en un estado de deterioro avanzado. Esta situación compromete directamente la fiabilidad del sistema de protección contra incendios, ya que no se garantiza la disponibilidad del volumen de agua necesario para hacer frente a un posible siniestro. Un análisis de criticidad y riesgo ha identificado que el fallo de este sistema no solo tendría consecuencias operacionales graves (interrupción de la producción), sino que también pondría en peligro la vida del personal, la infraestructura de la refinería y el medio ambiente.

El problema es de naturaleza cuantitativa y cualitativa. Desde un punto de vista cuantitativo, el volumen de agua disponible es insuficiente para cumplir con los estándares de seguridad requeridos por la industria (NFPA 22 y API 650) para una instalación de alto riesgo como una refinería de hidrocarburos. Cualitativamente, el deterioro de los tanques existentes representa una amenaza constante, lo que exige una solución de ingeniería que no solo incremente la capacidad, sino que también garantice la integridad estructural y la seguridad a largo plazo.

Por lo que la descripción del problema se centra en la urgente necesidad de un diseño de ingeniería que proponga una solución viable para un nuevo tanque de agua, capaz de resolver el déficit de capacidad mitigando el riesgo de incendio y garantizando así la seguridad, el cumplimiento normativo y la continuidad operativa de la Refinería Iquitos. Esta situación responderá a la siguiente interrogante ¿Cómo el diseño de un tanque de agua aumentará la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos?

1.3. Formulación del problema.

1.3.1. Problema general.

¿Cómo el diseño de un tanque de agua aumentará la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos?

1.3.2. Problemas específicos.

¿Cuál es el estado del tanque de almacenamiento de agua contra incendios en la Refinería Iquitos?

¿Cuáles son las dimensiones de los elementos mecánicos para el diseño de un tanque de agua en la Refinería Iquitos?

¿Cómo la validación por simulación del diseño de un tanque de agua aumentará la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos?

1.4. Objetivos de la investigación.

1.4.1. Objetivo general.

Diseñar un tanque de agua para aumentar la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos

1.4.2. Objetivos específicos.

- Diagnosticar el estado del tanque de almacenamiento de agua contra incendios en la Refinería Iquitos.
- Dimensionar los elementos mecánicos para el diseño de un tanque de agua en la Refinería Iquitos.
- Validar por simulación el diseño de un tanque de agua para aumentar la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos.

1.5. Justificación e importancia de la investigación.

La justificación del presente proyecto radica en la necesidad urgente de mejorar la capacidad de almacenamiento de agua contra incendios en la Refinería Iquitos. Actualmente, la refinería enfrenta un déficit significativo en su sistema de protección contra incendios debido a la antigüedad y deterioro de sus tanques de agua, lo que representa un riesgo considerable para la seguridad operativa y el entorno en caso de emergencia. Dado el incremento proyectado en la producción de hidrocarburos y el consiguiente aumento en la capacidad de almacenamiento de productos inflamables, resulta crucial contar con un sistema eficiente y confiable de extinción de incendios.

Este proyecto se justifica al proponer el diseño de un nuevo tanque de almacenamiento de agua, que cumpla con las normativas internacionales, como la NFPA 22 y la API 650, y que garantice una capacidad de respuesta adecuada ante situaciones de emergencia. El diseño optimizado del tanque no solo mejorará la seguridad operativa de la refinería, sino que también contribuirá a la continuidad de las operaciones y a la protección del personal e instalaciones.

Además, la implementación de esta solución permitirá cumplir con las regulaciones nacionales e internacionales, incrementando la eficiencia y la sostenibilidad del sistema de almacenamiento de la refinería a largo plazo.

1.6. Limitaciones.

1.6.1. Limitaciones temporales.

Plazo del proyecto: El diseño y la construcción del tanque están sujetos a un cronograma. Las demoras en la obtención de permisos, la llegada de materiales o las condiciones climáticas podrían afectar el plazo de finalización.

Vida útil del proyecto: Se debe considerar que la solución de diseño (en este caso, un tanque de acero) tiene una vida útil limitada que requiere un plan de mantenimiento a largo plazo para evitar el deterioro.

1.6.2. Limitaciones espaciales.

Espacio físico: El diseño del tanque está limitado por el espacio disponible en la refinería. Las dimensiones de diámetro y altura deben ajustarse al área designada para la instalación, y se debe considerar el espacio de trabajo para la construcción y el mantenimiento.

Condiciones geográficas: La ubicación de la refinería en Iquitos impone limitaciones. El terreno y el clima (humedad, precipitaciones, sismicidad) son factores espaciales que afectan el diseño y la logística de la construcción.

1.6.3. Limitaciones económicas.

Presupuesto: La ejecución del proyecto está limitada por un presupuesto asignado. Cualquier aumento en el costo de los materiales (como el acero) o la mano de obra podría poner en riesgo la viabilidad del proyecto.

Costo de mantenimiento: Aunque no es parte del costo inicial, los gastos de mantenimiento y operación a largo plazo (pintura, inspección, y otros) son una limitación económica que debe ser considerada en la evaluación de la solución.

1.7. Viabilidad del estudio.

La viabilidad de la tesis en el diseño de un tanque de agua para aumentar la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos es altamente favorable y se sustenta en tres pilares interrelacionados: la viabilidad técnica, la económica y la operativa.

Desde el punto de vista técnico, el proyecto es totalmente viable porque se basa en una sólida fundamentación teórica. El diseño aplica principios de ingeniería probados como la hidrostática, la resistencia de materiales y se adhiere rigurosamente a normativas reconocidas globalmente como la NFPA 22 y la API 650. Además, la propuesta se valida de manera robusta mediante la simulación por elementos finitos (FEA), garantizando la seguridad y fiabilidad del diseño antes de su construcción.

En el aspecto económico, la viabilidad se justifica por el alto retorno de la inversión. El análisis de riesgo demuestra que el costo de la inacción es superior al del proyecto, ya que un posible incendio podría causar pérdidas catastróficas. El nuevo tanque no es un gasto, sino una inversión en seguridad, continuidad operativa y cumplimiento normativo.

1.8. Formulación de hipótesis.

El diseño de un tanque de agua para aumentar la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos.

1.9. Variables.

1.9.1. Variable independiente.

Diseño de un tanque de agua: Se refiere a la planificación y estructuración de un contenedor destinado a almacenar agua, específicamente diseñado para satisfacer necesidades de almacenamiento y seguridad en aplicaciones industriales, como el sistema contra incendios en una refinería. Esta definición abarca aspectos como el material de construcción, la capacidad de almacenamiento, la forma y estructura del tanque, la

resistencia a cargas externas y el cumplimiento de normativas de seguridad y estándares de ingeniería.

Se operacionaliza a través de la especificación de diversas características técnicas y funcionales que se pueden medir de manera cuantitativa y cualitativa. Se mide mediante indicadores del diseño estructural, especificaciones técnicas y métodos de construcción, evaluando la conformidad con normativas de seguridad industrial y ambiental.

1.9.2. Variable dependiente.

La capacidad de almacenamiento: Hace referencia al incremento en la cantidad de agua que puede ser almacenada en el sistema de almacenamiento contra incendios de una refinería. Este aumento es fundamental para asegurar un suministro adecuado de agua para la supresión de incendios durante situaciones de emergencia, mejorando así la seguridad operativa y protegiendo al personal e instalaciones.

La capacidad de almacenamiento se evalúa a través de indicadores específicos que miden tanto el incremento en el volumen de almacenamiento como la eficiencia y efectividad del sistema contra incendios. Este incremento se cuantifica en metros cúbicos, considerando la altura y el diámetro del tanque mediante un proceso de cubicación. La medición se realiza con precisión utilizando una estación total, lo que permite evaluar la capacidad de respuesta y los tiempos de reacción para cumplir con las normativas del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos.

1.10. Operacionalización de variables.

Tabla 1

Operacionalización de variables independiente y dependiente.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
V. Independiente: Diseño de un tanque de agua	Se mide mediante indicadores que evalúan el diseño estructural, especificaciones técnicas y métodos de construcción, asegurando la conformidad con las normativas de seguridad industrial y ambiental.	Se mide mediante indicadores del diseño estructural, especificaciones técnicas y métodos de construcción, evaluando la conformidad con normativas de seguridad industrial y ambiental.	Diseño VDI 2222 Cálculos Mecánico	- Normativo - Factor de diseño - Dimensionamiento de estructuras - Dimensionamiento de espesores de láminas, placas y techo. - Factor de seguridad
V. Dependiente: Capacidad de almacenamiento	Se mide mediante indicadores que evalúan el diseño estructural, especificaciones técnicas y métodos de construcción, asegurando el cumplimiento de las normativas de seguridad industrial y ambiental.	Se cuantifica en metros cúbicos considerando la altura, diámetro del tanque mediante un proceso de cubicación. Esta medición precisa, realizada con una estación total, incluye elementos internos del tanque y asegura el cumplimiento de normas de seguridad para garantizar una capacidad adecuada para el sistema contra incendios en la Refinería Iquitos.	Cubicación	- Volumen (m3)

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del trabajo de investigación.

2.1.1. Antecedentes internacionales.

Según la descripción de Ramos-López & Quijije-Cevallos, (2023) en su trabajo investigativo “Diseño de un tanque de almacenamiento de agua potable para el abastecimiento de la demanda futura proyectada en la comunidad de Manglaralto”. El presente estudio busca diseñar un tanque de almacenamiento de agua que permita abastecer a las demandas actuales y futuras de la población de Manglaralto, calculando el volumen de abastecimiento para los habitantes locales y flotantes. Se logró diseñar dos tanques de almacenamiento de agua, cuya configuración prevé la sostenibilidad en el abastecimiento de agua para hacer frente a la actual y futura demanda de la población local y flotante de Manglaralto. Concluyéndose que este diseño asegura una distribución efectiva y continua del agua potable, lo que respalda el propósito central del proyecto.

Según la descripción de Valarezo-Riofrío, (2022) en su estudio denominado "Evaluación y diseño de los tanques de almacenamiento de agua potable de baja capacidad (100 m³, 250 m³, 500 m³) del DMQ. ". El objetivo es analizar y desarrollar los tanques de almacenamiento de agua potable de menor capacidad (100 m³, 250 m³ y 500 m³) disponibles en el distrito metropolitano de Quito. Como resultado, se logró el diseño de tanques de almacenamiento de agua potable de 100 m³, 250 m³ y 500 m³. Se concluyó que la correcta aplicación de las normativas vigentes para su diseño estructural asegura dimensiones adecuadas para las condiciones ambientales locales del distrito metropolitano de Quito.

2.1.2. Antecedentes nacionales.

Según la descripción de Saldaña-Delgado, (2020) en su estudio denominado "Diseño de tanques de agua con capacidad hasta 1200 m³ con techo cónico bajo norma API 650 con Excel y SolidWorks". Se tuvo como objetivo desarrollar tanques verticales para almacenar agua con capacidades que van desde 12 m³ hasta 1200 m³, con un techo cónico fijo según la norma API 650. Se utilizó una metodología de tipo aplicada

preexperimental. Tuvo como resultados el desarrollar un programa en Excel para diseñar tanques verticales de almacenamiento de agua con capacidad entre 12 m³ y 1200 m³ con techo cónico fijo bajo norma API 650 además de comandar las operaciones de dibujo de SolidWorks. Se concluye que, la investigación y la identificación de las características clave de diversos depósitos industriales de almacenamiento, desarrolló un software especializado para diseñar tanques de almacenamiento que cumplen con las especificaciones necesarias según las normas API.

Según la descripción de Pinco-Robles, (2020) en su investigación “Diseño y construcción de 7 tanques de 585 m³ para almacenamiento de productos derivados de hidrocarburos en la empresa Peruquimicos S.A.C.”, el cual tuvo como objetivo el diseñar y construir 07 tanques para almacenar productos derivados de hidrocarburos (OPDH) y así aumentar la capacidad de almacenamiento en las instalaciones de la empresa PERUQUIMICOS S.A.C. Se empleó una metodología de tipo experimental aplicada, teniendo como resultado el diseño y la construcción de un total 07 tanques de 585 m³ utilizando la Normativa API 620. Se concluye que, utilizando la normativa API 620 no se presentaron dificultades ni fallas en los tanques atribuibles al diseño logrando el aumento de la capacidad de almacenamiento de la empresa PERUQUIMICOS S.A.C. en 4 095 m³.

2.2. Bases teóricas.

2.2.1. Metodología VDI 2221.

La VDI 2221 (Desarrollo sistemático de productos y la construcción de sistemas técnicos), es una directriz de la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI) que establece un marco metodológico para guiar el proceso de diseño y desarrollo de productos. A diferencia de un enfoque intuitivo o ad hoc, esta metodología propone un camino estructurado para la resolución de problemas técnicos complejos, asegurando que se consideren todas las fases cruciales del proyecto (Barriga-Gamarra, 2016; Kang et al., 2026; Song et al., 2026).

Fases clave de la VDI 2221.

Aclaración y especificación de la tarea.

Esta fase inicial es fundamental. Aquí se define el problema de manera precisa y se traducen las necesidades del cliente (en este caso, la Refinería Iquitos) en una lista de exigencias (Chen et al., 2026; Kang et al., 2026). Esto incluye deseos (como la capacidad

de almacenamiento deseada) y exigencias formales (como el cumplimiento de normativas). El objetivo es crear una lista clara que servirá como guía para todo el proceso (Nasraoui et al., 2026; Pingfan et al., 2026).

Concepción del producto.

Una vez que se ha definido la tarea, se pasa a la generación de ideas. Se busca una solución principal a través de la "caja negra", que representa el sistema como un todo, con sus entradas y salidas. Luego, se descompone la función principal en subfunciones (estructura de funciones) para entender los elementos del sistema (Song et al., 2026). La matriz morfológica es una herramienta clave de esta fase, ya que permite combinar de manera sistemática diferentes principios de solución para cada subfunción, generando una amplia gama de alternativas de diseño (Barriga-Gamarra, 2016; Pingfan et al., 2026).

Selección y diseño de los detalles.

En esta etapa, las soluciones generadas en la fase de concepción se evalúan rigurosamente. Se analizan los aspectos técnicos, económicos y funcionales para seleccionar la opción más viable (Barriga-Gamarra, 2016; Song et al., 2026). Se procede al diseño detallado del prototipo, que incluye la selección de materiales, el dimensionamiento de componentes (como el espesor de las planchas del tanque), y la creación de planos de fabricación (Barriga-Gamarra, 2016; Wang et al., 2026).

2.2.2. Normas para la protección contra incendios (NFPA 22).

La NFPA 22, publicada por la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (National Fire Protection Association), es un estándar crítico que rige el diseño, la construcción, la instalación y el mantenimiento de tanques de agua destinados exclusivamente a sistemas de protección contra incendios privados (Yifan et al., 2026). Esta normativa es de vital importancia para el proyecto de la refinería de Iquitos, ya que asegura que el tanque no solo sea una estructura de almacenamiento, sino un componente fiable y seguro dentro de un sistema de emergencia (Vista & Area, 2024).

Principios fundamentales y requisitos de la NFPA 22.

La norma establece varios requisitos clave que el diseño del tanque debe cumplir:

Capacidad de almacenamiento.

La NFPA 22 define los criterios para determinar el volumen de agua necesario, basándose en el tipo de riesgo que se protege. Para una refinería, que representa un alto riesgo de incendio, la capacidad debe ser suficiente para alimentar el sistema de rociadores, monitores y mangueras por un tiempo determinado, incluso si la fuente de agua principal se interrumpe (Cusi-Yucra, 2023). El diseño del tanque, con una capacidad neta de 6 111,00 m³, se alinea con este requisito para asegurar un suministro adecuado en caso de una emergencia (Das & Konar, 2023; Ramos-López & Quijije-Cevallos, 2023).

Ubicación y soportes.

La norma especifica que el tanque debe estar ubicado en un lugar que minimice el riesgo de daños por incendio, sismo u otros peligros. También establece los requisitos para los soportes y cimentaciones del tanque, garantizando que la estructura sea estable y capaz de soportar su peso total cuando está lleno de agua (Valarezo, 2022).

Accesorios y componentes.

- La NFPA 22 exige que el tanque esté equipado con una serie de accesorios esenciales para su funcionamiento y mantenimiento, tales como:
- Indicadores de nivel: Para monitorear el volumen de agua en todo momento (Valarezo-Riofrío, 2022).
- Conexiones para llenado y drenaje: Para facilitar el mantenimiento y las pruebas (Alburquerque-García, 2021).
- Válvulas de control: Para gestionar el flujo de agua hacia el sistema contra incendios.
- Ventilación: Para evitar que la presión negativa o positiva afecte la estructura durante el llenado o vaciado.

Materiales y construcción.

La norma permite el uso de diversos materiales, como acero, hormigón y madera, y hace referencia a otros códigos y estándares, como la API 650 para tanques de acero, asegurando que la construcción cumpla con los más altos estándares de calidad (Pinco-Robles, 2020).

2.2.3. Normas de construcción de tanques de acero (API 650).

La API 650, publicada por el American Petroleum Institute, es el estándar principal a nivel mundial para el diseño, fabricación, montaje y prueba de tanques cilíndricos, verticales y soldados, con techo y fondo planos, para el almacenamiento de líquidos (Pinco-Robles, 2020; Yafac-Torres, 2020). Aunque fue desarrollada originalmente para la industria petrolera, sus rigurosos requisitos y principios de ingeniería la convierten en una norma de referencia para el diseño de tanques de agua a gran escala, como el de la refinería de Iquitos (Sistemas & Incendio, 2020).

Principios fundamentales y requisitos de la API 650

La aplicación de la API 650 en el proyecto asegura que el diseño del tanque sea técnicamente sólido, fiable y seguro. Los aspectos más importantes que rige esta norma incluyen:

Diseño de los componentes.

La norma especifica fórmulas detalladas para el cálculo del espesor de las paredes, el fondo y el techo del tanque. Por ejemplo, la fórmula para el espesor del casco ($t_d = 4,9D(H - 0,3)G / (S_d + CA)$) que se mencionó en la tesis, se deriva directamente de los principios establecidos en esta normativa. La API 650 también proporciona directrices para el diseño de elementos como refuerzos, boquillas y escaleras (API, 2021; Sánchez, 2019).

Materiales de construcción.

La norma exige el uso de materiales específicos que cumplen con las propiedades mecánicas y químicas requeridas. Para los tanques de agua, el acero al carbono ASTM A36 es un material comúnmente especificado bajo esta norma debido a su soldabilidad, resistencia y costo-efectividad (API, 2021; Gonzáles & Perrera, 2018).

Fabricación y soldadura.

Se establecen procedimientos estrictos para la fabricación en taller y el montaje en campo (API, 2021; Pejerrey-Zegarra, 2017). Esto incluye las cualificaciones de los soldadores, los métodos de soldadura y los controles de calidad, como las pruebas radiográficas para asegurar la integridad de las uniones soldadas (API, 2021; Pozo-Prado, 2016).

Inspección y pruebas.

La API 650 exige que, una vez que el tanque ha sido construido, se someta a rigurosas pruebas de inspección. La más importante es la prueba hidrostática, donde el tanque se llena completamente con agua para verificar la ausencia de fugas y la estabilidad estructural (API, 2021; Arias, 2012). Esto asegura que el tanque pueda soportar la presión del líquido almacenado antes de ser puesto en servicio (API, 2021; Arias, 2012; Association, 1985).

2.2.4. Análisis de criticidad y riesgo.

El análisis de criticidad y riesgo es una metodología fundamental en el ámbito de la ingeniería y la gestión de activos, cuyo propósito es evaluar y jerarquizar la importancia de los equipos, sistemas o activos dentro de un proceso (Yifan et al., 2026). En el contexto del diseño del tanque de agua para la refinería, este análisis proporciona la justificación sólida para la inversión, al demostrar que el proyecto no es simplemente una mejora, sino una necesidad crítica para mitigar un riesgo inminente (Nasraoui et al., 2026).

Principios fundamentales del análisis de criticidad

El análisis de criticidad evalúa dos factores principales:

Frecuencia de falla (FF).

Se refiere a la probabilidad o la tasa con la que un equipo o sistema falla. En el caso del sistema contra incendios de la refinería, la FF está directamente relacionada con el estado obsoleto y deteriorado de los tanques existentes. Un tanque en malas condiciones tiene una alta probabilidad de fallar en el momento crítico de un incendio, lo que representa una FF elevada (Association, 1985).

Consecuencia de la falla (C).

Se evalúa el impacto que tendría la falla de un equipo. Para el tanque de agua, la consecuencia no es solo un costo de reparación, sino un impacto mucho más grave que se puede desglosar en:

- Impacto operacional (IO): Una falla en el sistema contra incendios podría detener las operaciones de la refinería, generando grandes pérdidas económicas (Song et al., 2026).

- Impacto a la seguridad, ambiente e higiene (ISAH): El riesgo de que un incendio se propague incontrolablemente representa un peligro para la vida del personal, el entorno y la infraestructura de la refinería (Das & Konar, 2023).

Costo de mantenimiento (CM).

Los costos de reparación y el mantenimiento constante de un tanque en mal estado pueden ser altos a largo plazo.

2.2.5. Hidrostática y presión de diseño.

La hidrostática es la rama de la mecánica de fluidos que se encarga del estudio de los fluidos en estado de reposo. En el contexto del diseño de un tanque de agua, este principio es fundamental para determinar las fuerzas y presiones que el líquido ejerce sobre la estructura del tanque (Yafac-Torres, 2020). La capacidad del tanque para resistir estas fuerzas es crítica para evitar fallas catastróficas.

Principios clave de la hidrostática aplicados al diseño de tanques.

Presión hidrostática.

La presión ejercida por un líquido en reposo depende únicamente de su densidad, la gravedad y la profundidad del punto de medición (Saldaña-Delgado, 2020). Se calcula con la fórmula: $P = \rho * g * h$, donde P es la presión, ρ (rho) es la densidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad y h es la altura de la columna de líquido (Saldaña-Delgado, 2020). Para el tanque, esto significa que la presión es cero en la parte superior y máxima en el fondo, aumentando linealmente con la profundidad (Pozo-Prado, 2016).

Fuerzas sobre la pared del tanque.

La presión hidrostática actúa de manera perpendicular a las paredes del tanque. La fuerza total sobre una sección de la pared se calcula integrando la presión a lo largo del área. Esta fuerza es lo que genera el esfuerzo de tracción o “esfuerzo de aro” en la pared del tanque (Ramos-López & Quijije-Cevallos, 2023).

Esfuerzo de aro y diseño del espesor.

Para un tanque cilíndrico, la presión hidrostática genera un esfuerzo de tracción circunferencial (esfuerzo de aro) en la pared. Este esfuerzo debe ser contrarrestado por la resistencia del material para evitar que la pared se rompa. La fórmula del esfuerzo de

aro es $\sigma = P * D / (2 * t)$, donde σ (sigma) es el esfuerzo de tracción, P es la presión hidrostática, D es el diámetro del tanque y t es el espesor de la pared (Alburque-Garcia, 2021).

Cálculo del espesor de diseño (t_d).

A partir del esfuerzo de aro, se deriva la fórmula para el espesor de diseño (t_d), que asegura que la pared del tanque tenga la resistencia suficiente para soportar la presión máxima en cada altura. La fórmula mencionada en la tesis ($t_d = 4,9D(H - 0,3)G / (S_d + CA)$) es una adaptación específica de esta teoría para tanques industriales, que incorpora factores de seguridad, el peso específico del líquido (G), y el diámetro (D) (González & Perrera, 2018).

2.2.6. Principios de resistencia de materiales.

La resistencia de materiales, también conocida como mecánica de materiales, es una rama de la mecánica aplicada que se ocupa del comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a diversas cargas. Es un pilar fundamental en el diseño de cualquier estructura, incluido el tanque de agua, ya que permite asegurar que la estructura no fallará, deformará o se romperá bajo las condiciones de servicio previstas (Pinco-Robles, 2020).

Conceptos clave aplicados al diseño del tanque.

Esfuerzo (σ).

Es la medida de la fuerza interna que las partículas de un material ejercen unas sobre otras. En el tanque, la presión hidrostática del agua genera un esfuerzo de tracción (o "esfuerzo de aro") en la pared cilíndrica. El cálculo del espesor de la pared se basa en la necesidad de que el material pueda soportar este esfuerzo sin fallar (Becerra-Hernández, 2019).

Deformación (ϵ).

Es la medida del cambio en la forma o el tamaño de un cuerpo debido a la aplicación de una carga. Es importante que las deformaciones en el tanque se mantengan dentro de límites aceptables para evitar fugas o daños a los componentes (Cusi-Yucra, 2023).

Límite de fluencia (σ_y).

Es el punto en el que el material comienza a deformarse plásticamente (permanentemente). El diseño del tanque debe garantizar que los esfuerzos de trabajo nunca superen este límite, para que el material siempre se comporte de manera elástica, es decir, que recupere su forma original al retirar la carga (Sistemas & Incendio, 2020).

Resistencia a la tracción (σ_u).

Es el esfuerzo máximo que un material puede soportar antes de romperse. Este valor es fundamental para determinar el factor de seguridad del diseño (Arias, 2012).

Factor de seguridad (FS).

Es la relación entre la resistencia a la tracción del material y el esfuerzo máximo de trabajo. Por ejemplo, un factor de seguridad de 2 significa que el material puede soportar el doble de la carga máxima esperada. El uso de un FS en el diseño del tanque es crucial para compensar posibles imperfecciones en el material, errores de cálculo y variaciones en las cargas (Sánchez, 2019).

Aplicación al proyecto.

El diseño del tanque de la refinería, al utilizar aceros como el ASTM A36, se fundamenta en la resistencia de materiales para:

- Determinar el espesor adecuado de cada anillo del tanque para resistir el esfuerzo de aro.
- Seleccionar materiales con las propiedades mecánicas adecuadas para el servicio.
- Calcular el peso total de la estructura y asegurar que los anclajes y la cimentación puedan soportar la carga (Chen et al., 2026).

2.2.7. Análisis estructural (Teoría de elementos finitos).

El análisis estructural es el proceso de determinar el efecto de las cargas sobre una estructura física y sus componentes. La Teoría de Elementos Finitos (FEA) es una herramienta computacional poderosa que ha revolucionado este campo, permitiendo a los ingenieros modelar estructuras complejas y analizar su comportamiento bajo diversas condiciones de carga con gran precisión. Para el diseño del tanque de agua, la FEA es

fundamental para validar los cálculos manuales y asegurar la integridad estructural (Vista & Area, 2024).

Principios fundamentales de la teoría de elementos finitos.

Discretización de la estructura: La FEA divide la estructura completa del tanque (un cuerpo continuo) en una red de elementos más pequeños e interconectados, llamados elementos finitos. Estos elementos son formas geométricas simples (como triángulos, cuadriláteros o hexágonos) para los cuales las ecuaciones matemáticas son más fáciles de resolver (Pingfan et al., 2026). Los puntos de conexión de estos elementos se llaman nodos.

Modelado de cargas y condiciones de contorno: En el modelo FEA, se aplican las cargas que actúan sobre el tanque. Esto incluye la presión hidrostática del agua, las cargas de viento, las fuerzas sísmicas y el peso de la propia estructura. También se definen las condiciones de contorno, que son las restricciones del modelo, como el anclaje del tanque a la cimentación (Wang et al., 2026).

Resolución de ecuaciones de equilibrio: El software de FEA resuelve un sistema de ecuaciones para cada elemento. Estas ecuaciones describen cómo los esfuerzos y deformaciones se distribuyen en respuesta a las cargas. El resultado es una representación detallada de los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en cada punto de la estructura (Kang et al., 2026).

Aplicación al diseño del tanque de agua.

La FEA se utiliza para:

- **Validación del diseño:** Se verifica si los espesores de las planchas calculados manualmente con fórmulas como la de la API 650 son adecuados. Esto es crucial, ya que la FEA puede identificar puntos de alta concentración de esfuerzos que los métodos manuales podrían pasar por alto (Sánchez, 2019).
- **Análisis de esfuerzos complejos:** Permite estudiar el comportamiento del tanque bajo cargas no uniformes o en puntos de discontinuidad, como las uniones entre la pared y el fondo, o alrededor de las boquillas y manholes (Alburqueque-Garcia, 2021).
- **Análisis de esfuerzos por sismo y viento:** Es la mejor herramienta para analizar las fuerzas dinámicas generadas por un sismo o un viento fuerte. La FEA puede predecir

la respuesta de la estructura y asegurar que no haya resonancias o fallas por fatiga (Becerra-Hernández, 2019).

- Optimización del diseño: Permite al ingeniero realizar iteraciones rápidas, modificando el diseño (por ejemplo, el espesor de las planchas o la geometría de los refuerzos) para encontrar una solución que sea segura, pero también eficiente en el uso de material (Association, 1985).

2.2.8. Ingeniería de materiales y corrosión.

La ingeniería de materiales es una disciplina que estudia las propiedades de los materiales y cómo estas propiedades pueden ser modificadas para crear productos con un rendimiento óptimo. En el diseño de un tanque de almacenamiento, la selección del material es tan crítica como el cálculo de sus dimensiones. La corrosión, por su parte, es el proceso de deterioro de un material a causa de una reacción química o electroquímica con su entorno. Combatir la corrosión es vital para asegurar la vida útil y la seguridad de la estructura (Arias, 2012).

Aspectos clave en el diseño del tanque.

Selección del material.

El acero al carbono, como el ASTM A36, es el material preferido para este tipo de tanques. La elección se basa en un equilibrio entre sus propiedades mecánicas (resistencia y ductilidad), su facilidad de soldadura y su costo-efectividad. Es un material que puede soportar las tensiones generadas por la presión del agua, pero su principal debilidad es su susceptibilidad a la corrosión (Vista & Area, 2024).

Mecanismos de corrosión.

- Corrosión uniforme: El acero reacciona con el oxígeno disuelto en el agua y el aire, causando una oxidación generalizada. Esto es particularmente relevante en la superficie interna del tanque.
- Corrosión galvánica: Si se utilizan metales diferentes en contacto directo (por ejemplo, una brida de acero inoxidable en una tubería de acero al carbono), se puede crear una celda electroquímica que acelera la corrosión del metal menos noble. El diseño debe considerar esto para evitar un deterioro acelerado (Valarezo, 2022).

- Corrosión por picadura (pitting): Es una forma de corrosión localizada que crea pequeños hoyos en la superficie del material. Puede ser extremadamente peligrosa porque un agujero muy pequeño puede penetrar la pared del tanque (Saldaña-Delgado, 2020).

Protección contra la corrosión.

La base teórica debe justificar la aplicación de recubrimientos protectores. Para la superficie interna, los recubrimientos epóxicos son la solución estándar, ya que crean una barrera impermeable que evita el contacto del agua con el acero. Para el exterior, se utiliza un sistema de pintura que protege contra la intemperie y la corrosión atmosférica (Nasraoui et al., 2026).

Además de los recubrimientos, se pueden considerar otras soluciones como el uso de ánodos de sacrificio para proteger las partes críticas (protección catódica), o la implementación de un sistema de desaireación para reducir el oxígeno disuelto en el agua (Kang et al., 2026).

2.3. Definiciones conceptuales.

- VDI 2221: Es una directriz alemana que establece un método sistemático para el desarrollo y diseño de productos técnicos, garantizando un proceso estructurado desde la concepción hasta la implementación.
- API 650: Norma del Instituto Americano del Petróleo que rige el diseño, fabricación y construcción de tanques de acero soldados para el almacenamiento de líquidos a granel.
- NFPA 22: Estándar de la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego que establece los requisitos para la instalación de tanques de agua para sistemas de protección contra incendios privados.
- Caja negra: Modelo conceptual que describe un sistema por sus entradas y salidas, sin revelar el funcionamiento interno.
- Hidrostática: Rama de la mecánica que estudia los fluidos en reposo y las fuerzas que ejercen sobre las superficies que los contienen, como la presión del agua en un tanque.

- Presión hidrostática: La presión ejercida por una columna de líquido, que depende de la densidad del fluido y de la altura de la columna. Es máxima en el fondo del tanque.
- Esfuerzo de aro: El esfuerzo de tracción que se genera en las paredes de un recipiente cilíndrico debido a la presión interna del fluido.
- Límite de fluencia (σ_y): El esfuerzo máximo que un material puede soportar antes de comenzar a deformarse plásticamente.
- Factor de seguridad (FS): Una relación entre la resistencia de un material y el esfuerzo de trabajo real, utilizada para garantizar que la estructura sea segura y confiable.
- Resistencia de materiales: Disciplina que estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a cargas para predecir si una estructura fallará o se deformará.
- Análisis por elementos finitos (FEA): Método computacional que divide una estructura en pequeños elementos interconectados para simular su comportamiento bajo cargas y validar su integridad estructural.
- Criticidad: Una medida de la importancia de un activo o equipo, calculada a partir de la probabilidad de falla y la consecuencia de esa falla.
- Planteamiento del problema: La etapa inicial de una investigación donde se define de manera clara y precisa el problema a resolver y los objetivos del proyecto.
- Variable independiente: La causa o el factor que se manipula o se cambia en una investigación para ver su efecto en otra variable.
- Variable dependiente: El efecto o el resultado que se mide y que es influenciado por la variable independiente.
- Matriz morfológica: Herramienta de diseño que permite generar soluciones creativas combinando diferentes principios de solución para cada función del producto.
- Corrosión: El deterioro de un material debido a una reacción química o electroquímica con su entorno, como el agua y el aire.
- Prueba hidrostática: Una prueba de campo esencial para los tanques de almacenamiento, en la que se llenan con agua para verificar que no haya fugas y que la estructura sea estable.

- **Análisis de riesgo:** Proceso de identificar, evaluar y mitigar los riesgos potenciales de un proyecto o sistema, considerando la probabilidad de ocurrencia y el impacto de los eventos.
- **ASTM A36:** Un estándar de material de la Sociedad Americana para pruebas y materiales que especifica un tipo de acero al carbono estructural comúnmente utilizado en la construcción de tanques y estructuras soldadas.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Planteamiento metodológico.

El planteamiento metodológico para el diseño de un tanque de agua, basado en la tesis y en la metodología VDI 2221, se puede estructurar en las siguientes etapas.

3.1.1. Diagnóstico del problema.

Se inicia con un análisis detallado del estado actual del sistema contra incendios de la refinería de Iquitos. Esto implica evaluar las condiciones de los tanques existentes para identificar el déficit de capacidad y los riesgos asociados a su deterioro. El objetivo es obtener los datos y la información necesaria para formular el problema de manera precisa.

3.1.2. Recopilación de exigencias.

Utilizando la metodología VDI 2221, se crea una lista de exigencias que sirve como punto de partida para el diseño. Esta lista incluye los requerimientos del sistema contra incendios, las normativas aplicables (NFPA 22 y API 650) y los parámetros de diseño específicos, como la capacidad de almacenamiento y las dimensiones.

3.1.3. Generación de soluciones (Concepción).

Se utilizan herramientas como la "caja negra" y la matriz morfológica para generar diversas alternativas de solución para el diseño del tanque. Se exploran diferentes principios de solución para cada función (almacenar agua, resistir cargas, etc.), lo que permite considerar opciones como el tanque de acero, el de hormigón armado y el prefabricado.

3.1.4. Evaluación y selección de la solución.

Las soluciones generadas en la etapa anterior se evalúan de manera rigurosa. Se utilizan criterios técnicos y económicos para puntuar cada alternativa y determinar cuál es la más viable para el proyecto. Este proceso asegura que la decisión final sea objetiva y esté fundamentada en datos.

3.1.5. *Diseño de detalle.*

Una vez seleccionada la solución óptima (en este caso, el diseño del tanque de acero), se procede a la fase de diseño de detalle. Esto incluye:

- Cálculos de dimensionamiento: Determinación del espesor de las planchas y el peso de los componentes.
- Selección de materiales: Especificación de los tipos de acero.
- Modelado y simulación: Utilización de software de elementos finitos (FEA) para validar la integridad estructural del diseño.

3.1.6. *Validación del diseño.*

La fase final implica la validación del diseño propuesto. Esto se logra a través de la simulación, que verifica que el tanque cumpla con todas las exigencias técnicas y de seguridad antes de pasar a la fase de construcción.

3.2. Población y muestra.

3.2.1. *Población.*

La población del estudio está constituida por el conjunto de todos los sistemas de almacenamiento de agua contra incendios de la refinería de Iquitos. Esto incluye tanto los tanques existentes como los nuevos que pudieran ser instalados.

3.2.2. *Muestra.*

La muestra, por otro lado, es un subconjunto de la población. En este caso, la muestra es el único tanque de almacenamiento de agua que se está diseñando para reemplazar y ampliar la capacidad del sistema actual. El análisis y el diseño se centran específicamente en este activo individual.

3.3. Equipos y materiales.

En la siguiente tabla se denota la lista de equipos y materiales.

Tabla 2*Tabla de equipos y materiales.*

Componente	Unidad	Parámetros
Equipos:		
Máquina de soldar	Unidades	Monofásica, Trifásica
Alimentadores	Unidades	Soldadura tubular
Generador eléctrico	Unidades	Sin parámetros de potencia
Tablero eléctrico	Unidades	380/220V
Equipo oxiacetilénico	Unidad	Sin parámetros
Esmeril angular	Unidades	4.1/2" y 7"
Taladro	Unidades	Sin parámetros
Turbineta	Unidades	Sin parámetros
Andamios	M ²	Multidireccionales
Camión grúa	Unidad	Sin parámetros
Equipo de topografía	Unidad	Sin parámetros
Elementos de izaje (Eslingas, estrobos, grilletes, mordazas, sogas)	Conjunto	Para camión grúa
Equipos de izaje de tanque (Gata hidráulica, tubos, arriostres, canales, cartelas)	Conjunto	Para izaje de tanque
Materiales:		
Planchas	Unidades	ASTM A36 de 6mm, 8mm, 9.5mm, 12mm, 12.5mm
Tuberías	Metros	ASTM A53 Gr.B de 1.1/4", 2.1/2", 4", 6", 10", 12", 14", 16"
Ángulo	Metros	ASTM A36 de 12.5mm de espesor
Platina	Metros	ASTM A36 de 6mm de espesor
Bridas	Unidades	ASTM A105 de 4", 6", 10", 12", 16"
Codos	Unidades	ASTM A234 de 4", 6", 12", 16"
Perfil	Metros	W 10"x22 ASTM A36, L 4"x1/2" ASTM A36
Espárrago	Unidades	ASTM A193 Gr.B7 de 5/8", 3/4", 7/8", 1"
Perno estructural	Unidades	ASTM A325 de 3/4"
Tuerca	Unidades	ASTM A194 Gr.2H de 5/8", 3/4", 7/8", 1"
Soldadura	Kg	E7018, E71T1

Discos	Unidades	Corte, desbaste
Gases	Kg	Oxígeno, acetileno, gas CO2
Otros	Unidades	Antiespater, tintes penetrantes
Válvula compuerta	Unidades	UL/FM de 4", 6", 12", 16"

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Procedimiento de las pruebas experimentales.

Para este proyecto de diseño, no se realizan pruebas experimentales en el sentido tradicional de un experimento de laboratorio, ya que el objetivo es diseñar una estructura, no estudiar un fenómeno científico.

3.5. Técnicas de recolección de datos.

El procedimiento para la recolección de datos en este proyecto se basa en un enfoque no experimental, utilizando diversas técnicas que se nutren de fuentes primarias y secundarias. Las principales técnicas son:

3.5.1. *Revisión de documentación y normativas (Análisis documental).*

Se analizan documentos existentes de la refinería, como informes de inspección, planos y datos de mantenimiento de los tanques actuales. Esta técnica también incluye la recopilación de información de fuentes bibliográficas especializadas, como las normativas API 650 y NFPA 22, manuales de ingeniería, y estudios técnicos sobre hidrostática y resistencia de materiales. Los datos recolectados son las especificaciones de diseño, las propiedades de los materiales, los estándares de seguridad y las fórmulas de cálculo.

3.5.2. *Observación directa.*

Se realiza una inspección visual de las instalaciones de la refinería, específicamente del sistema de almacenamiento de agua. Esta técnica permite documentar el estado físico de los tanques, identificar los signos de deterioro y entender las limitaciones del sistema actual, lo que ayuda a validar la información obtenida de los documentos.

3.5.3. Entrevistas y consultas con expertos.

Se puede utilizar esta técnica cualitativa para obtener información de los expertos en la materia. A través de entrevistas con el personal de ingeniería y mantenimiento de la refinería, se pueden recopilar datos sobre el historial de fallas del sistema, las necesidades operacionales y las limitaciones del proyecto.

3.5.4. Medición de parámetros.

Se pueden utilizar instrumentos de medición para recolectar datos sobre el terreno. Aunque no se realizan experimentos formales, la medición de parámetros como las dimensiones de la cimentación existente, la topografía del terreno y las condiciones ambientales (velocidad del viento, etc.) es esencial para el diseño. Esta técnica proporciona datos cuantitativos que se incorporan directamente en los cálculos.

3.6. Técnicas para el procesamiento de datos.

Las técnicas para el procesamiento de datos en el marco metodológico del proyecto de diseño del tanque de agua se centran en el análisis, la síntesis y la visualización de la información para la toma de decisiones de ingeniería. Estas técnicas incluyen:

3.6.1. Procesamiento de datos cuantitativos.

- Cálculos matemáticos: Se utilizan fórmulas de la hidrostática y la resistencia de materiales para procesar los datos de entrada (capacidad, dimensiones, propiedades del material) y obtener los parámetros de diseño del tanque (espesores de las planchas, peso, etc.).
- Análisis de simulación (FEA): Los datos generados por el software de simulación se procesan para crear visualizaciones (mapas de esfuerzos, deformaciones) y tablas que permiten analizar el comportamiento estructural del tanque bajo diferentes condiciones de carga.

3.6.2. Procesamiento de datos cualitativos.

- Análisis de la matriz morfológica: La información cualitativa sobre las diferentes soluciones (acero, hormigón, prefabricado) se organiza en una matriz para su análisis comparativo.

- Evaluación ponderada: Se asignan puntuaciones (del 1 al 5) a cada solución para cada criterio de evaluación (costo, durabilidad, etc.), lo que permite un análisis objetivo y la selección de la opción más adecuada.

3.6.3. Síntesis y visualización.

- Elaboración de tablas y gráficos: Los datos procesados se presentan en tablas y gráficos claros para facilitar la comprensión. Esto incluye las tablas de evaluación técnica y económica, y los mapas de esfuerzos de la simulación.
- Redacción de informes: La información procesada se sintetiza en un informe que describe el proceso metodológico, presenta los resultados del diseño y justifica las decisiones tomadas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Descripción de las pruebas experimentales.

En este proyecto, no se realizan pruebas experimentales en el sentido tradicional de un experimento de laboratorio. En su lugar, la "validación" del diseño se lleva a cabo a través de un enfoque de ingeniería que incluye tanto la verificación manual como la simulación computacional.

4.1.1. Lista de deseo y exigencias.

Tabla 3

Lista de exigencia del diseño de tanque de agua.

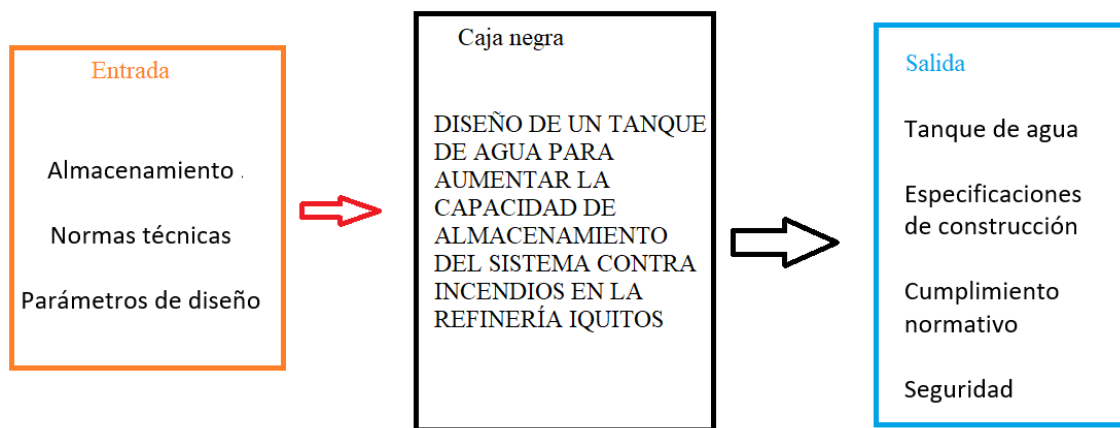
Prioridad	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
1	Exigencia	La capacidad neta debe ser de 6 111,00 m ³ y la capacidad operacional de 5 624,97 m ³ .	F.G.B.
2	Exigencia	Las dimensiones principales del tanque deben ser una altura de 13,10 m y un diámetro de 24,85 m.	F.G.B.
3	Exigencia	El diseño debe adherirse estrictamente a las regulaciones establecidas por la NFPA 22 y la API 650.	F.G.B.
4	Exigencia	El tanque debe estar compuesto por un total de 6 anillos, diseñados para soportar las cargas operativas.	F.G.B.
5	Exigencia	Los materiales para la construcción del tanque y sus componentes deben ser de alta calidad, como el acero ASTM A36 para las planchas, A53 Gr.B para las tuberías y A105 para las bridas.	F.G.B.
6	Exigencia	El espesor de las planchas de la pared del tanque debe cumplir con los cálculos de diseño y las normas, con un mínimo de 6 mm.	F.G.B.
7	Deseo	El tanque debe contar con sensores de nivel y regleta de medición para monitorear en tiempo real su estado operativo.	F.G.B.
8	Exigencia	El diseño debe incluir manholes y boquillas de acceso suficientes para permitir la inspección, limpieza y mantenimiento interno del tanque.	F.G.B.

9	Exigencia	El tanque debe formar parte de un sistema contra incendios eficiente, capaz de suministrar un flujo constante de agua en caso de emergencia.	F.G.B.
10	Exigencia	Se deben considerar todos los elementos de seguridad y anclajes para garantizar que la estructura se mantenga estable y segura ante condiciones externas.	F.G.B.
11	Deseo	El peso total del cilindro debe ser optimizado para evitar cargas excesivas en la base y la cimentación, con un peso calculado de 69 495,86 kg.	F.G.B.
12	Exigencia	El diseño del tanque debe ser validado mediante una simulación por elementos finitos (FEA) para confirmar su comportamiento estructural.	F.G.B.
13	Exigencia	El diseño debe contemplar las condiciones climáticas y ambientales específicas de la refinería, como la temperatura y la exposición a la intemperie.	F.G.B.
14	Deseo	El proyecto debe ser económicamente viable, con un análisis de costo-beneficio que justifique la inversión en el nuevo tanque.	F.G.B.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Caja negra.

Figura 1. Caja negra del concepto de solución.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Concepto de solución.

Entradas.

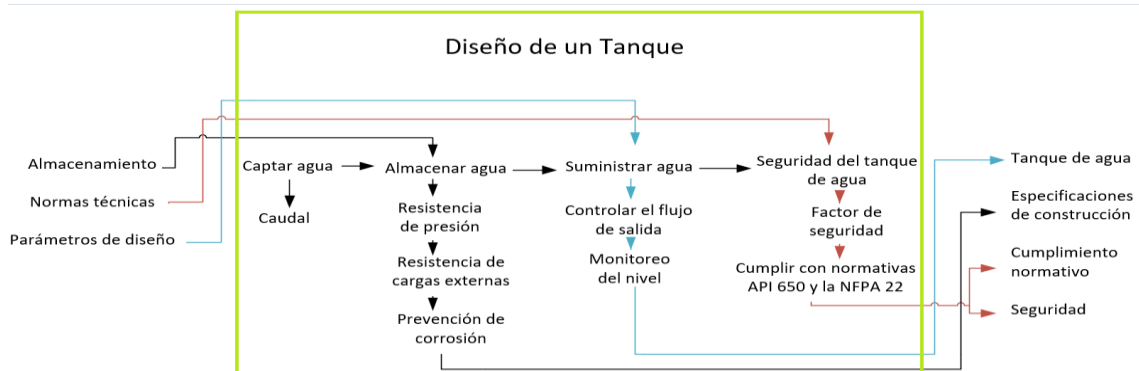
- Almacenamiento: Necesidad de aumentar la capacidad de almacenamiento de agua para la refinería de Iquitos.
- Normas técnicas: API 650 (para el diseño y construcción de tanques) y NFPA 22 (para tanques de agua para protección contra incendios).
- Parámetros de diseño:
 - Capacidad neta deseada (6 111,00 m³).
 - Capacidad operacional deseada (5 624,97 m³).

Salidas.

- Tanque de agua: Tanque de almacenamiento de agua, con una altura de 13,10 m, un diámetro de 24,85 m y seis anillos.
- Especificaciones de construcción: Planos detallados, espesores de planchas (ajustados a la norma API 650).
- Cumplimiento normativo: Un diseño que cumple con las exigencias de las normas NFPA 22 y API 650.
- Seguridad: Un sistema contra incendios con la capacidad de almacenamiento necesaria para proteger las instalaciones y al personal de la refinería.

4.1.4. Estructura de funciones.

Figura 2. Estructura de funciones de la caja negra.



Fuente: Elaboración propia.

Entrada.

La función principal del sistema es procesar la necesidad de almacenar una gran cantidad de agua. Para que esto sea posible, se requiere una entrada de datos de normas técnicas como la API 650 y la NFPA 22, que establecen los requisitos de seguridad y diseño. Además, el sistema necesita los parámetros de diseño específicos del proyecto, como la capacidad neta de 6 111,00 m³ y el diámetro de 24,85 m, que dictan el tamaño y la forma del tanque.

Funciones internas:

El sistema, o la "caja negra", procesa estas entradas a través de una serie de funciones clave:



















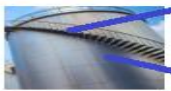











- **Función de dimensionamiento y cálculo:** Utiliza los parámetros de diseño y las normas técnicas para calcular el espesor de las planchas, el peso del cilindro y la cantidad de anillos necesarios.
- **Función de selección de materiales:** Escoge los materiales adecuados (como el acero ASTM A36) que cumplen con los requisitos de las normas y resisten las condiciones del entorno.
- **Función de verificación y validación:** Realiza simulaciones para confirmar que el diseño cumple con los estándares de seguridad y que el tanque puede soportar las cargas operativas.

Salida.

Una vez que las entradas son procesadas por las funciones internas, el sistema produce varias salidas. La salida tangible es el tanque de agua diseñado, listo para ser construido. Esta salida se complementa con las especificaciones de construcción, que incluyen los planos detallados y las instrucciones para la fabricación. Finalmente, el resultado es un diseño que garantiza el cumplimiento normativo con la API 650 y la NFPA 22, y asegura la seguridad para el personal y las instalaciones de la refinería, protegiéndolos contra el riesgo de incendios.

4.1.5. Matriz morfológica.

Figura 3. Matriz morfológica de cada concepto.

	Función	Solución 1 (Tanque de acero convencional)	Solución 2 (Tanque de hormigón armado)	Solución 3 (Tanque prefabricado)
1	Almacenar agua	Contenedor cilíndrico de acero soldado (API 650). 	Contenedor modular de paneles prefabricados. 	Estructura de hormigón armado monolítica. 
2	Resistir presión hidrostática	Paredes de hormigón de espesor uniforme con refuerzo de acero (barras). 	Paredes de acero de espesor variable (anillos) calculadas por fórmulas. 	Paneles con refuerzos internos o externos. 
3	Resistir cargas externas	Uniones atornilladas con sellado para cargas dinámicas. 	Masa de hormigón que proporciona alta resistencia a cargas laterales. 	Estructura de acero rígida y anclada a la cimentación. 
4	Prevenir corrosión	Paneles de acero galvanizado o con recubrimiento especial. 	Recubrimiento epóxico interno y pintura externa. 	Recubrimiento interno de hormigón impermeable. 
5	Controlar el nivel	Sensores modulares que se ajustan a la estructura. 	Sensores integrados en la estructura o montados externamente. 	Sensores de nivel y regla de medición instalados en el tanque. 
6	Suministrar agua	Boquillas y tuberías soldadas a la pared del tanque. 	Conexiones rápidas o unidas a los paneles. 	Boquillas de PVC o acero integradas en la pared de hormigón. 
7	Permitir acceso	Escaleras y accesos de hormigón y metal. 	Puertas de acceso integradas en paneles. 	Manhole y boca de hombre en el techo y la pared. 
8	Integrar a la cimentación	Los paneles se anclan a una losa de cimentación preexistente. 	Apoyada en la cimentación. 	La base es una losa de hormigón monolítica con el tanque. 
9	Normativa de sistemas contra incendio	Cumplimiento de la NFPA 22 y de los códigos de construcción de hormigón, asegurando la resistencia al fuego. 	Cumplimiento de las normas NFPA 22 y API 650 para el diseño, construcción e instalación. 	Certificación de los componentes y el montaje de acuerdo con los requisitos de la NFPA 22. 
10	Método de construcción	Soldadura in situ de planchas de acero. 	Vaciado de hormigón con encofrado. 	Ensamblaje de paneles modulares atornillados. 

Fuente: Elaboración propia.

Almacenar agua.

- **Función:** La función principal del sistema es contener y mantener el volumen de agua requerido para el sistema contra incendios de la refinería.
- **Solución 1 (Tanque de acero convencional):** Un contenedor cilíndrico fabricado con planchas de acero soldadas in situ, siguiendo la normativa API 650. Es una solución robusta y ampliamente utilizada en la industria.
- **Solución 2 (Tanque de hormigón armado):** Una estructura monolítica construida con hormigón armado, que se moldea y vierte en el lugar. Esta solución es conocida por su durabilidad y bajo mantenimiento.
- **Solución 3 (Tanque prefabricado):** Un contenedor modular compuesto por paneles prefabricados que se transportan al sitio y se ensamblan mediante uniones atornilladas. Es una opción que reduce los tiempos de construcción y el costo de transporte.

Resistir presión hidrostática.

- **Función:** El tanque debe soportar la presión del agua que ejerce sobre sus paredes y base, asegurando que no haya fallas estructurales.
- **Solución 1:** Las paredes de acero están diseñadas en forma de anillos, con un espesor que va disminuyendo de abajo hacia arriba. Esto se calcula mediante fórmulas específicas para soportar la presión del líquido.
- **Solución 2:** Las paredes de hormigón tienen un espesor uniforme. La resistencia se logra a través de una red de barras de refuerzo de acero que se coloca dentro del hormigón, absorbiendo los esfuerzos de tracción.
- **Solución 3:** Los paneles prefabricados tienen refuerzos internos o externos, diseñados para distribuir y resistir la presión hidrostática del agua.

Resistir cargas externas.

- **Función:** La estructura debe soportar fuerzas adicionales, como las provocadas por el viento, sismos.
- **Solución 1:** El tanque de acero es una estructura rígida que se ancla a una cimentación de hormigón para transferir las cargas y mantener la estabilidad.

- Solución 2: La gran masa del hormigón le confiere una alta resistencia inherente a las cargas laterales, como las fuerzas sísmicas.
- Solución 3: Las uniones atornilladas entre los paneles están diseñadas para manejar cargas dinámicas y asegurar la cohesión del tanque ante eventos externos.

Prevenir corrosión.

- Función: Proteger el material de construcción de la degradación causada por la exposición al agua y al ambiente, garantizando una larga vida útil.
- Solución 1: Se aplican recubrimientos protectores. Internamente, un recubrimiento epóxico resiste el agua, mientras que la pintura externa protege contra la intemperie.
- Solución 2: Se utiliza un recubrimiento interno de hormigón impermeable, mientras que la propia naturaleza del hormigón es resistente a la corrosión externa.
- Solución 3: Los paneles de acero prefabricados están galvanizados o cuentan con un recubrimiento especial de fábrica, que los protege de la corrosión.

Controlar el nivel.

- Función: Monitorear el volumen de agua dentro del tanque para asegurar que la capacidad de almacenamiento sea siempre la adecuada.
- Solución 1: Se instalan sensores de nivel y regleta de medición.
- Solución 2: Los sensores se pueden integrar en la propia estructura del hormigón o montarse externamente en soportes metálicos.
- Solución 3: Se utilizan sensores modulares que se ajustan fácilmente a la estructura de paneles, permitiendo una instalación sencilla.

Suministrar agua.

- Función: Proporcionar un flujo constante y adecuado de agua al sistema contra incendios en caso de una emergencia.
- Solución 1: Las boquillas y las tuberías de descarga están soldadas directamente a la pared del tanque de acero para asegurar una conexión hermética.
- Solución 2: Las boquillas se fabrican con materiales como PVC o acero y se incrustan en la pared de hormigón durante su construcción.

- Solución 3: Se utilizan conexiones rápidas o bridas que se sujetan a los paneles prefabricados, facilitando el montaje.

Permitir acceso.

- Función: Facilitar la entrada de personal para realizar inspecciones, limpieza y mantenimiento del interior del tanque.
- Solución 1: El tanque de acero cuenta con un manhole (boca de hombre) en el techo y otro en la pared del tanque.
- Solución 2: Se incorporan escaleras y accesos de hormigón y metal para permitir la entrada segura al tanque.
- Solución 3: Los propios paneles prefabricados pueden incluir puertas de acceso integradas, diseñadas para sellarse herméticamente.

Integrar a la cimentación.

- Función: Conectar de forma segura el tanque a su base para distribuir las cargas de peso del agua y del tanque, y asegurar la estabilidad.
- Solución 1: Una placa de base de acero se suelda al cilindro del tanque y se ancla a una cimentación de hormigón.
- Solución 2: La base es una losa de hormigón monolítica, lo que significa que la base y las paredes forman una sola estructura integrada.
- Solución 3: Los paneles prefabricados se anclan a una losa de cimentación preexistente mediante pernos o anclajes especiales.

Normativa de sistemas contra incendio.

- Función: Asegurar que el diseño y la construcción del tanque cumplan con las regulaciones de seguridad para sistemas contra incendios.
- Solución 1: El diseño, construcción y la instalación del tanque de acero se rigen por la API 650 y la NFPA 22, que son estándares internacionales para tanques de almacenamiento de líquidos y sistemas contra incendios, respectivamente.

- Solución 2: Además de la NFPA 22, el diseño debe cumplir con los códigos de construcción de estructuras de hormigón para garantizar su resistencia al fuego y su durabilidad.
- Solución 3: Los componentes prefabricados y el proceso de montaje deben contar con certificaciones que aseguren su conformidad con los requisitos de la NFPA 22.

Método de construcción.

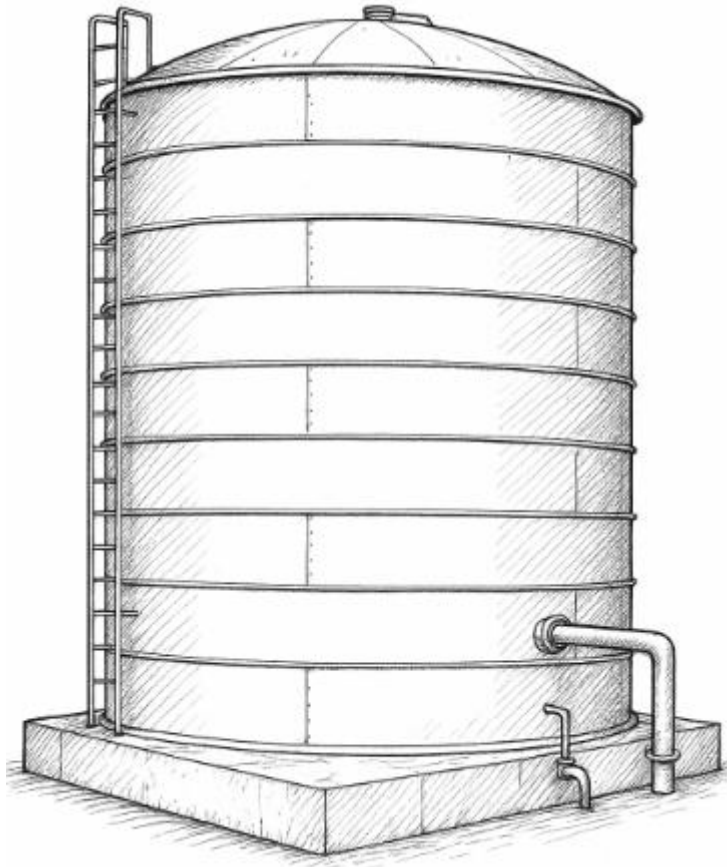
- Función: Describir el proceso técnico utilizado para la fabricación y el montaje del tanque en el sitio.
- Solución 1: Se sueldan las planchas de acero de manera gradual in situ, desde la base hasta la parte superior.
- Solución 2: Se construye un encofrado y se vierte el hormigón, dejando que fragüe y endurezca para crear la estructura monolítica.
- Solución 3: Los paneles prefabricados se transportan y se ensamblan en el lugar utilizando herramientas de fijación como tornillos y pernos.

4.1.6. Alternativas de solución.

Solución 1: Tanque de acero convencional.

Esta solución se centra en el método tradicional de construcción de tanques industriales, utilizando planchas de acero soldadas directamente en el sitio de la refinería. Para almacenar agua, se crea un cilindro robusto con paredes que tienen espesores graduados (en anillos) para resistir la presión hidrostática del agua. La estructura se ancla firmemente a una cimentación de hormigón para resistir las cargas externas como sismos y vientos. Para prevenir la corrosión, se aplica un recubrimiento epóxico en el interior y una pintura protectora en el exterior. El tanque se integra al sistema contra incendios a través de boquillas y tuberías soldadas, con accesos como manholes para mantenimiento. La construcción, que cumple con las normas NFPA 22 y API 650, es relativamente rápida, pero requiere mantenimiento constante para evitar la oxidación, lo que se considera su principal desventaja.

Figura 4. Tanque de agua de acero.

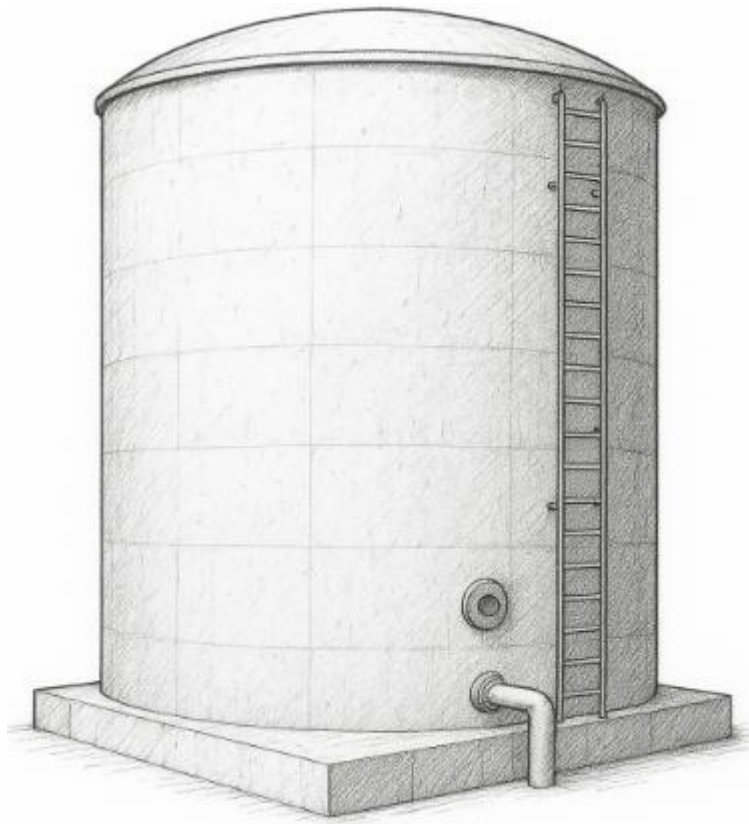


Fuente: Elaboración propia.

Solución 2: Tanque de hormigón armado.

En esta opción, el tanque se concibe como una estructura monolítica de hormigón armado, un material conocido por su durabilidad. La función de almacenar agua se logra con una construcción de hormigón que resiste la presión hidrostática gracias a la malla de acero de refuerzo embebida en la masa. Esta misma estructura maciza confiere una gran capacidad para resistir cargas externas y previene la corrosión al ser intrínsecamente impermeable. El control del nivel se realiza con sensores integrados en la pared de hormigón, y el suministro de agua se gestiona a través de boquillas preinstaladas. El acceso para mantenimiento se facilita con escaleras y aperturas específicas. Aunque el método de construcción con hormigón es más lento y costoso, la gran ventaja es su larga vida útil y la reducción drástica de los costos de mantenimiento a largo plazo.

Figura 5. Tanque de agua de hormigón armado.

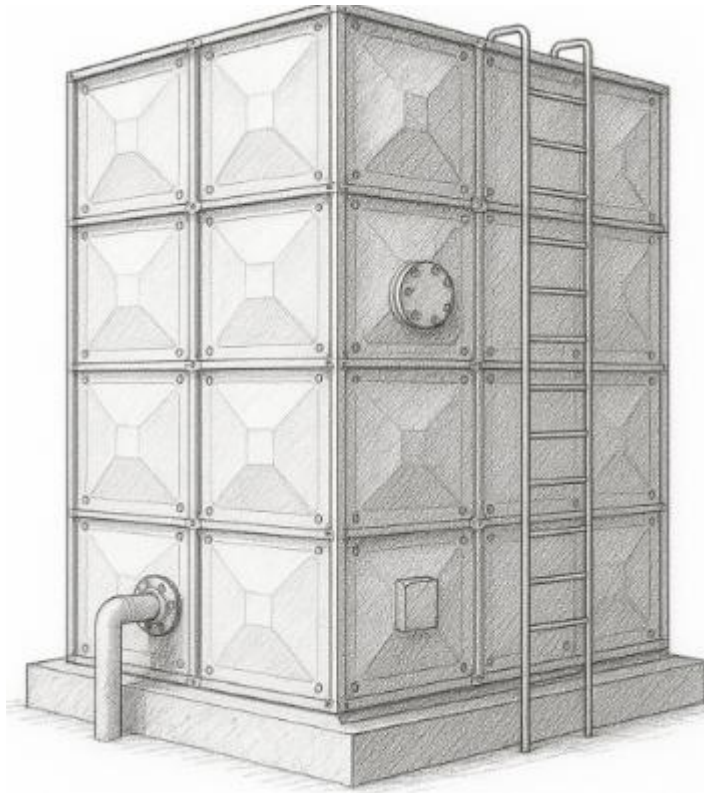


Fuente: Elaboración propia.

Solución 3: Tanque prefabricado modular.

Esta solución se basa en la modularidad y la rapidez de construcción. El almacenamiento de agua se consigue ensamblando paneles prefabricados que se fabrican en una planta y se transportan al sitio. Los paneles están diseñados para resistir la presión hidrostática y las cargas externas mediante uniones atornilladas y refuerzos. Para prevenir la corrosión, los paneles vienen con recubrimientos especiales de fábrica. El control de nivel se realiza con sensores modulares que se ajustan al diseño, y el suministro de agua se conecta a través de bridas en los paneles. El acceso para mantenimiento también está integrado en los paneles. Las principales ventajas de esta solución son el bajo costo, la facilidad de transporte y la rapidez de montaje, lo que la hace ideal para proyectos con plazos ajustados. Sin embargo, su desventaja más significativa es el potencial de fugas en las uniones entre los paneles, que requieren un sellado cuidadoso.

Figura 6. Tanque prefabricado modular.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.7. Evaluación de los conceptos de solución.

Tabla 4

Evaluación técnico de cada concepto.

Características	S1	S2	S3
1 Costo de construcción	3	1	5
2 Durabilidad y vida útil	3	5	2
3 Facilidad de mantenimiento	2	5	3
4 Velocidad de construcción	4	1	5

5	Resistencia a la corrosión	2	5	4
6	Resistencia a cargas externas	4	5	3
7	Cumplimiento Normativo (NFPA 22)	5	4	4
	Puntajes totales	23	26	26
	Rendimiento de puntajes	0,66	0,74	0,74

Fuente: Elaboración propia.

Ponderaciones.

1: No satisface.

2: Aceptable a las justas.

3: Suficiente.

4: Bien.

5: Muy bien.

Tabla 5

Evaluación económico de cada concepto.

Características	S1	S2	S3
1 Costo de inversión inicial	3	1	5
2 Costo de mantenimiento anual	1	5	3
3 Vida útil económica	3	5	2
4 Costo de cimentación	3	2	4
5 Costo de transporte	3	4	5

Puntajes totales	13	17	19
Rendimiento de puntajes	0,52	0,68	0,76

Fuente: Elaboración propia.

Ponderaciones.

1: Bajo.

2: Bajo - medio.

3: Medio.

4: Medio - Alto.

5: Alto.

Tabla 6

Evaluación técnico – económico.

Eje X, valor técnico	Eje Y, valor económico
0,66	0,52
0,74	0,68
0,74	0,76

Fuente: Elaboración propia.

Ponderaciones.

1: No satisface.

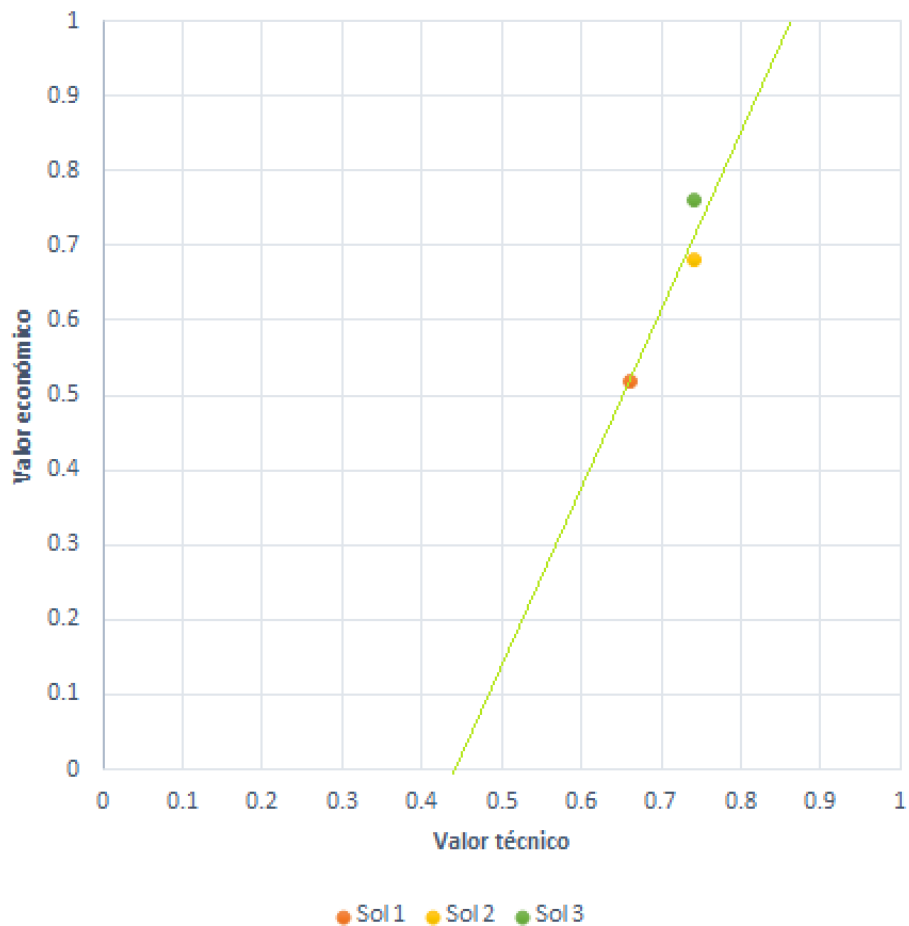
2: Aceptable a las justas.

3: Suficiente.

4: Bien.

5: Muy bien.

Figura 7. Evaluación técnico - económico.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.8. Evaluación del proyecto.

Según la figura anterior, se observa que la solución 1 conserva una mejor relación económica y técnica.

4.2. Elaboración del proyecto.

4.2.1. Criterios del diseño.

El tanque será diseñado de acuerdo con el API STD 650 13th.

- Juntas de techo frágiles.
- El espesor del cuerpo, fondo, techo y estructura de soporte incluirá una tolerancia por corrosión.
- Boquilla de ventilación del tanque.

Condiciones de sitio.

Tabla 7

Condiciones Ambientales.

Descripción	Unidad	Valores
Temperatura Ambiente	°C	Máx. 37,9 / Mín. 20,3
Humedad Relativa promedio	%	86
Presión Atmosférica	mmHg	Prom. 753,91
Velocidad del Viento	m/s	Máx. 2,66 / Mín. 0,66
Zona Sísmica	-	1
Metros sobre el nivel del mar	m	100

Fuente: Elaboración propia

Capacidad requerida.

El tanque cumplirá con la capacidad requerida según el análisis de riesgo realizado, para abastecer al sistema contra incendio durante un evento o incendio.

- Capacidad Neta: 6 111,00 m³
- Capacidad Operacional: 5 624,97 m³

Materiales.

Tabla 8

Materiales para la construcción del tanque.

Descripción	Material
Placas de fondo, cuerpo y techo.	ASTM A36
Estructura de soporte de techo.	ASTM A36, ASTM A53 Gr.B
Tuberías	ASTM A53 Gr.B
Bridas	ASTM A105
Pernos estructural	ASTM F3125
Espárragos	ASTM A193 Gr. B7
Tuercas	ASTM A194 Gr. 2H

Fuente: Elaboración propia

Boquillas.

Tabla 9

Boquillas del tanque.

Nº	Descripción	Diámetro en pulgadas
MH1	Manhole del cuerpo	24
HM2	Manhole del cuerpo	30
N1	Entrada de agua	6
N2	Salida de agua	16
N3	Drenaje	4
N4	Rebose	4
L1,L2,L3	Sensores de nivel	2
MH3	Manhole de techo	24
MH4	Manhole de techo	24

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Cálculos geométricos.

Determinación del diámetro y altura nominal del tanque.

Ecuación del volumen.

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * A_T \quad [1]$$

Donde:

V : Volumen o capacidad neta del tanque (m^3).

D : Diámetro del tanque (m).

A_T : Altura del tanque (m).

Para el diseño del tanque se considera el uso de láminas de 2 400mm x 6 000mm.

Relación de diámetro y cantidad de planchas.

$$D = \frac{P}{\pi} = \frac{N_1 * 6}{\pi} \quad [2]$$

Donde:

P : Perímetro (m).

N_1 : Cantidad de planchas por anillo.

Relación de altura y cantidad de anillos.

$$A_T = N_2 * 2,4 \quad [3]$$

Donde:

N_2 : Cantidad de anillos.

Cálculo de la cantidad de anillos del tanque.

$$N_2 = \frac{V * 4}{\pi * D^2 * 2,4} \quad [4]$$

Donde:

V : Capacidad neta del tanque (6 111m³).

D : Diámetro del tanque (m).

- Si el tanque cuenta con 11 planchas por anillo, diámetro de 21 metros:

$$N_2 = \frac{6\ 111 * 4}{\pi * 21^2 * 2,4} = 7,35$$

Altura de 17,64 metros.

- Si el tanque cuenta con 12 planchas por anillo, diámetro de 22,92 metros:

$$N_2 = \frac{6\ 111 * 4}{\pi * 22,92^2 * 2,4} = 6,17$$

Altura de 14,81 metros.

- Si el tanque cuenta con 13 planchas por anillo, diámetro de 24,83 metros:

$$N_2 = \frac{6\ 111 * 4}{\pi * 24,83^2 * 2,4} = 5,26$$

Altura de 12,62 metros.

- Si el tanque cuenta con 14 planchas por anillo, diámetro de 26,74 metros:

$$N_2 = \frac{6\ 111 * 4}{\pi * 26,74^2 * 2,4} = 4,53$$

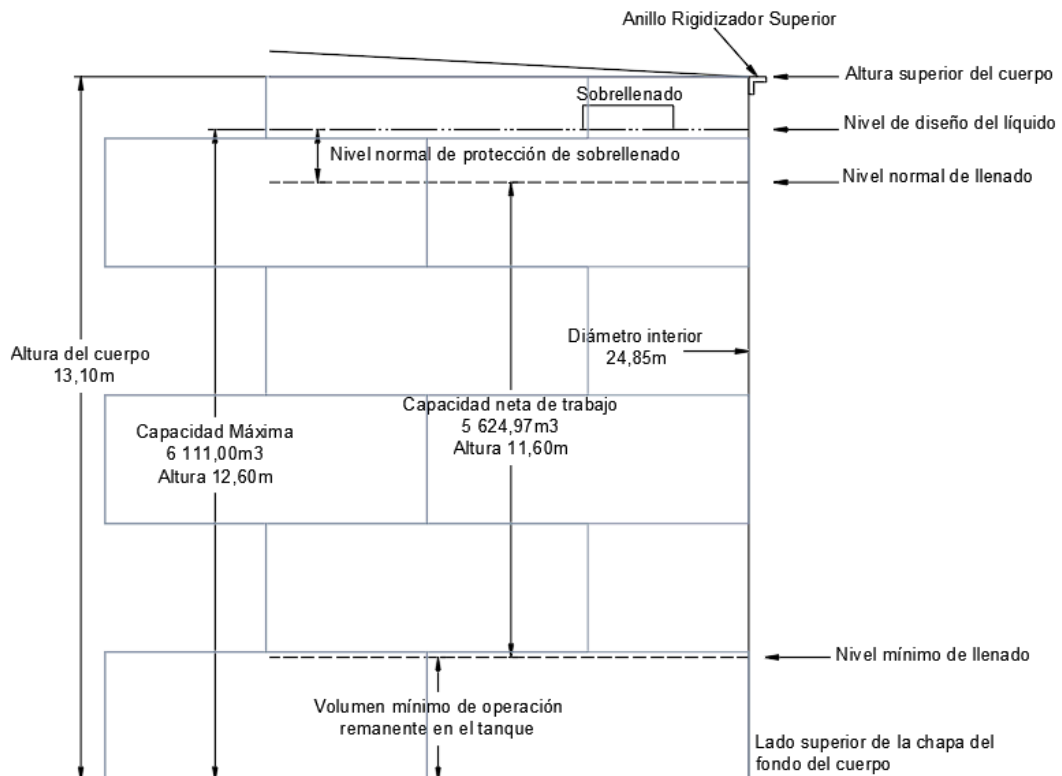
Altura de 10,87 metros.

Ajuste de dimensiones del tanque y verificación de volumen operativo.

La altura del cuerpo debe superar la altura del diseño del líquido, debido a que los tanques cuentan con un anillo rigidizador superior y exige una separación mínima de 150mm entre costuras o juntas de soldadura horizontal. Se adiciona 0,50m de altura.

- Altura del tanque $A_T=13,10\text{m}$.
- Diámetro del tanque $D=24,85\text{m}$.
- Cantidad de anillos $N_a=6$.

Figura 8. Dimensiones del tanque.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Cálculos de elementos mecánicos.

Pared del tanque.

Tabla 10

Espesores de corrosión admisible en anillos del tanque.

Anillo	Altura en mm	Espesor de corrosión admisible en mm
Primero	2 400	3
Segundo	2 400	3

Tercero	2 400	1,5
Cuarto	2 400	1,5
Quinto	2 400	1,5
Sexto	1 100	1,5

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de espesor por método del pie.

Debido a que el fluido a almacenar es agua no es necesario calcular los espesores de prueba hidrostática. Se toma los valores calculados de espesor en condiciones de diseño.

$$t_d = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{S_d} + CA \quad [5]$$

Donde:

t_d : Espesor de diseño (mm).

D : Diámetro del tanque (m).

H : Nivel del líquido para el punto de diseño (m).

G : Gravedad específica de diseño.

CA : Corrosión admisible (mm).

S_d : Esfuerzo admisible para las condiciones de diseño (Mpa).

El esfuerzo admisible de diseño para el material ASTM A36 es 160Mpa.

Tabla 11

Niveles de líquido de diseño.

Anillo	Altura del anillo A_a en mm	Nivel de líquido de diseño (H) en mm
Primero	2 400	12 600
Segundo	2 400	10 200
Tercero	2 400	7 800
Cuarto	2 400	5 400
Quinto	2 400	3 000
Sexto	1 100	600

Fuente: Elaboración propia.

- Espesor de diseño del primer anillo:

$$t_{d1} = \frac{4,9D(H_1 - 0,3)G}{S_d} + CA_1$$

$$t_{d1} = \frac{4,9 * 24,85 * (12,6 - 0,3) * 1}{160} + 3 = 12,36 \text{ mm}$$

- Espesor de diseño del segundo anillo:

$$t_{d2} = \frac{4,9D(H_2 - 0,3)G}{S_d} + CA_2$$

$$t_{d2} = \frac{4,9 * 24,85 * (10,2 - 0,3) * 1}{160} + 3 = 10,53 \text{ mm}$$

- Espesor de diseño del tercer anillo:

$$t_{d3} = \frac{4,9D(H_3 - 0,3)G}{S_d} + CA_3$$

$$t_{d3} = \frac{4,9 * 24,85 * (7,8 - 0,3) * 1}{160} + 1,5 = 7,21 \text{ mm}$$

- Espesor de diseño del cuarto anillo:

$$t_{d4} = \frac{4,9D(H_4 - 0,3)G}{S_d} + CA_4$$

$$t_{d4} = \frac{4,9 * 24,85 * (5,4 - 0,3) * 1}{160} + 1,5 = 5,38 \text{ mm}$$

- Espesor de diseño del quinto anillo:

$$t_{d5} = \frac{4,9D(H_5 - 0,3)G}{S_d} + CA_5$$

$$t_{d5} = \frac{4,9 * 24,85 * (3,0 - 0,3) * 1}{160} + 1,5 = 3,55 \text{ mm}$$

- Espesor de diseño del sexto anillo:

$$t_{d6} = \frac{4,9D(H_6 - 0,3)G}{S_d} + CA_6$$

$$t_{d6} = \frac{4,9 * 24,85 * (0,6 - 0,3) * 1}{160} + 1,5 = 1,73 \text{ mm}$$

De acuerdo con el punto 5.6.1.1 de API 650, el espesor mínimo para tanques de diámetros mayores a 15 metros y menores a 36 metros es 6 milímetros.

Tabla 12

Espesores de planchas de cilindro.

Anillo	Espesor de diseño t_d en mm	Espesor E_a en mm
Primero	12,36	12,5
Segundo	10,53	12
Tercero	7,21	8
Cuarto	5,38	6
Quinto	3,55	6
Sexto	1,73	6

Fuente: Elaboración propia.

Peso del cilindro.

$$P_{an} = \pi * D * A_{an} * E_{an} * \rho \quad [6]$$

Donde:

P_{an} : Peso de anillo (kg).

D : Diámetro del tanque (24,85m).

A_{an} : Altura de anillo (m).

E_{an} : Espesor del anillo (m).

ρ : Densidad del acero (7 850kg/m³).

- Peso del primer anillo P_{a1} :

$$P_{a1} = \pi * D * A_{a1} * E_{a1} * \rho$$

$$P_{a1} = \pi * 24,85 * 2,4 * 0,0125 * 7\ 850 = 18\ 385,15\ kg$$

- Peso del segundo anillo P_{a2} :

$$P_{a2} = \pi * D * A_{a2} * E_{a2} * \rho$$

$$P_{a2} = \pi * 24,85 * 2,4 * 0,012 * 7\ 850 = 17\ 649,74\ kg$$

- Peso del tercer anillo P_{a3} :

$$P_{a3} = \pi * D * A_{a3} * E_{a3} * \rho$$

$$P_{a3} = \pi * 24,85 * 2,4 * 0,008 * 7\,850 = 11\,766,50 \text{ kg}$$

- Peso del cuarto anillo P_{a4} :

$$P_{a4} = \pi * D * A_{a4} * E_{a4} * \rho$$

$$P_{a4} = \pi * 24,85 * 2,4 * 0,006 * 7\,850 = 8\,824,87 \text{ kg}$$

- Peso del quinto anillo P_{a5} :

$$P_{a5} = \pi * D * A_{a5} * E_{a5} * \rho$$

$$P_{a5} = \pi * 24,85 * 2,4 * 0,006 * 7\,850 = 8\,824,87 \text{ kg}$$

- Peso del sexto anillo P_{a6} :

$$P_{a6} = \pi * D * A_{a6} * E_{a6} * \rho$$

$$P_{a6} = \pi * 24,85 * 1,1 * 0,006 * 7\,850 = 4\,044,73 \text{ kg}$$

Peso total del cilindro P_{TC} .

$$P_{TC} = P_{a1} + P_{a2} + P_{a3} + P_{a4} + P_{a5} + P_{a6} \quad [7]$$

$$P_{TC} = 69\,495,86 \text{ kg}$$

Carga total del cilindro.

$$W_{TC} = P_{TC} * 9,81 \quad [8]$$

$$W_{TC} = 69\,495,86 * 9,81 = 681\,754 \text{ N}$$

Fondo del tanque.

Espesor de láminas de fondo.

De acuerdo con el punto 5.4.1 de API 650: Todas las láminas del fondo deben tener un espesor corroído no menor a 6mm.

Considerando una corrosión de 3mm, se selecciona el espesor de láminas del fondo del tanque.

$$E_{LF} = 9,5 \text{ mm}$$

Espesor de placa anular.

El espesor de la placa anular no debe ser menor a los valores que se encuentran en la tabla del API 650.

Tabla 13

Espesores de placa anular en mm.

Espesor de plancha del primer anillo (mm)	Esfuerzo de plancha del primer anillo (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 \leq t \leq 25$	6	7	10	11
$25 \leq t \leq 32$	6	9	12	14
$32 \leq t \leq 40$	8	11	14	17
$40 \leq t \leq 45$	9	13	16	19

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al artículo 42 del D.S. 052-93-EM, el espesor de la placa anular deberá ser igual al espesor del primer anillo E_{a1} .

$$E_{PA} = 12,5 \text{ mm}$$

Ancho de placa anular.

$$L = 2 * E_{PA} \sqrt{\frac{F_y}{2 * \gamma * G * H_d}} \quad [9]$$

Donde:

L: Distancia radial mínima medida desde el borde interior del cuerpo hasta el borde de la placa (mm).

F_y : Límite elástico mínimo de la placa anular a temperatura ambiente “Tabla 5.2a API 650” (250Mpa).

E_{PA} : Espesor nominal de la placa anular (12,5mm).

H_d : Nivel máximo de líquido de diseño (12,6m).

G: Gravedad específica del agua (1).

γ : Factor de densidad del agua ($9,81 \times 10^{-3}$ Mpa/m).

$$L = 2 * 12,5 \sqrt{\frac{250}{2 * 9,81 * 10^{-3} * 1 * 12,6}} = 795,01 \text{ mm}$$

De acuerdo con la sección 5.4.2 de API 650, las planchas del fondo se proyectarán 50mm hacia el exterior del tanque, respecto al borde exterior de las láminas que conforman el anillo en contacto al fondo (primer anillo).

$$L + E_{a1} + 50$$

$$795,01 + 12,5 + 50 = 857,51 \text{ mm}$$

Selección de ancho de placa anular.

$$L_{PA} = 900 \text{ mm}$$

Peso de fondo del tanque.

$$P_{TF} = P_{LF} + P_{PA} \quad [10]$$

Donde:

P_{TF} : Peso total de fondo (kg).

P_{LF} : Peso de láminas de fondo (kg).

P_{PA} : Peso de placa anular (kg).

- Peso de láminas de fondo P_{LF} :

$$P_{LF} = A_{LF} * E_{LF} * \rho \quad [11]$$

A_{LF} : Área de láminas de fondo (m²).

E_{LF} : Espesor de láminas de fondo (9,5x10⁻³m).

ρ : Densidad del acero (7 850kg/m³).

$$A_{LF} = \pi * r_{LF}^2 \quad [12]$$

r_{LF} : Radio de láminas de fondo (m).

$$r_{LF} = r + E_{a1} + P_{ext} - L_{PA} \quad [13]$$

r : Radio del tanque (12,425m).

E_{a1} : Espesor del primer anillo (12,5x10⁻³m).

P_{ext} : Proyección hacia el exterior del tanque. (0,05m).

L_{PA} : Ancho de placa anular (0,90m).

$$r_{LF} = 12,425 + 12,5 * 10^{-3} + 0,05 - 0,9 = 11,588 \text{ m}$$

Entonces:

$$P_{LF} = \pi * 11,588^2 * 9,5 * 10^{-3} * 7\ 850 = 31\ 460,10 \text{ kg}$$

- Peso de placa anular P_{PA} :

$$P_{PA} = A_{PA} * E_{PA} * \rho \quad [14]$$

A_{PA} : Área de placa anular (m^2).

E_{PA} : Espesor de placa anular ($12,5 \times 10^{-3} \text{m}$).

ρ : Densidad del acero ($7\ 850 \text{kg}/\text{m}^3$).

$$A_{PA} = \pi(r_{PA}^2 - r_{LF}^2) \quad [15]$$

r_{PA} : Radio de placa anular (m).

r_{LF} : Radio de láminas de fondo (11,588m).

$$r_{PA} = r_{LF} + L_{PA} \quad [16]$$

L_{PA} : Distancia radial de la placa anular (0,90m).

Entonces:

$$P_{PA} = \pi((r_{LF} + L_{PA})^2 - r_{LF}^2) * E_{PA} * \rho$$

$$P_{PA} = \pi((11,588 + 0,9)^2 - 11,588^2) * 12,5 * 10^{-3} * 7\ 850$$

$$P_{PA} = 6\ 893,75 \text{ kg}$$

Finalmente:

$$P_{TF} = P_{LF} + P_{PA}$$

$$P_{TF} = 31\ 460,10 + 6\ 893,75 = 38\ 353,85 \text{ kg}$$

Carga total del fondo.

$$W_{TF} = P_{TF} * 9,81 \quad [17]$$

$$W_{TF} = 38\ 353,85 * 9,81 = 376\ 251 \text{ N}$$

Techo del tanque.

Espesor de láminas del techo.

De acuerdo con la sección 5.10.2.2 del API 650, el espesor mínimo es 5mm. Se selecciona el espesor de láminas de techo de 6mm.

$$E_{LT} = 6 \text{ mm}$$

Peso del techo.

$$P_{TT} = V_T * \rho \quad [18]$$

Donde:

P_{TT} : Peso total de techo (kg).

V_T : Volumen de techo (m³).

ρ : Densidad del acero (7 850kg/ m³).

- Volumen de techo V_T :

$$V_T = A_T * E_{LT} \quad [19]$$

A_T : Área de techo (m²).

E_{LT} : Espesor de láminas de techo (6x10⁻³m).

$$A_T = \pi * r_{bt} * a \quad [20]$$

r_{bt} : Radio base del techo (12,456m).

a : Longitud lado de techo (m).

$$a = \frac{r_{bt}}{\text{Cos}(\alpha)} \quad [21]$$

α : Ángulo del techo.

$$\alpha = \text{tang}^{-1}(p)$$

p : Pendiente del techo (1:16).

Entonces:

$$A_T = \pi * 12,456 * \frac{12,456}{\text{Cos}(\text{tang}^{-1}(\frac{1}{16}))} = 488,38 \text{ m}^2$$

Finalmente:

$$P_{TT} = A_T * E_{LT} * \rho$$

$$P_{TT} = 488,38 * 6 * 10^{-3} * 7\,850 = 23\,002,70 \text{ kg}$$

Carga total de techo.

$$W_{TT} = P_{TT} * 9,81 \quad [22]$$

$$W_{TT} = 23\,002,70 * 9,81 = 225\,656 \text{ N}$$

Combinaciones de carga de techo.

De acuerdo con la sección 5.2.2 del API 650.

Combinaciones de cargas para techo C_{WT} :

$$D_L + (L_r, S_u, S_b) + F_{pe}P_e \quad [23]$$

$$D_L + P_e + 0.4 (L_r, S_u, S_b) \quad [24]$$

Donde:

D_L : Presión de carga muerta de planchas de techo (kPa).

L_r : Presión mínima de carga viva de planchas de techo “Sección 5.2.1 del API 650” (1kPa).

S_u : Desbalance por carga de nieve (0kPa).

S_b : Balance por carga de nieve (0kPa).

F_{pe} : Factor de combinación de presión externa (0,4).

P_e : Presión de diseño externo “Sección 5.2.1 del API 650” (0,25kPa).

$$D_L = \frac{W_{TT}}{A_{HT} * 10^3} \quad [25]$$

W_{TT} : Carga total de techo. (225 656N).

A_{HT} : Área horizontal proyectada del techo (m²).

$$A_{HT} = \pi * r_{bt}^2 \quad [26]$$

r_{bt} : Radio base del techo (12,456m).

Entonces:

$$\frac{W_{TT}}{\pi * r_{bt}^2 * 10^3} + L_r + F_{pe}P_e$$

$$\frac{225\ 656}{\pi * 12,456^2 * 10^3} + 1 + 0,4 * 0,25 = 1,56\ kPa$$

$$\frac{W_{TT}}{\pi * r_{bt}^2 * 10^3} + P_e + 0,4L_r$$

$$\frac{225\ 656}{\pi * 12,456^2 * 10^3} + 0,25 + 0,4 * 1 = 1,11\ kPa$$

Se concluye que la combinación de cargas del techo es $C_{WT}=1,56\text{kPa}$.

Estructura de soporte de techo.

Vigas radiales.

- Espaciado máximo de vigas radiales E_{MVR} .

De acuerdo al 5.10.4.4, el espaciado de vigas es:

$$E_{MVR} = E_{LTR} \sqrt{\frac{1,5F_y}{C_{WT}}} \leq 2\ 100\ mm \quad [27]$$

Donde:

E_{MVR} : Espaciado máximo de vigas radiales (mm).

E_{LTR} : Espesor de láminas de techo corroído (5mm).

F_y : Límite elástico mínimo de techo (250MPa).

C_{WT} : Combinación de cargas de techo ($1,56 \times 10^{-3}$ MPa).

$$E_{MVR} = 5 \sqrt{\frac{1,5 * 250}{1,56 * 10^{-3}}} \leq 2\ 100\ mm$$

$$E_{MVR} = 2\ 451,45\ mm \leq 2\ 100\ mm$$

$$E_{MVR} = 2\ 100\ mm$$

- Cantidad de vigas radiales N_{VR} .

$$N_{VR} = \frac{P}{E_{MVR}} = \frac{2 * \pi * r}{E_{MVR}} \quad [28]$$

E_{MVR} : Espaciado máximo de vigas radiales (2,1m).

P : Perímetro del tanque (m).

r : Radio del tanque (12,425m).

$$N_{VR} = \frac{2 * \pi * 12,425}{2,1} = 37,18$$

$$N_{VR} = 38$$

- Espaciado de vigas radiales E_{VR} .

$$E_{VR} = \frac{P}{N_{VR}} = \frac{2 * \pi * r}{N_{VR}} \quad [29]$$

N_{VR} : Cantidad de vigas radiales (38).

P : Perímetro del tanque (m).

r : Radio del tanque (12,425m).

$$E_{VR} = \frac{2 * \pi * 12,425}{38} = 2,054 \text{ m}$$

- Longitud de vigas radiales L_{VR} .

La instalación de las vigas se realiza sobre el capitel de diámetro 2,2 metros y las ménsulas de soporte. La longitud total de la viga es 11,455m.

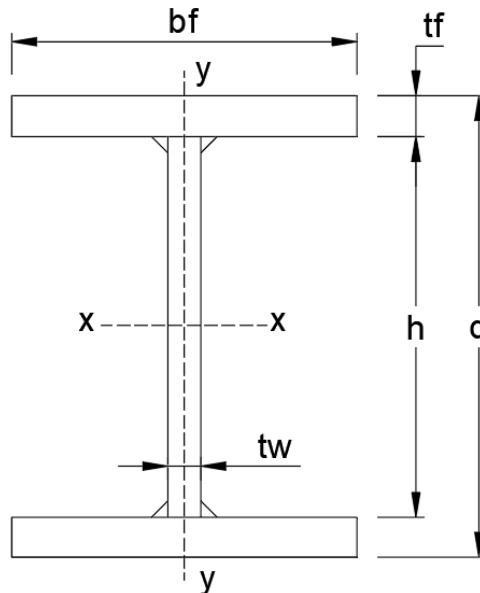
$$L_{VR} = 11,455 \text{ m}$$

Diseño de vigas radiales según AISC 360.

- Propiedades de material ASTM A36.
 - Módulo de elasticidad E : 200 000MPa.
 - Tensión mínima a la fluencia F_y : 250Mpa.
 - Resistencia a la tracción mínima F_u : 400MPa.

- Dimensiones y propiedades del perfil W10x22.

Figura 9. Dimensiones y propiedades de perfil I W10x22.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Dimensiones y propiedades del perfil W10x22 en SI y margen de corrosión de 1,5mm.

Descripción	Variable	Valor	Corroído	Unidad
Peso	P_v	32,9	19,88	kg/m
Altura de la sección	d	259,1	256,1	mm
Área	A	4 187	2 541,9	mm ²
Espesor de alma	t_w	6,1	3,1	mm
Espesor de ala	t_f	9,1	6,1	mm
Ancho de ala	b_f	146	143	mm
Radio de giro en torno al eje x	r_x	108,5	108,5	mm
Radio de giro en torno al eje y	r_y	33,8	33,8	mm
Momento de inercia sobre eje x	I_x	4 911,53	3 138,19	cm ⁴
Momento de inercia sobre eje y	I_y	474,50	299,35	cm ⁴
Módulo elástico de la sección entorno al eje x	S_x	380,18	245,76	c m ³
Módulo elástico de la sección entorno al eje y	S_y	65,06	41,90	c m ³

Módulo plástico de la sección entorno al eje x	Z_x	426,06	268,14	c m^3
Módulo plástico de la sección entorno al eje y	Z_y	99,96	63,58	c m^3
Constante de alabeo (deformación)	c_w	73 847,36	46 623,93	cm^6
Constante torsional	J	9,95	2,62	cm^4
Coordenadas del centroide respecto al eje x	x_o	73,02	71,52	mm
Coordenadas del centroide respecto al eje y	y_o	129,55	128,04	mm

Fuente: Elaboración propia.

- Clasificación de la sección.

A1a: Elemento no atiesado, caso 10, Tabla B4.1b: Miembros sometidos a flexión.

Razón ancho-espesor: Se determina con los valores corroídos.

$$\frac{b}{t_f} = \frac{b_f}{2 * t_f} \quad [30]$$

$$\frac{b}{t_f} = \frac{143}{2 * 6,1} = 11,72$$

$$\lambda_{pf} = 0,38 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad [31]$$

$$\lambda_{pf} = 0,38 * \sqrt{\frac{2 * 10^5}{250}} = 10,75$$

$$\lambda_{rf} = 1 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad [32]$$

$$\lambda_{rf} = 1 * \sqrt{\frac{2 * 10^5}{250}} = 28,58$$

Si:

$$\frac{b}{t_f} < \lambda_{pf} , \text{ Sección compacta.}$$

$$\frac{b}{t_f} > \lambda_{pf} , \frac{b}{t_f} \leq \lambda_{rf} , \text{ Sección no compacta.}$$

$\frac{b}{t_f} > \lambda_{rf}$, Sección esbelta.

11,72 > 10,75 , 11,72 ≤ 28,28 , Ala no compacta.

Alma: Elemento atiesado, caso 15, Tabla B4.1b: Elementos en compresión.
Miembros sometidos a flexión.

Razón ancho-espesor: Se determina con los valores corroídos.

$$\frac{h}{t_w} = \frac{d - (2 * t_f)}{t_w} \quad [33]$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{256,1 - (2 * 6,1)}{3,1} = 78,68$$

$$\lambda_{pw} = 3,76 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad [34]$$

$$\lambda_{pw} = 3,76 * \sqrt{\frac{2 * 10^5}{250}} = 106,35$$

$$\lambda_{rw} = 5,70 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad [35]$$

$$\lambda_{rw} = 5,70 * \sqrt{\frac{2 * 10^5}{250}} = 161,22$$

Si:

$\frac{h}{t_w} < \lambda_{pw}$, Sección compacta.

$\frac{h}{t_w} > \lambda_{pw}$, $\frac{h}{t_w} \leq \lambda_{rw}$, Sección no compacta.

$\frac{h}{t_w} > \lambda_{rw}$, Sección esbelta.

78,68 < 106,35 , Alma compacta.

- Diseño de perfil W10x22.

El perfil está sometido a esfuerzo de tensión, esto debido a la carga del techo y el peso de la estructura.

De acuerdo al capítulo F “Diseño de miembros a flexión”, tabla F1.1, se aplica la sección F.3 “Miembros de sección HDE simetría doble con almas compactas y alas no compactas o esbeltas flectados en torno a su eje mayor”.

Análisis de fluencia.

$$M_n = M_p = F_y Z_x \quad [36]$$

Donde:

M_n : Resistencia nominal de flexión (N.mm).

M_p : Momento de flexión plástico (N.mm).

F_y : Tensión mínima a la fluencia (250MPa).

Z_x : Módulo plástico de la sección entorno al eje x (268,14 cm³).

$$M_n = 250 * 10^6 * 268,14 * 10^{-6} = 67\ 035\ N.m$$

$$M_n = 67\ 035 * 10^3\ N.mm$$

Análisis de pandeo lateral-torsional.

$$\text{Si: } L_p < L_b \leq L_r$$

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \quad [37]$$

Donde:

M_n : Resistencia nominal en flexión (N.m).

C_b : Factor de modificación por pandeo lateral-torsional (1).

M_p : Momento de flexión plástico (67 035N.m).

F_y : Tensión mínima a la fluencia (250MPa).

S_x : Módulo elástico de la sección entorno al eje x (245,76cm³).

L_b : Longitud entre puntos arriostrado contra el giro de la sección transversal (mm).

L_r : Longitud límite sin arriostramiento lateral para el estado límite de pandeo flexo-torsional inelástico (mm).

L_p : Longitud límite sin arriostramiento lateral para el estado límite de fluencia (mm).

$$L_r = 1,95r_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{JC}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{JC}{S_x h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad [38]$$

r_{ts} : Radio de efectivo para pandeo lateral torsional (cm).

E : Módulo de elasticidad (200 000MPa).

F_y : Tensión mínima a la fluencia (250MPa).

J : Constante torsional (2,62cm⁴).

C : Coeficiente de una sección I (1).

S_x : Módulo elástico de la sección entorno al eje x (245,76cm³).

h_o : Distancia entre los centroides de las alas (mm).

$$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}} \quad [39]$$

I_y : Momento de inercia sobre eje y (299,35cm⁴).

C_w : Constante de aladeo (deformación) (46 623,93cm⁶).

S_x : Módulo elástico de la sección entorno al eje x (245,76cm³).

$$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{299,35 * 46 623,93}}{245,76}} = 3,899 \text{ cm}$$

$$h_o = d - t_f \quad [40]$$

d : Altura de sección (256,1mm).

t_f : Espesor de ala (6,1mm).

$$h_o = 256,1 - 6,1 = 250 \text{ mm}$$

Entonces:

$$L_r = 1,95 * 38,99 * \frac{2 * 10^5}{0,7 * 250} \sqrt{\frac{2,62 * 1}{245,76 * 25} + \sqrt{\left(\frac{2,62 * 1}{245,76 * 25}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 * 250}{2 * 10^5}\right)^2}}$$

$$L_r = 4 549 \text{ mm}$$

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad [41]$$

r_y : Radio de giro en torno al eje y (33,8mm).

E : Módulo de elasticidad (200 000MPa).

F_y : Tensión mínima a la fluencia (250MPa).

$$L_p = 1,76 * 33,8 \sqrt{\frac{2 * 10^5}{250}} = 1\ 683\ mm$$

$$L_b = \frac{L_{VR}}{n_{ar} + 1} \quad [42]$$

L_{VR} : Longitud de vigas radiales (11,455m).

n_{ar} : Cantidad de arriostres (3).

$$L_b = \frac{11\ 455}{3 + 1} = 2\ 864\ mm$$

Finalmente:

$$L_p < L_b \leq L_r$$

$$1\ 683 < 2\ 864 \leq 4\ 549$$

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right]$$

$$M_n = 1 * \left[67\ 035 - (67\ 035 - 0,7 * 250 * 10^6 * 245,76 * 10^{-6}) \left(\frac{2,864 - 1,683}{4,549 - 1,683} \right) \right]$$

$$M_n = 57\ 134\ N.m$$

Resistencia a flexión admisible.

$$M_a = \frac{M_n}{\Omega_b} \quad [43]$$

M_n : Resistencia nominal en flexión (57 134N.m).

Ω_b : Factor de seguridad por flexión (1,67).

$$M_a = \frac{57\ 134}{1,67} = 34\ 212\ N.m$$

Análisis de pandeo local ala en compresión.

$$M_n = M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad [44]$$

Donde:

M_p : Momento de flexión plástico (67 035N.m).

F_y : Tensión mínima a la fluencia (250MPa).

S_x : Módulo elástico de la sección entorno al eje x (245,76cm³).

λ : Razón ancho-espesor (11,72).

λ_{pf} : Razón ancho-espesor límite para ala compacta (10,75).

λ_{rf} : Razón ancho-espesor límite para ala no compacta (28,28).

$$M_n = 67\,035 - (67\,035 - 0,7 * 250 * 10^6 * 245,76 * 10^{-6}) \left(\frac{11,72 - 10,75}{28,28 - 10,75} \right)$$

$$M_n = 65\,705 \text{ N.m}$$

Resistencia a flexión admisible.

$$M_a = \frac{M_n}{\Omega_b} \quad [45]$$

M_n : Resistencia nominal en flexión (65 705N.m).

Ω_b : Factor de seguridad por flexión (1,67).

$$M_a = \frac{65\,705}{1,67} = 39\,344 \text{ N.m}$$

Análisis de diagrama de momento flector de perfil W10x22.

Viga isostática con carga trapezoidal.

Carga de la viga:

$$C_{vr} = P_V * L_{VR} * 9,81 \quad [46]$$

Donde:

L_{VR} : Longitud de viga (11,455m).

P_V : Peso de viga (32,9kg/m).

$$C_{vr} = 32,9 * 11,455 * 9,81 = 3\,697,09 \text{ N}$$

Carga del techo sobre la viga:

$$C_{tc} = C_{WT} * \frac{A_T}{N_{VR}} \quad [47]$$

Donde:

C_{WT} : Combinación de carga del techo (1,56kPa).

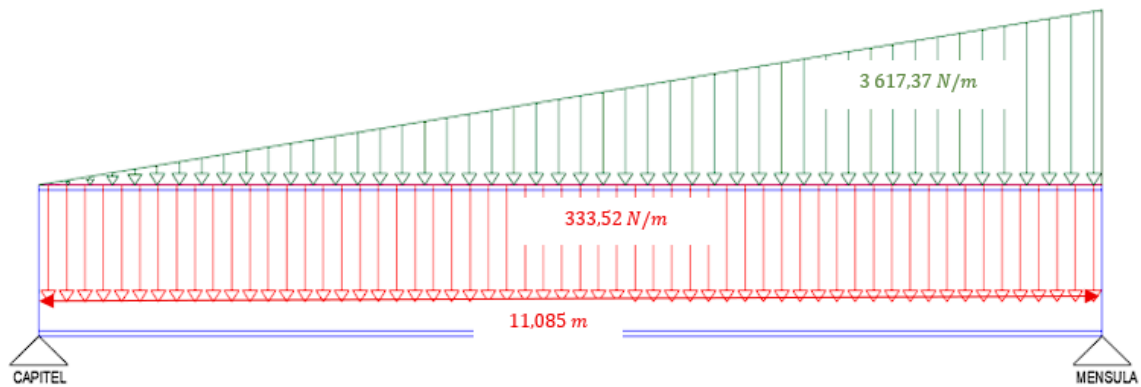
A_T : Área de techo (488,38m²).

N_{VR} : Cantidad de vigas radiales (38).

$$C_{tc} = 1560 * \frac{488,38}{38} = 20\,049,28 \text{ N.m}$$

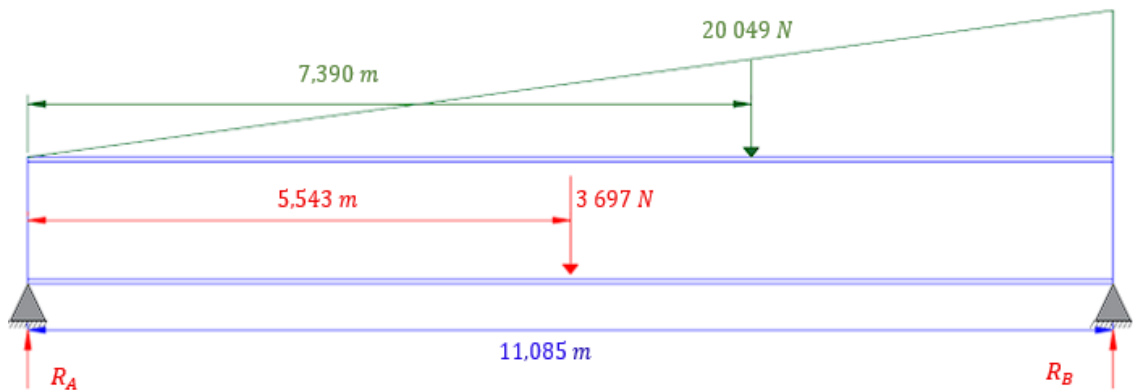
Análisis de viga:

Figura 10. Diagrama de cargas en función de la longitud libre de la viga.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Diagrama de reacciones en los apoyos.



Fuente: Elaboración propia.

$$\uparrow + \sum F_y = 0$$

$$R_A + R_B - 3\,697 - 20\,049 = 0$$

$$R_A + R_B = 23\,746\text{ N}$$

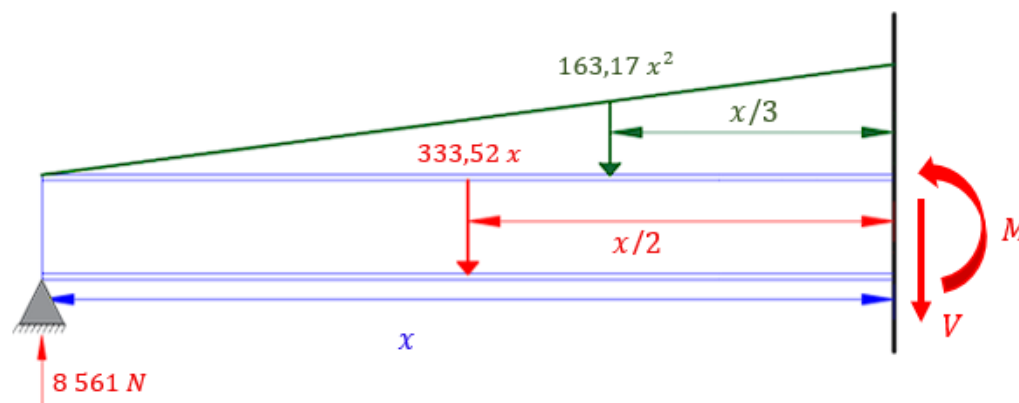
$$\curvearrow + \sum M_A = 0$$

$$R_B * 11,085 - 3\,697 * 5,453 - 20\,049 * 7,390 = 0$$

$$R_B = 15\,185\text{ N}$$

$$R_A = 8\,561\text{ N}$$

Figura 12. Diagrama de fuerza cortante y momento flector.



Fuente: Elaboración propia.

$$M_{(x)} = 8\,561x - 333,52x * \frac{x}{2} - 163,17x^2 * \frac{x}{3} \quad [48]$$

$$M_{(x)} = 8\,561x - 166,76x^2 - 54,39x^3$$

$$V_{(x)} = 8\,561 - 333,52x - 163,17x^2 \quad [49]$$

El momento máximo en una viga isostática simplemente apoyada ocurre cuando la cortante $V_{(x)}$ es cero.

$$V_{(x)} = 0 = 8\,561 - 333,52x - 163,17x^2$$

$$x = -8,34 ; 6,29$$

$$x = 6,29$$

Entonces:

$$M_{max} = 8\,561 * 6,29 - 166,76 * 6,29^2 - 54,39 * 6,29^3$$

$$M_{max} = 33\,716 \text{ N.m}$$

El menor momento de flexión admisible M_a es mayor al momento máximo de la viga M_{max} . $34\,212 \text{ N.m} > 33\,716 \text{ N.m}$.

Coefficiente de esbeltez máximo:

De acuerdo con el punto 5.10.3.2 de API 650: El coeficiente de esbeltez máximo (L/r) no será superior a 300.

$$\frac{L_{VR}}{r_x} \leq 300 \quad [50]$$

Donde:

L_{VR} : Longitud de viga radial (11 455mm).

r_x : Radio de giro en torno al eje x (108,5mm).

$$\frac{11\,455}{108,5} = 106 \leq 300$$

Deflexión máxima:

$$\delta_{max} = \frac{y}{E * I_x} \quad [51]$$

Donde:

δ_{max} : Deflexión máxima (mm).

y : Deflexión.

E : Módulo de elasticidad (200 000MPa).

I_x : Momento de inercia sobre eje x (3 138,19cm⁴).

Método de la doble integración.

Pendiente:

$$\theta = \int M_{(x)} dx = 4\,280,5x^2 - 55,59x^3 - 13,60x^4 + C_1 \quad [52]$$

Deflexión:

$$y = \int \int M_{(x)} dx = 1\,426,83x^3 - 13,90x^4 - 2,72x^5 + C_1x + C_2 \quad [53]$$

Condiciones de frontera:

En los apoyos no existe deflexión.

$$x = 0 ; y = 0$$

$$0 = 1\,426,83 * 0^3 - 13,90 * 0^4 - 2,72 * 0^5 + C_1 * 0 + C_2$$

$$C_2 = 0$$

$$x = 11,085 ; y = 0$$

$$0 = 1\,426,83 * 11,085^3 - 13,90 * 11,085^4 - 2,72 * 11,085^5 + C_1 * 11,085$$

$$C_1 = -115\,323$$

Entonces:

$$\text{Pendiente } \theta = 4\,280,5x^2 - 55,59x^3 - 13,60x^4 - 115\,323$$

$$\text{Deflexión } y = 1\,426,83x^3 - 13,90x^4 - 2,72x^5 - 115\,323x$$

La deflexión máxima ocurre en el punto donde la pendiente θ es 0.

$$\theta = 0 = 4\,280,5x^2 - 55,59x^3 - 13,60x^4 - 115\,323$$

$$x = -19,25 ; -5,24 ; 5,73 ; 14,68$$

$$x = 5,73$$

Entonces:

$$y = 1\,426,83 * 5,73^3 - 13,90 * 5,73^4 - 2,72 * 5,73^5 - 115\,323 * 5,73$$

$$y = -424\,153$$

Finalmente:

$$\delta_{max} = \frac{-424\,153}{200\,000 * 10^6 * 3\,138,19 * 10^{-8}} = -0,068 \text{ m}$$

$$\delta_{max} = -68 \text{ mm}$$

La deflexión máxima permisible:

$$\frac{L_{VR}}{120} = \frac{11\,455}{120} = 95\,mm > \delta_{max}$$

$$95\,mm > 68\,mm$$

- Peso total de vigas radiales.

$$P_{VR} = L_{VR} * P_V * N_{VR} \quad [54]$$

Donde:

P_{VR} : Peso total de vigas radiales (kg).

L_{VR} : Longitud de viga radial (11,455m).

P_V : Peso de viga (32,9kg/m).

N_{VR} : Cantidad de vigas radiales (38).

$$P_{VR} = 11,455 * 32,9 * 38 = 14\,321,04\,kg$$

- Carga total de vigas radiales.

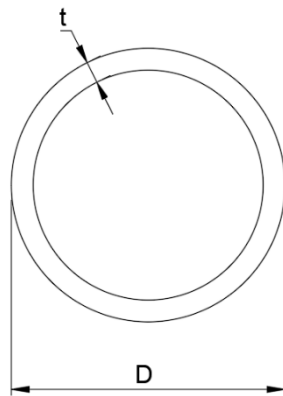
$$W_{VR} = P_{VR} * 9,81 \quad [55]$$

$$W_{VR} = 14\,321,04 * 9,81 = 140\,489\,N$$

Columna Central

- Propiedades de material ASTM A53 Grado B.
 - Módulo de elasticidad E : 200 000MPa.
 - Tensión mínima a la fluencia F_y : 240Mpa.
 - Resistencia a la tracción mínima F_u : 415MPa.
- Dimensiones y propiedades de tubería 14”.

Figura 13. Dimensiones y propiedades de tubería 14”, sch.40



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Dimensiones y propiedades de la tubería 14”, sch.40, en SI y margen de corrosión de 1,5mm.

Descripción	Variable	Valor	Corroído	Unidad
Peso	P_{Tub}	94,29	68,81	kg/m
Área	A	12 013	8 766	mm ²
Radio de giro en torno al eje x	r_x	121,86	121,83	mm
Radio de giro en torno al eje y	r_y	121,86	121,83	mm
Espesor	t_{tub}	11,1	8,1	cm ⁶
Diámetro interior	D_{int}	333,4	333,4	mm
Diámetro exterior	D_{ext}	355,6	352,6	mm

Fuente: Elaboración propia.

- Clasificación de la sección.

Elemento atiesado, caso 9, Tabla B4.1b: Elementos en compresión. Miembros sometidos a flexión.

Razón ancho-espesor: Se determina con los valores corroídos.

$$\frac{D_{ext}}{t_{tub}}$$

[56]

$$\frac{D_{ext}}{t_{tub}} = \frac{352,6}{8,1} = 43,53$$

$$\lambda_{tub} = 0,11 * \frac{E}{F_y} \quad [57]$$

$$\lambda_{tub} = 0,11 * \frac{2 * 10^5}{240} = 91,67$$

Si:

$$\frac{D_{ext}}{t_{tub}} < \lambda_{tub} , \text{ Sección no esbelta.}$$

$$\frac{D_{ext}}{t_{tub}} > \lambda_{tub} , \text{ Sección esbelta.}$$

43,53 < 91,67 , Tubería no esbelta.

- Diseño de tubería 14”, sch.40.

La tubería está sometido a esfuerzo de compresión, esto debido a la carga del techo y el peso de la estructura.

De acuerdo al capítulo E “Diseño de miembros en compresión”, Tabla E1.1, se aplica la sección E.7 “Miembros con elementos esbeltos”.

Resistencia de compresión nominal.

$$P_n = F_{cr} A_e \quad [58]$$

Donde:

P_n : Resistencia de compresión nominal (N).

F_{cr} : Tensión crítica (MPa).

A_e : Área efectiva (8 766mm²).

Si:

$$\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25 , F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e} \right) F_y \quad [59]$$

$$\frac{F_y}{F_e} > 2,25 , F_{cr} = 0,877 F_e \quad [60]$$

F_y : Tensión mínima a la fluencia (240MPa).

F_e : Tensión de pandeo elástico (MPa).

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r_T}\right)^2} \quad [61]$$

E : Módulo de elasticidad (200 000MPa).

K : Factor de longitud efectiva (1).

L_{Tub} : Longitud de tubería (13,558 m).

r_{Tub} : Radio de giro (121,83mm).

$$F_e = \frac{\pi^2 * 2 * 10^5}{\left(\frac{1 * 13\,588}{121,83}\right)^2} = 158,68 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{240}{158,68} = 1,51 \leq 2,25$$

$$F_{cr} = (0,658^{1,51}) * 240 = 127,57 \text{ MPa}$$

Finalmente:

$$P_n = 127,57 * 8\,766 = 1\,118\,190 \text{ N}$$

Resistencia de compresión admisible:

$$P_a = \frac{P_n}{\Omega_b} \quad [62]$$

P_n : Resistencia de compresión nominal (1 118 190N).

Ω_b : Factor de seguridad por compresión (1,67).

$$P_a = \frac{1\,118\,190}{1,67} = 669\,574 \text{ N}$$

Peso total de tubería:

$$P_{TTub} = P_{Tub} * L_{Tub} \quad [63]$$

Donde:

P_{TTub} : Peso total de tubería (kg).

P_{Tub} : Peso de tubería por metro (94,29 kg/m).

L_{Tub} : Longitud de tubería (13,558m).

$$P_{TTub} = 94,29 * 13,588 = 1\ 281,21\ kg$$

Carga total de tubería 14”:

$$P_{TTub} = P_{Tub} * L_{Tub} \quad [64]$$

$$W_{TTub} = 1\ 281,21 * 9,81 = 12\ 569\ N$$

Verificación de la resistencia de compresión de la tubería 14”.

La resistencia de compresión admisible P_a deberá ser mayor a la carga transmitida a la tubería. Incluido el peso de la tubería 14”.

$$P_a > W_{CT} \quad [65]$$

Donde:

P_a : Resistencia a compresión admisible (669 574N).

W_{CT} : Carga transmitida a la tubería (N).

$$W_{CT} = W_{TTub} + W_{TCap} \quad [66]$$

W_{TTub} : Carga total de tubería 14” (12 569N).

W_{TCap} : Carga total en capitel.

$$W_{TCap} = R_A * N_{VR} \quad [67]$$

R_A : Reacción del apoyo A del capitel (8 561N).

N_{VR} : Cantidad de vigas radiales (38).

$$W_{TCap} = 8561 * 38 = 325\ 318\ N$$

Entonces:

$$W_{CT} = 12\ 569 + 325\ 318$$

$$W_{CT} = 337\ 877\ N$$

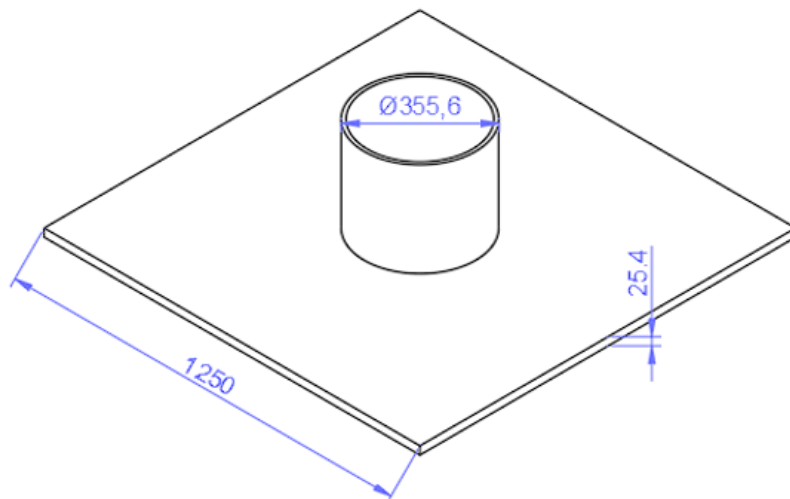
La tubería 14” soporta la carga transmitida por el techo y vigas radiales.

$$669\ 574\ N > 337\ 877\ N$$

Placa base.

- Propiedades de material ASTM A36.
 - Módulo de elasticidad E : 200 000MPa.
 - Tensión mínima a la fluencia F_y : 250Mpa.
 - Resistencia a la tracción mínima F_u : 400MPa.
- Dimensiones de placa base.

Figura 14. Dimensiones de placa base.



Fuente: Elaboración propia.

La placa base soporta la carga transmitida de la tubería 14", techo y vigas.

Espesor de placa base.

$$t_{req} = \ell \sqrt{\frac{3,33P_a}{F_y b_i n_i}} \quad [68]$$

Donde:

t_{req} : Espesor requerido de placa base (mm).

ℓ : Distancia máxima de (m, n o n').

P_a : Esfuerzo transmitido a la placa (N).

F_y : Tensión mínima de fluencia (250MPa).

b_i : Distancia voladizo de la placa base en el eje x (mm).

n_i : Distancia voladizo de la placa base en el eje y (mm).

Esfuerzo transmitido a la placa base P_a :

$$P_a = W_{CT}$$

W_{CT} : Carga transmitida a la tubería 14" (337 877N).

$$P_a = 337\,877\,N$$

Distancia voladizo de la placa base en el eje x, y :

De acuerdo al manual del AISC, el momento máximo en una placa ocurre a distancia de 0,80 de la columna. Para una sección circular la distancia es 0,80 de su diámetro exterior.

$$n_i = b_i = \frac{L_{pb} - 0,8d_o}{2} \quad [69]$$

L_{pb} : Longitud de la placa base (1 250mm).

d_o : Diámetro exterior de tubería 14" (355,6mm).

$$n_i = b_i = \frac{1\,250 - 0,8 * 355,6}{2} = 483\,mm$$

Distancia máxima ℓ :

$$m = n = \frac{b_i - 0,8d_o}{2} \quad [70]$$

$$m = n = \frac{483 - 0,8 * 355,6}{2} = 99,26\,mm$$

$$n' = \frac{\sqrt{d_o^2}}{4} \quad [71]$$

$$n' = \frac{355,6}{4} = 88,9\,mm$$

$$\ell = 99,26\,mm$$

Entonces:

$$t_{req} = 99,26 \sqrt{\frac{3,33 * 337\ 877}{250 * 483 * 483}} = 13,79\ mm$$

El espesor de la placa base es mayor al espesor requerido $25,4\ mm > 13,79\ mm$.

Anillo de refuerzo superior.

De acuerdo con el punto 5.10.2.6 de API 650, para un techo con junta frágil, la sección transversal de los elementos participantes en la junta techo-cuerpo será menor a:

$$A_{AR} = \frac{D_{LS}}{2\pi F_y \text{Tan}\alpha} \quad [72]$$

Donde:

A_{AR} : Sección transversal de anillo de refuerzo superior (mm^2).

D_{LS} : Carga del cilindro (N).

F_y : Tensión mínima de fluencia (250MPa).

α : Ángulo de techo pendiente 1/16 ($3,58^\circ$).

$$D_{LS} = W_{TC}$$

W_{TC} : Carga total del cilindro (681 754N).

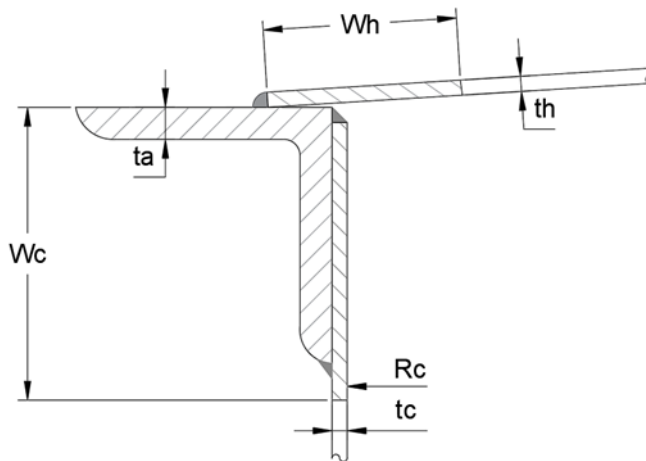
$$D_{LS} = 681\ 754\ N$$

Entonces:

$$A_{AR} = \frac{681\ 754}{2 * \pi * 250 * \text{Tan}(3,58)} = 6\ 937\ \text{mm}^2$$

Sección transversal de elementos participantes:

Figura 15. Dimensiones de la junta frágil.



Fuente: API, 2021.

$$A_{EP} = S_{CP} + S_{TP} + S_{PL} \quad [73]$$

Donde:

A_{EP} : Sección de elementos participantes (mm^2).

S_{CP} : Sección transversal del cilindro participante (mm^2).

S_{TP} : Sección transversal del techo participante (mm^2).

S_{PL} : Sección del perfil L (mm^2).

Cilindro participante:

$$W_c = 0,6 (R_c t_c)^{\frac{1}{2}} \quad [74]$$

W_c : Ancho máximo del cilindro participante (mm).

R_c : Radio interior del tanque ($r = 12\,425\text{mm}$).

t_c : Espesor de anillo superior ($E_{a6} = 6\text{mm}$).

$$W_c = 0,6 (12\,425 * 6)^{\frac{1}{2}} = 164 \text{ mm}$$

Sección transversal del cilindro participante:

$$S_{CP} = W_c * t_c \quad [75]$$

$$S_{CP} = 164 * 6 = 984 \text{ mm}^2$$

Techo participante:

$$W_h = 0,3 (R_2 t_h)^{\frac{1}{2}} \leq 300 \text{mm} \quad [76]$$

W_h : Ancho máximo del techo participante (mm).

R_2 : Longitud normal del techo (mm).

t_h : Espesor del techo (6mm).

$$R_2 = \frac{R_c}{\text{sen} \alpha} \quad [77]$$

R_c : Radio interior del tanque ($r = 12\,425 \text{mm}$).

α : Ángulo de techo pendiente 1/16 ($3,58^\circ$).

$$R_2 = \frac{12\,425}{\text{sen}(3,58^\circ)} = 198\,984 \text{mm}$$

$$W_h = 0,3 (198\,984 * 6)^{\frac{1}{2}} \leq 300 \text{ mm}$$

$$W_h = 328 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm}$$

$$W_h = 300 \text{ mm}$$

Sección transversal del techo participante:

$$S_{TP} = W_h * t_h \quad [78]$$

$$S_{TP} = 300 * 6 = 1\,800 \text{ mm}^2$$

Sección del Perfil L 100mmx100mmx12.5mm:

$$S_{PL} = 2\,419,35 \text{ mm}^2$$

Entonces:

$$A_{EP} = 984 + 1\,800 + 2419 = 5\,203 \text{ mm}^2$$

La sección transversal total de elementos participantes es menor a la sección transversal de anillo de refuerzo superior.

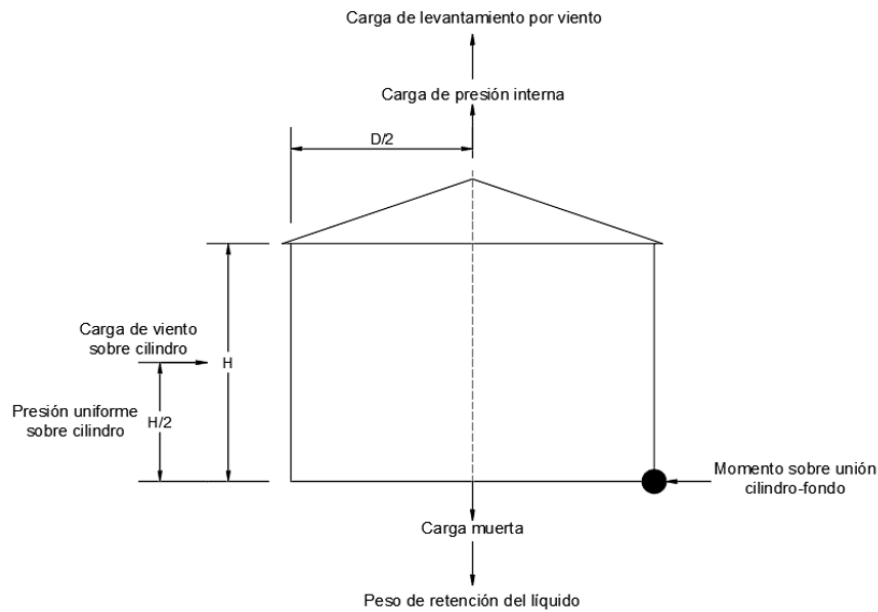
$$A_{EP} < A_{AR}$$

$$5\,203 \text{ mm}^2 < 6\,937 \text{ mm}^2$$

4.2.4. Estabilidad estructural.

Resistencia a cargas de viento (estabilidad al vuelco).

Figura 16. Comprobación de vuelco para depósitos autoanclados.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el punto 5.11.2.2, los tanques auto anclados con techos cónicos soportados deben de cumplir con:

$$W_{WS} + F_P(M_{Pi}) < \frac{M_{DL}}{1,5} + M_{DLR} \quad [79]$$

Donde:

W_{WS} : Momento de vuelco sobre unión del cilindro con el fondo debido a la presión horizontal del viento (N.m).

F_P : Factor de combinación de presiones (0,4).

M_{Pi} : Momento en torno a la junta entre el cilindro y el fondo a partir de la presión interna de diseño (N.m).

M_{DL} : Momento en torno a la unión del cilindro con el fondo procedente del peso nominal del cilindro y la estructura del techo soportado que no está unida a las planchas de techo (N.m).

M_{DLR} : Momento sobre la junta de cilindro con el fondo debido al peso nominal de la placa del techo (N.m).

$$W_{WS} = P_{WS} * A_s * X_s \quad [80]$$

P_{WS} : Presión del viento sobre el cilindro (kPa).

A_s : Área proyectada vertical total del cilindro (m²).

X_s : Brazo de momento de fuerza del viento sobre el cilindro (m).

$$P_{WS} = 0,89 \left(\frac{V}{190} \right)^2 \quad [81]$$

V : Velocidad del viento en ráfagas de 3 segundos.

De acuerdo a la norma de cargas E.020, la velocidad de diseño del viento no deberá ser menor a 75Km/h.

$$V = V_d * \sqrt{I} \quad [82]$$

I : Factor de importancia del viento (1,2).

$$V = 75 * \sqrt{1,2} = 82,16 \text{ Km/h}$$

$$P_{WS} = 0,89 \left(\frac{82,16}{190} \right)^2 = 0,166 \text{ Kpa}$$

$$A_s = D * A_T \quad [83]$$

D : Diámetro del tanque (24,85m).

A_T : Altura del tanque (13,10m).

$$A_s = 24,85 * 13,10 = 325,535 \text{ m}^2$$

$$X_s = \frac{A_T}{2} \quad [84]$$

A_T : Altura del tanque (13,10m).

$$X_s = \frac{13,10}{2} = 6,55 \text{ m}$$

Entonces:

$$W_{WS} = 166 * 325,535 * 6,55 = 353 \ 954 \text{ N.m}$$

$$M_{Pi} = P_g * A_h * X_w \quad [85]$$

P_g : Presión interna de diseño (0,5kPa).

A_h : Área proyectada horizontal total del techo (m²).

X_w : Brazo de momento de fuerza del viento sobre el techo (m).

$$A_h = \frac{\pi}{4} D^2 \quad [86]$$

D : Diámetro del tanque (24,85m).

$$A_h = \frac{\pi}{4} 24,85^2 = 485 \text{ m}^2$$

$$X_w = \frac{D}{2} \quad [87]$$

D : Diámetro del tanque (24,85m).

$$X_w = \frac{24,85}{2} = 12,425 \text{ m}$$

Entonces:

$$M_{Pi} = 500 * 485 * 12,425 = 3\ 013\ 063 \text{ N.m}$$

$$M_{DL} = \frac{D}{2} D_{LS} \quad [88]$$

D : Diámetro del tanque (24,85m).

D_{LS} : Carga del cilindro (681 754N).

$$M_{DL} = \frac{24,85}{2} * 681\ 754 = 8\ 470\ 793 \text{ N.m}$$

$$M_{DLR} = \frac{D}{2} D_{DLR} \quad [89]$$

D : Diámetro del tanque (24,85m).

D_{DLR} : Carga del techo (N).

$$D_{DLR} = W_{TT}$$

W_{TT} : Carga del techo (225 656N).

$$D_{DLR} = 225\ 656 \text{ N}$$

$$M_{DLR} = \frac{24,85}{2} * 225\ 656 = 2\ 803\ 776 \text{ N.m}$$

Finalmente, se cumple que:

$$W_{WS} + F_P(M_{Pi}) < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR}$$

$$353\ 954 + 0.4 * (3\ 013\ 063) < \frac{8\ 470\ 793}{1,5} + 2\ 803\ 776$$

$$1\ 559\ 179\ N.m < 8\ 450\ 971\ N.m$$

El tanque es estable y no requiere anclaje debido al viento.

Resistencia a cargas de sismo.

De acuerdo a la Tabla E.6, “Criterios de relación de anclaje”.

Si:

$J \leq 0,785$, No existe levantamiento debido al momento de volcamiento sísmico.

El tanque se considera auto anclado.

$0,785 < J \leq 1,54$, El tanque se levanta, pero es estable para las cargas de diseño.

Se cumplen con los requisitos de compresión sobre el cilindro. El tanque se considera auto anclado.

$J > 1,54$, El tanque no es estable y no puede ser auto anclado para la carga de diseño.

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2[w_t(1 - 0,4A_v) + w_a - F_P w_{int}]} \quad [90]$$

Donde:

J : Relación de anclaje.

M_{rw} : Momento en anillo de fundación (N.m)

D : Diámetro del tanque (24,85m).

w_t : Peso del tanque y el techo actuando en la base del cilindro del tanque (N/m).

A_v : Parámetro de aceleración sísmica vertical.

w_a : Fuerza resistente al levantamiento en la región anular (N/m).

F_P : Relación entre la presión de funcionamiento normal y la presión de diseño (0,4).

w_{int} : Carga de levantamiento de diseño debida a la presión del producto por unidad de longitud circunferencial (N/m).

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + [A_c(W_c X_c)]^2} \quad [91]$$

A_i : Coeficiente de aceleración del espectro de respuesta de diseño impulsivo (% g).

W_i : Porción impulsiva efectiva del peso del líquido (N).

X_i : Altura desde el fondo del cilindro del tanque hasta el centro de acción de la fuerza sísmica lateral (m).

W_s : Peso total del cuerpo (N).

X_s : Altura desde el fondo del cilindro del tanque hasta el centro de gravedad del cilindro (m).

W_r : Peso total del techo incluido estructura de soporte. (N).

X_r : Altura desde el fondo del cilindro del tanque hasta el techo (m).

A_c : Parámetro de aceleración del espectro de respuesta de diseño convectivo (% g).

W_c : Porción convectiva efectiva (chapoteo) del peso del líquido (N).

X_c : Altura desde el fondo del cilindro del tanque hasta el centro de gravedad del cilindro (m).

A_i

$$A_i = S_{DS} \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) \quad [92]$$

S_{DS} : Parámetro de aceleración de respuesta espectral de diseño, amortiguado al 5% en periodos cortos ($T=0,2$ segundos).

I : Factor de importancia, grupo de uso sísmico II (1,25).

R_{wi} : Factor de reducción de fuerza para el modo impulsivo.

$$S_{DS} = Q F_a S_S \quad [93]$$

Q : Factor de escala de aceleraciones espectrales del nivel del diseño (1).

S_S : Parámetro de aceleración de respuesta espectral en periodos cortos (0,2 segundos).

F_a : Coeficiente del sitio basado en la aceleración en un periodo de 0,2 segundos.

$$S_S = 2,5 S_P \quad [94]$$

S_P : Aceleración máxima del suelo (Z).

De acuerdo a la ubicación geográfica de la Refinería Iquitos, que es zona 1, Z tiene un valor de 0,10.

$$S_S = 2,5 * Z$$

$$S_S = 2,5 * 0,10 = 0,25$$

De acuerdo al estudio de mecánica de suelos, el perfil del suelo es Tipo S₃: Suelos Blandos. Suelo flexible con velocidad de propagación de onda de corte \bar{V}_S menor o igual a 180m/s.

El valor de F_a se obtiene de la tabla E.1 “Valores de F_a en función a la clase de sitio”. Para ello se define la clase de sitio E.

Con un valor de $S_S \leq 0,25$ y Clase de Sitio E, el valor de F_a es 2,5.

Entonces:

$$S_{DS} = QF_aS_S = 1 * 2,5 * 0,25 = 0,625$$

De acuerdo a la tabla E.4 “Factores para modificación de respuesta para el método ASD”, para un tanque auto anclado $R_{wi}=3,5$.

Valor de A_i :

$$A_i = 0,625 \left(\frac{1,25}{3,5} \right) = 0,223$$

W_i

Si: $\frac{D}{H_d} > 1,333$

$$W_i = \frac{Tangh(0,866 \frac{D}{H_d})}{0,866 \frac{D}{H_d}} W_P \quad [95]$$

D : Diámetro del tanque (24,85m).

H_d : Altura de diseño del líquido (12,6m).

W_P : Peso total del contenido del tanque (N).

$$\frac{24,85}{12,6} = 1,97 > 1,333$$

$$W_P = V_{liq} * 9\ 810 \quad [96]$$

V_{liq} : Volumen del líquido (agua).

$$W_p = \frac{\pi}{4} * D^2 * H_d * 9\,810 \quad [97]$$

$$W_p = \frac{\pi}{4} * 24,85^2 * 12,6 * 9\,810 = 59\,949\,038N$$

Valor de W_i :

$$W_i = \frac{Tangh(0,866 * \frac{24,85}{12,6})}{0,866 * \frac{24,85}{12,6}} * 59\,949\,038 = 32\,853\,703\,N$$

X_i

$$\text{Si: } \frac{D}{H_d} > 1,333$$

$$X_i = 0,375H_d \quad [98]$$

$$\frac{24,85}{12,6} = 1,97 > 1,333$$

$$X_i = 0,375 * 12,6 = 4,73\,m$$

W_s

$$W_s = W_{TC}$$

W_{TC} : Carga total del Cilindro (681 754N).

$$W_s = 681\,754\,N$$

X_s

$$X_s = 0,45 * H_d \quad [99]$$

$$X_s = 0,45 * 12,6 = 5,67m$$

W_r

$$W_r = W_{TT} + W_{VR} \quad [100]$$

W_{TT} : Carga total de techo (225 656N)

W_{VR} : Carga total de vigas radiales (140 489N)

$$W_r = 225\,656 + 140\,489 = 366\,145\,N$$

X_r

$$X_r = A_T + A_{CGT} \quad [101]$$

A_T : Altura del tanque (13,10m).

A_{CGT} : Altura desde la parte superior del tanque hasta el centro de gravedad del techo (m).

$$A_{CGT} = \frac{D}{8} \text{Tang}(\alpha) \quad [102]$$

α : Ángulo del techo (3,58).

D : Diámetro del tanque (24,85m).

$$A_{CGT} = \frac{24,85}{8} \text{Tang}(3,58) = 0,194 \text{ m}$$

$$X_r = 13,10 + 0,194 = 13,29 \text{ m}$$

A_c

Si: $T_c > T_L$

$$A_c = K S_{D1} \left(\frac{T_L}{T_c} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \quad [103]$$

K : Coeficiente para ajustar la aceleración espectral de 5% al 0.5% de amortiguación (1,5).

S_{D1} : Parámetro de aceleración de respuesta espectral de diseño amortiguado al 5%.

T_L : Periodo de transición para un periodo más largo (4 segundos).

T_c : Periodo natural del modo de comportamiento convectivo del líquido (segundos).

I : Factor de importancia, grupo de uso sísmico II (1,25).

R_{wc} : Factor de reducción de fuerza para el modo convectivo.

$$S_{D1} = Q F_v S_1 \quad [104]$$

Q : Factor de escala de aceleraciones espectrales del nivel del diseño (1).

S_1 : Parámetro de aceleración de respuesta espectral (1 segundo).

F_v : Coeficiente del sitio basado en la velocidad en un periodo de 1 segundo.

$$S_1 = 1,25 S_p \quad [105]$$

S_p : Aceleración máxima del suelo ($Z=0,10$).

$$S_1 = 1,25 * 0,10 = 0,125$$

El valor de F_v se obtiene de la tabla E.2 “Valores de F_v en función a la clase de sitio”. Para ello se define la clase de sitio E.

Con un valor de $S_1 = 0,125$ y Clase de Sitio E, el valor de F_v es 3,42.

Entonces:

$$S_{D1} = QF_v S_1 = 1 * 3,42 * 0,125 = 0,428$$

$$T_c = 1,8K_s \sqrt{D} \quad [106]$$

K_s : Coeficiente de periodo de chapoteo.

D : Diámetro del tanque (24,85m).

$$K_s = \frac{0,578}{\sqrt{\text{Tangh}\left(\frac{3,68H_d}{D}\right)}} \quad [107]$$

H_d : Altura de diseño del líquido (12,6m).

$$K_s = \frac{0,578}{\sqrt{\text{Tangh}\left(\frac{3,68 * 12,6}{24,85}\right)}} = 0,592$$

Entonces:

$$T_c = 1,8 * 0,592 * \sqrt{24,85} = 5,312 > T_L$$

De acuerdo a la tabla E.4 “Factores para modificación de respuesta para el método ASD”, para un tanque autoanclado $R_{wc}=2$.

Valor de A_c :

$$A_c = 1,5 * 0,428 * \left(\frac{4}{5,312^2}\right) \left(\frac{1,25}{2}\right) = 0,06$$

W_c

$$W_c = 0,230 \frac{D}{H_d} \text{Tangh}\left(\frac{3,67H_d}{D}\right) W_P \quad [108]$$

D : Diámetro del tanque (24,85m).

H_d : Altura de diseño del líquido (12,6m).

W_P : Peso total del contenido del tanque (59 949 038N).

$$W_c = 0,230 * \frac{24,85}{12,6} * Tangh\left(\frac{3,67 * 12,6}{24,85}\right) * 59\ 949\ 038$$

$$W_c = 25\ 915\ 453\ N$$

X_c

$$X_c = \left[1,0 - \frac{\cosh\left(\frac{3,67H_d}{D}\right) - 1}{\frac{3,67H_d}{D} * \sinh\left(\frac{3,67H_d}{D}\right)} \right] H_d \quad [109]$$

D: Diámetro del tanque (24,85m).

H_d : Altura de diseño del líquido (12,6m).

$$X_c = \left[1,0 - \frac{\cosh\left(\frac{3,67 * 12,6}{24,85}\right) - 1}{\frac{3,67 * 12,6}{24,85} * \sinh\left(\frac{3,67 * 12,6}{24,85}\right)} \right] * 12,6$$

$$X_c = 7,65\ m$$

Resumen:

$$A_i = 0,223$$

$$W_i = 32\ 853\ 703\ N$$

$$X_i = 4,73\ m$$

$$W_s = 681\ 754\ N$$

$$X_s = 5,67\ m$$

$$W_r = 366\ 145\ N$$

$$X_r = 13,29\ m$$

$$A_c = 0,06$$

$$W_c = 25\ 915\ 453\ N$$

$$X_c = 7,65\ m$$

Finalmente, el valor de M_{rw} :

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + [A_c(W_c X_c)]^2}$$

$$M_{rw} = 38\ 485\ 658\ N.m$$

$$w_t = \left[\frac{W_{TC}}{\pi D} + w_{rs} \right] \quad [110]$$

W_{TC} : Carga total del Cilindro (681 754N).

D : Diámetro del tanque (24,85m).

w_{rs} : Carga del techo que actúa sobre el cuerpo.

$$w_{rs} = \frac{W_{TT}}{\pi D} \quad [111]$$

W_{TT} : Carga total de techo (225 656N).

$$w_{rs} = \frac{225\ 656}{\pi * 24,85} = 2\ 890\ N/m$$

Entonces:

$$w_t = \left[\frac{681\ 754}{\pi * 24,85} + 2\ 890 \right] = 11\ 623\ N/m$$

$$A_v = \frac{2}{3} * 0,7 * S_{DS} \quad [112]$$

S_{DS} : Parámetro de aceleración de respuesta espectral de diseño, amortiguado al 5% en periodos cortos (T=0,2 segundos) (0,625).

$$A_v = \frac{2}{3} * 0,7 * 0,625 = 0,292$$

$$w_a = 99E_{LF} \sqrt{F_y H_d G_e} \leq 201,1 H_d D G_e \quad [113]$$

E_{LF} : Espesor de láminas de fondo (9,5mm).

D : Diámetro del tanque (24,85m).

H_d : Altura de diseño del líquido (12,6m).

F_y : Tensión mínima a la fluencia (250MPa).

G_e : Gravedad específica efectiva.

$$G_e = G(1 - 0,4A_v) \quad [114]$$

G : Gravedad específica de diseño (1).

A_v : Parámetro de aceleración sísmica vertical (0,292).

$$G_e = 1 * (1 - 0,4 * 0,292) = 0,883$$

Entonces:

$$w_a = 99 * 9,5 \sqrt{250 * 12,6 * 0,883} \leq 201,1 * 12,6 * 24,85 * 0,883$$

$$w_a = 49\,601 \leq 55\,599$$

$$w_a = 49\,601 \text{ N/m}$$

$$w_{int} = P_g * \frac{\pi * \frac{D^2}{4}}{\pi * D} \quad [115]$$

P_g : Presión interna de diseño (0,5kPa).

D : Diámetro del tanque (24,85m).

$$w_{int} = 500 * \frac{\pi * \frac{24,85^2}{4}}{\pi * 24,85} = 3\,106 \text{ N/m}$$

Resumen:

$$M_{rw} = 38\,485\,658 \text{ N.m}$$

$$D = 24,85 \text{ m}$$

$$w_t = 11\,623 \text{ N/m}$$

$$A_v = 0,292$$

$$w_a = 49\,601 \text{ N/m}$$

$$F_p = 0,4$$

$$w_{int} = 3\,106 \text{ N/m}$$

Finalmente, el valor de J :

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2 [w_t (1 - 0,4A_v) + w_a - F_p w_{int}]}$$

$$J = 1,06 \leq 1,54$$

El tanque es estable y no requiere anclaje.

4.2.5. Ventilación del tanque.

El tanque durante el proceso de carga y descarga del líquido (agua) genera sobrepresión y vacío respectivamente.

De acuerdo al API 2000, los requisitos de venteo para las condiciones aplicables al tanque de almacenamiento de agua contra incendio son:

- Ingreso de aire normal resultante de una salida máxima del líquido (efecto de transferencia del líquido).
- Ingreso de aire normal resultante de la contracción o condensación de vapores causadas por la disminución máxima de la temperatura del espacio de vapor (efecto térmico).
- Salida de aire normal resultante de una entrada máxima de líquido al tanque y la máxima vaporización causada por dicha entrada (efectos de transferencia de líquido).
- Salida de aire normal resultante de la expansión y vaporización resultantes de un aumento máximo de la temperatura del espacio de vapor (efectos térmicos).

Requisitos de ventilación para ingreso de aire.

$$V_i = V_{in} + V_{it} \quad [116]$$

Donde:

V_{in} : Volumen de ingreso de aire efecto de transferencia de líquido (m^3/h).

V_{it} : Volumen de ingreso de aire efecto térmico (m^3/h).

$$V_{in} = V_{des}$$

V_{des} : Caudal máximo de descarga ($1\ 703\ m^3/h$).

$$V_{in} = 1\ 703\ m^3/h$$

$$V_{it} = C * V_{tq}^{0,7} * R_i \quad [117]$$

C : Factor que depende de la presión de vapor, temperatura y latitud, Tabla 2 (6,5).

V_{tq} : Capacidad del tanque ($6\ 111,00\ m^3$).

R_i : Factor de reducción para aislamiento (1).

$$V_{it} = 6,5 * 6\ 111^{0,7} * 1 = 2\ 905\ m^3/h$$

Entonces:

$$V_i = 1\ 703 + 2\ 905 = 4\ 608\ m^3/h$$

Requisitos de ventilación para salida de aire.

$$V_s = V_{sn} + V_{st} \quad [118]$$

Donde:

V_{sn} : Volumen de salida de aire por efecto de transferencia de líquido (m^3/h).

V_{st} : Volumen de salida de aire por efecto térmico (m^3/h).

$$V_{sn} = V_{car}$$

V_{car} : Caudal máximo de carga ($227m^3/h$).

$$V_{sn} = 227 \text{ m}^3/h$$

$$V_{st} = Y * V_{tq}^{0,9} * R_i \quad [119]$$

Y : Factor de latitud, tabla 1 (0,32).

V_{tq} : Capacidad del tanque ($6\ 111,00m^3$).

R_i : Factor de reducción para aislamiento (1).

$$V_{st} = 0,32 * 6\ 111^{0,9} * 1 = 818 \text{ m}^3/h$$

Entonces:

$$V_s = 227 + 818 = 1\ 045 \text{ m}^3/h$$

Diámetro de boquilla para ventilación del tanque.

De acuerdo a lo indicado en el apartado A.22.7.3.10.4 de la norma NFPA 30, el área de la boquilla de ventilación es:

$$A = \frac{CFH}{1667 * C_f * \sqrt{P_t - P_a}} \quad [120]$$

Donde:

A : Área de la boquilla de ventilación ($pulg^2$).

CFH : Requisitos de ventilación (pie^3/h).

$$CFH = V_i = 4\ 608 \text{ m}^3/h = 162\ 931 \text{ ft}^3/h$$

C_f : Coeficiente de flujo (0,5).

P_a : Presión absoluta atmosférica fuera del tanque (pulg de agua).

Presión atmosférica promedio = $753,91mmHg = 403,2 \text{ pulg}H_2O$

P_t : Presión absoluta dentro del tanque (pulg de agua).

Presión interna de diseño = $0.5kPa = 2 \text{ pulg}H_2O$

$P_t = 403,2 + 2 = 405,2 \text{ pulg}H_2O$

Entonces:

$$A = \frac{162\,931}{1667 * 0,5 * \sqrt{405,2 - 403,2}} = 138,22 \text{ pulg}^2$$

Diámetro de la boquilla de ventilación:

$$D_v = \sqrt{\frac{A * 4}{\pi}} \quad [121]$$

$$D_v = \sqrt{\frac{138,22 * 4}{\pi}} = 13,26 \text{ pulg}$$

El diámetro de boquilla de ventilación del tanque de agua es 16 pulgadas.

4.3. Contrastación de hipótesis.

La tesis contrasta la hipótesis utilizando un enfoque de ingeniería aplicada, que se puede desglosar de la siguiente manera:

Diagnóstico del problema: Se confirma la necesidad del proyecto al identificar el déficit de capacidad en los tanques existentes. Esto establece la "línea base" contra la cual se medirá el éxito del diseño.

Cálculo y dimensionamiento: Se aplican principios de la hidrostática y normativas como la API 650 para calcular las dimensiones del nuevo tanque. Los cálculos determinan que el diseño propuesto tiene una capacidad neta de $6\,111,00 \text{ m}^3$, que es el valor esperado para cumplir con los requerimientos del sistema. Este resultado demuestra que el diseño es capaz de aumentar la capacidad.

Validación técnica: La viabilidad del diseño se valida a través de la simulación por elementos finitos (FEA). Esta "prueba virtual" demuestra que el diseño es

estructuralmente seguro y capaz de soportar las cargas operativas, lo que confirma que el proyecto es factible para su implementación.

Por lo que la hipótesis es aceptada. Los resultados del proyecto demuestran que el diseño propuesto cumple con los objetivos establecidos:

El diseño del tanque genera una solución viable y segura.

La solución logra un aumento significativo en la capacidad de almacenamiento, pasando de un estado deficiente a una capacidad de 6 111,00 m³.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Pruebas de validación.

Esta prueba de validación no se refiere a experimentos de laboratorio tradicionales, sino a un enfoque de ingeniería que incluye la verificación manual y, crucialmente, la simulación computacional. La validación del diseño del tanque de agua se llevó a cabo principalmente a través del análisis por elementos finitos (FEA) utilizando el software Ansys.

El propósito central de esta validación es confirmar la viabilidad técnica del diseño, su integridad estructural y su capacidad para soportar las cargas operativas. Este proceso es fundamental para asegurar que el tanque, antes de su construcción, cumple con los más altos estándares de seguridad industrial y las normativas aplicables.

La validación por simulación se desglosó en varias etapas y análisis:

- Modelado de la geometría y enmallado: Se creó una geometría cilíndrica del tanque de agua, que luego fue sometida a un proceso de enmallado (o mallado). Este paso consiste en dividir la estructura completa del tanque en una red de elementos más pequeños e interconectados (elementos finitos), lo que permite al software resolver ecuaciones matemáticas y analizar el comportamiento de la estructura bajo cargas. Se realizó un enmallado similar para la columna central del tanque, que es un componente estructural crítico.

- Aplicación de condiciones de carga: En el modelo FEA, se aplicaron las cargas que actúan sobre el tanque. Esto incluye:

- La presión hidrostática del agua que ejerce sobre las paredes y el fondo del tanque.
- La carga gravitacional de los elementos mecánicos del tanque.

- Análisis estructural y resultados: El software ANSYS resolvió las ecuaciones para cada elemento, proporcionando una representación detallada de los esfuerzos,

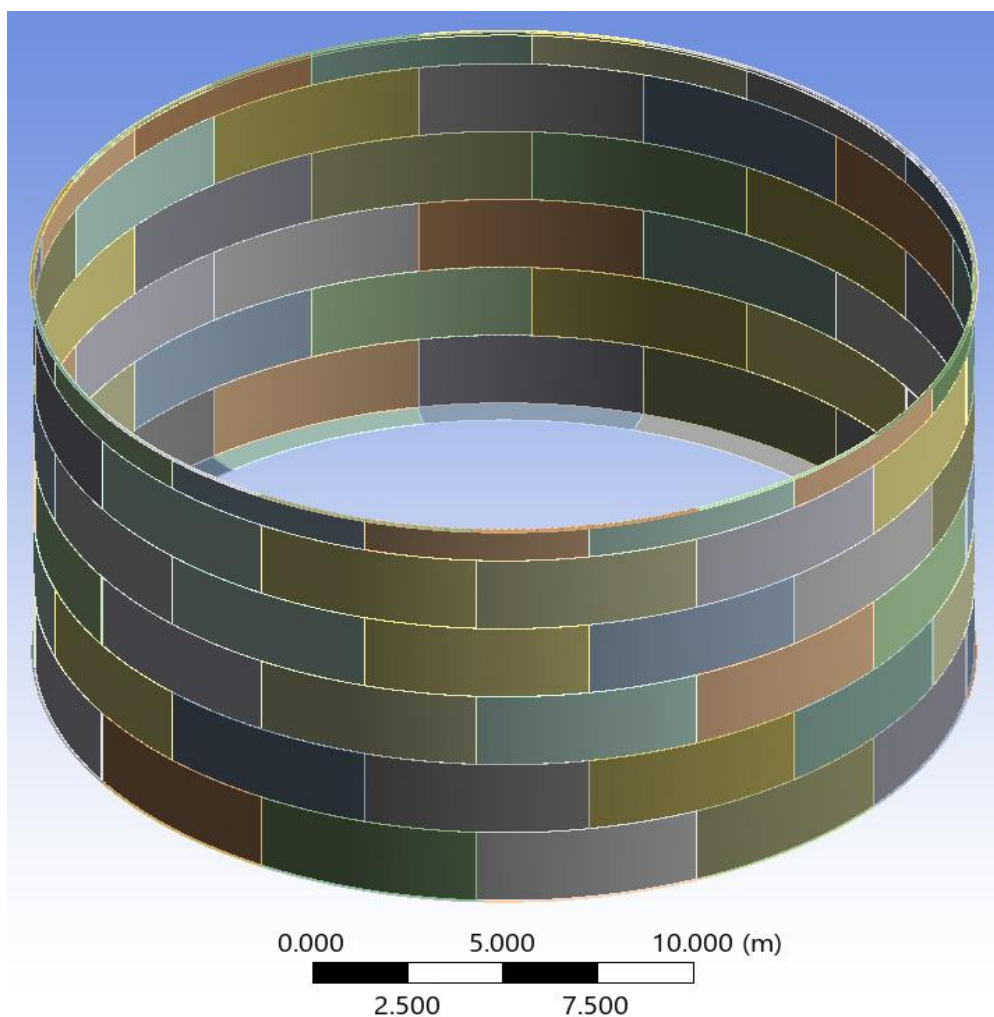
deformaciones y desplazamientos en cada punto de la estructura. Los resultados clave visualizados y analizados incluyeron:

Deformación del tanque de agua y de la columna central, lo cual permite verificar que estas deformaciones se mantienen dentro de límites aceptables.

- Análisis de estrés (esfuerzo) del tanque de agua y de la columna central, para identificar puntos de alta concentración de esfuerzos y asegurar que el material puede soportarlos sin fallar.

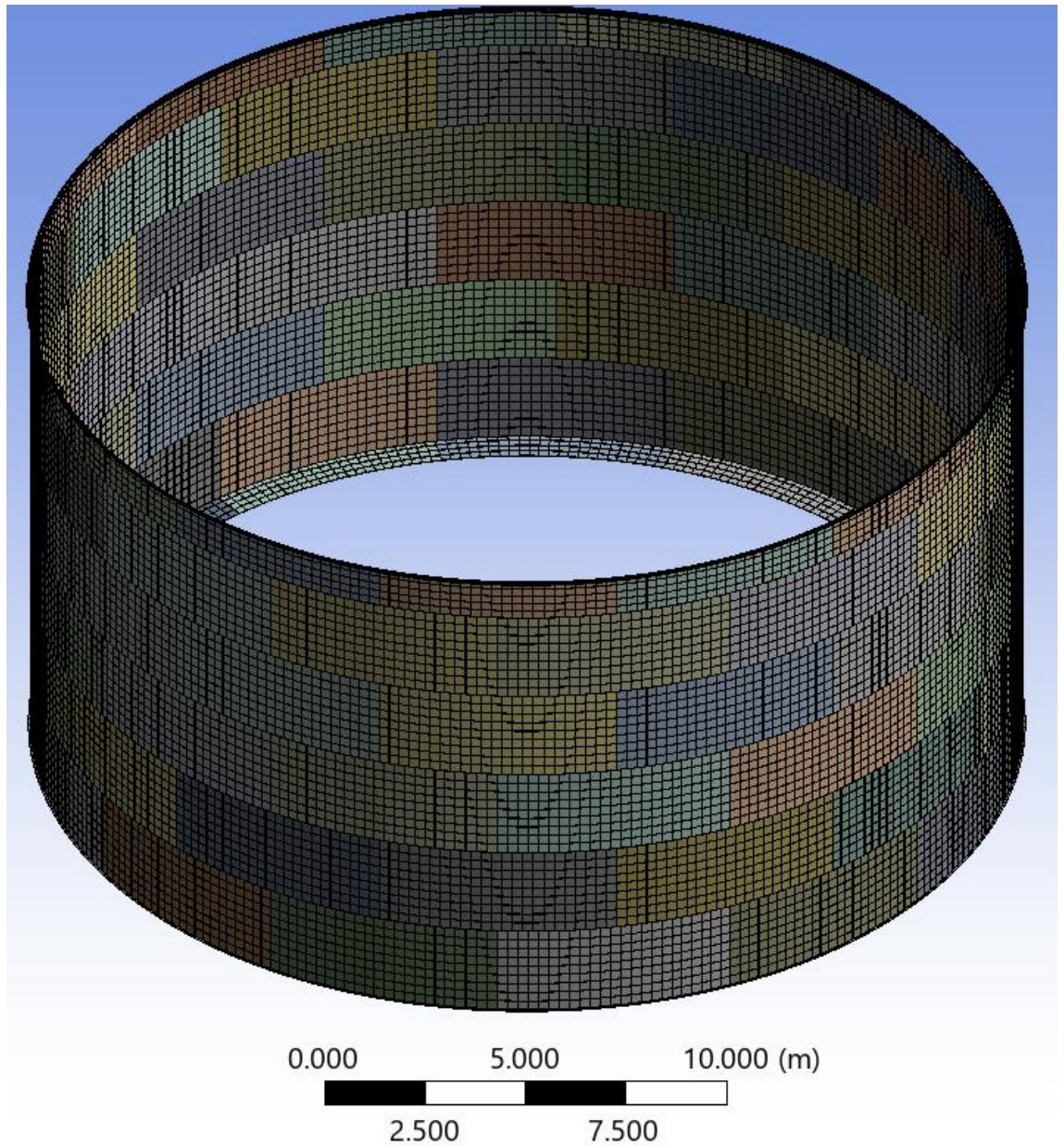
- Factor de seguridad (FS) para el tanque de agua y la columna central. El FS es una relación entre la resistencia del material y el esfuerzo de trabajo real, crucial para garantizar la seguridad y fiabilidad de la estructura ante posibles imperfecciones o variaciones en las cargas.

Figura 17. Geometría cilíndrica del tanque de agua.



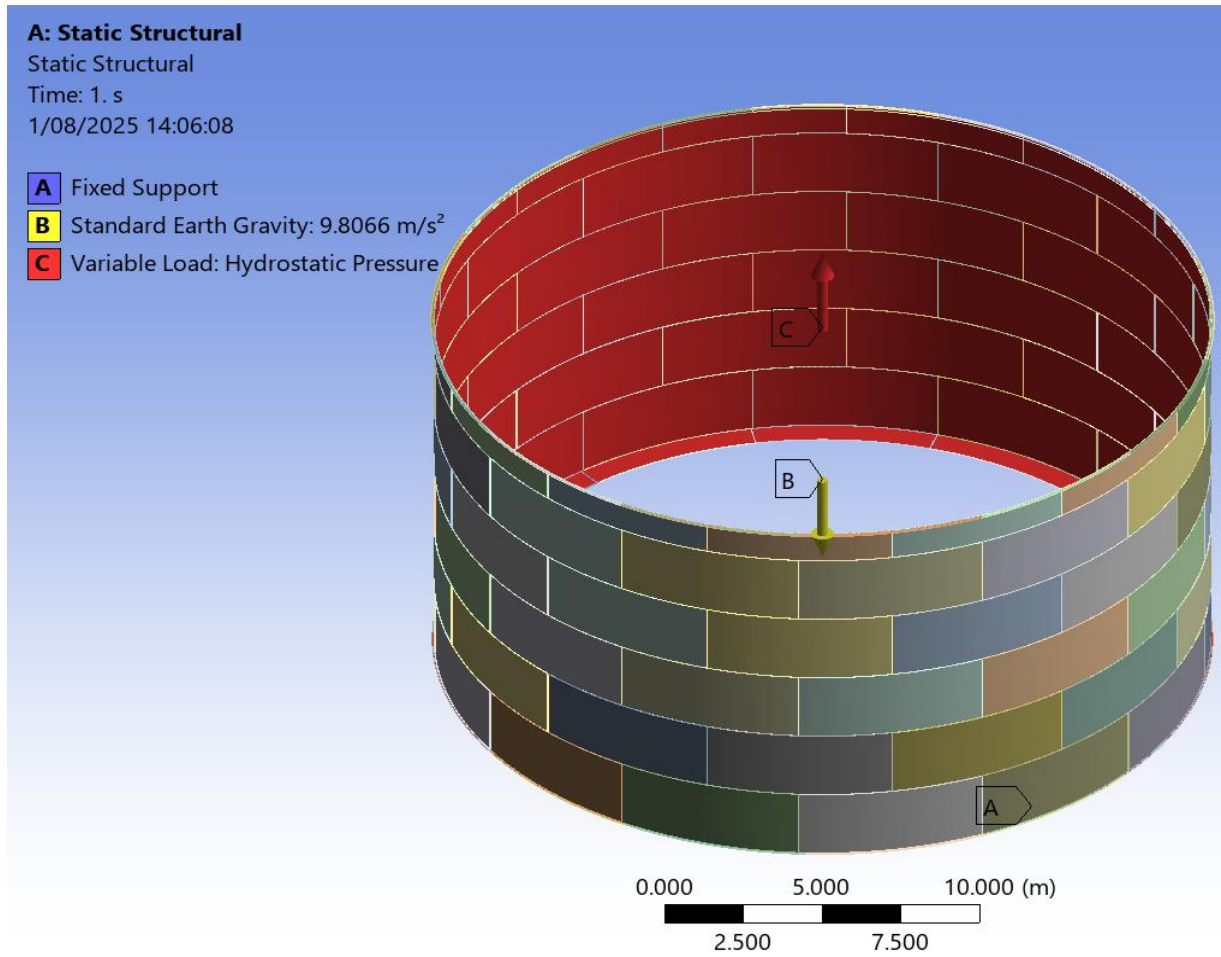
Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Enmallado para la simulación.



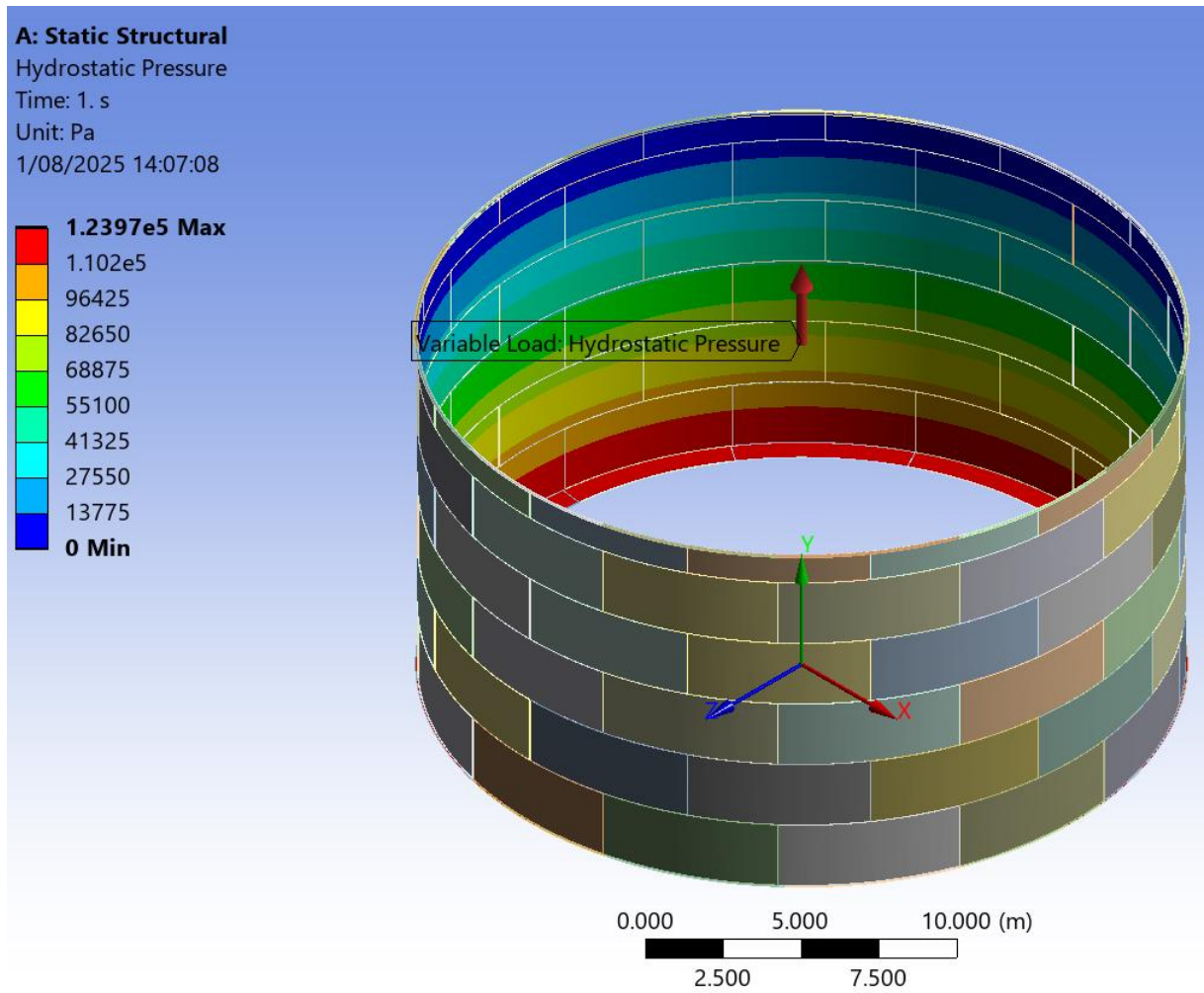
Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Condición de carga para el diseño.



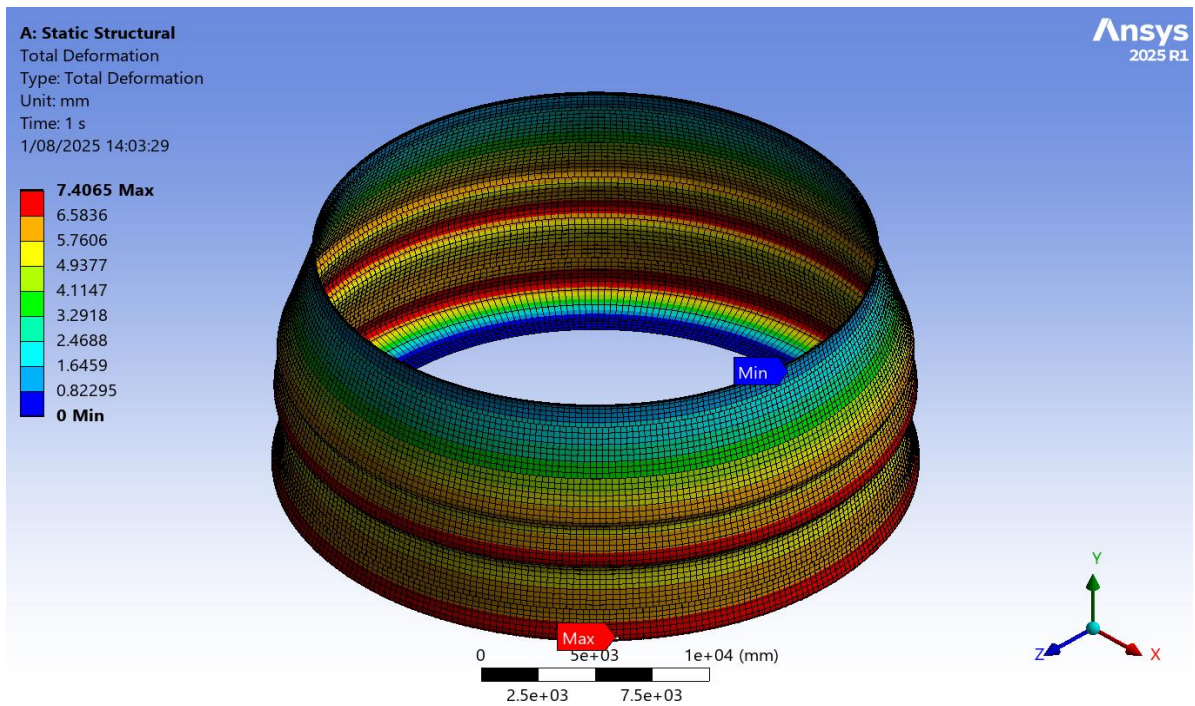
Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Presión hidrostática para el diseño.



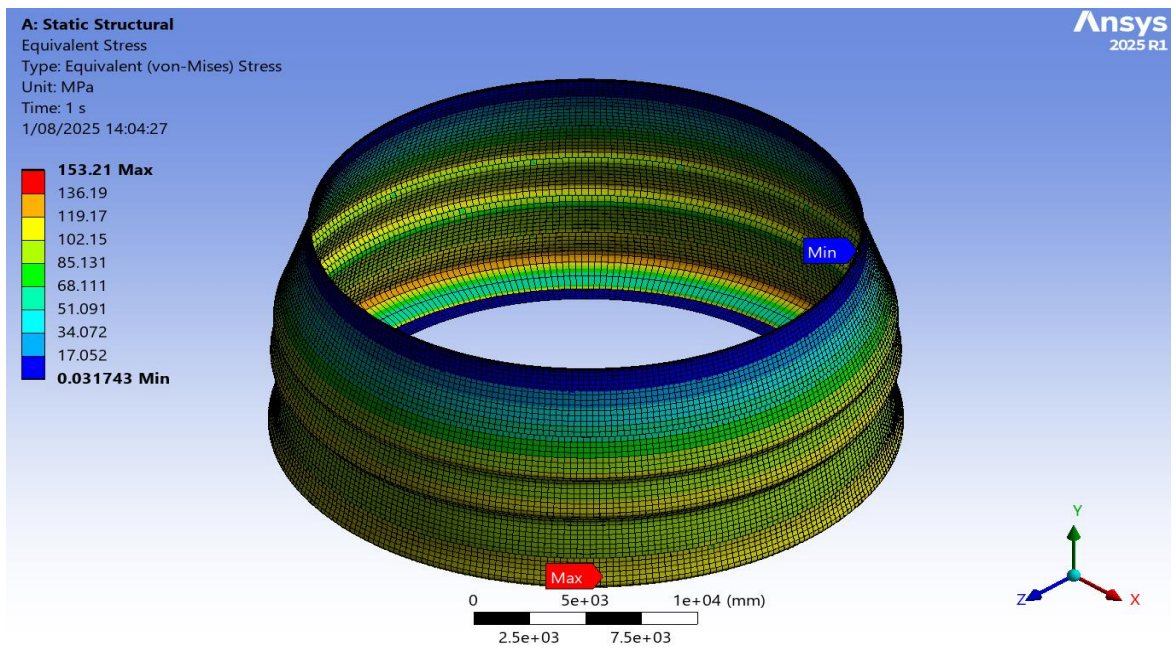
Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Deformación del tanque de agua.



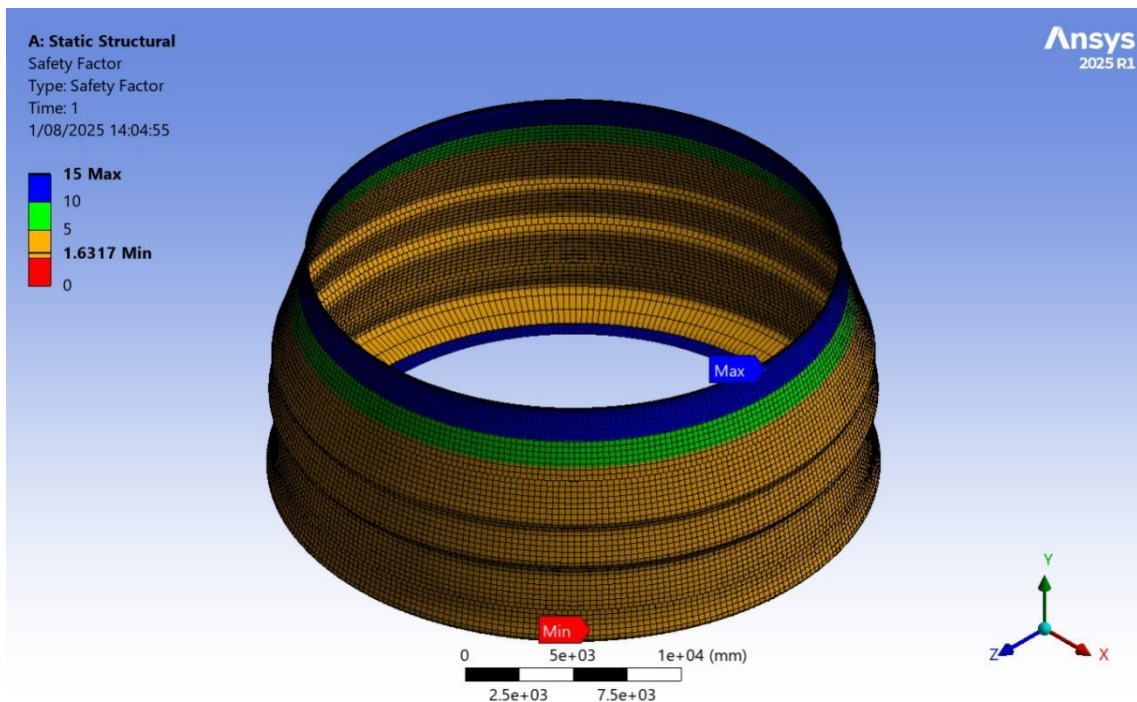
Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Análisis de estrés de tanque de agua.



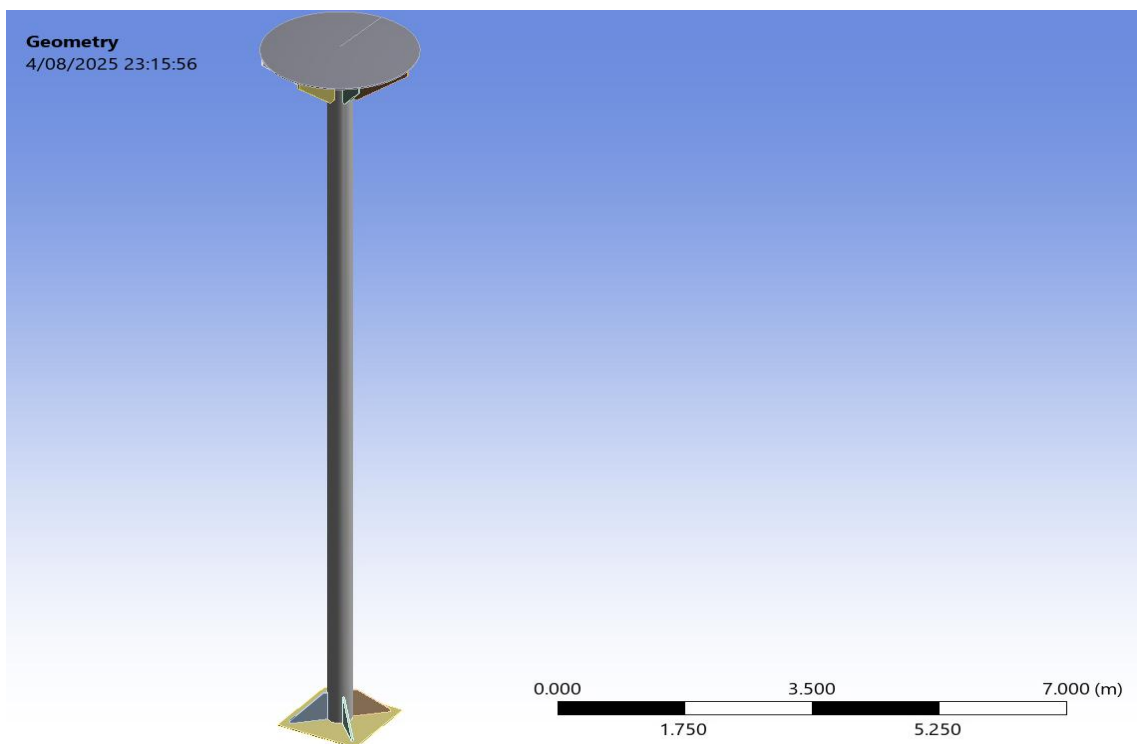
Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Factor de seguridad para el tanque de agua.



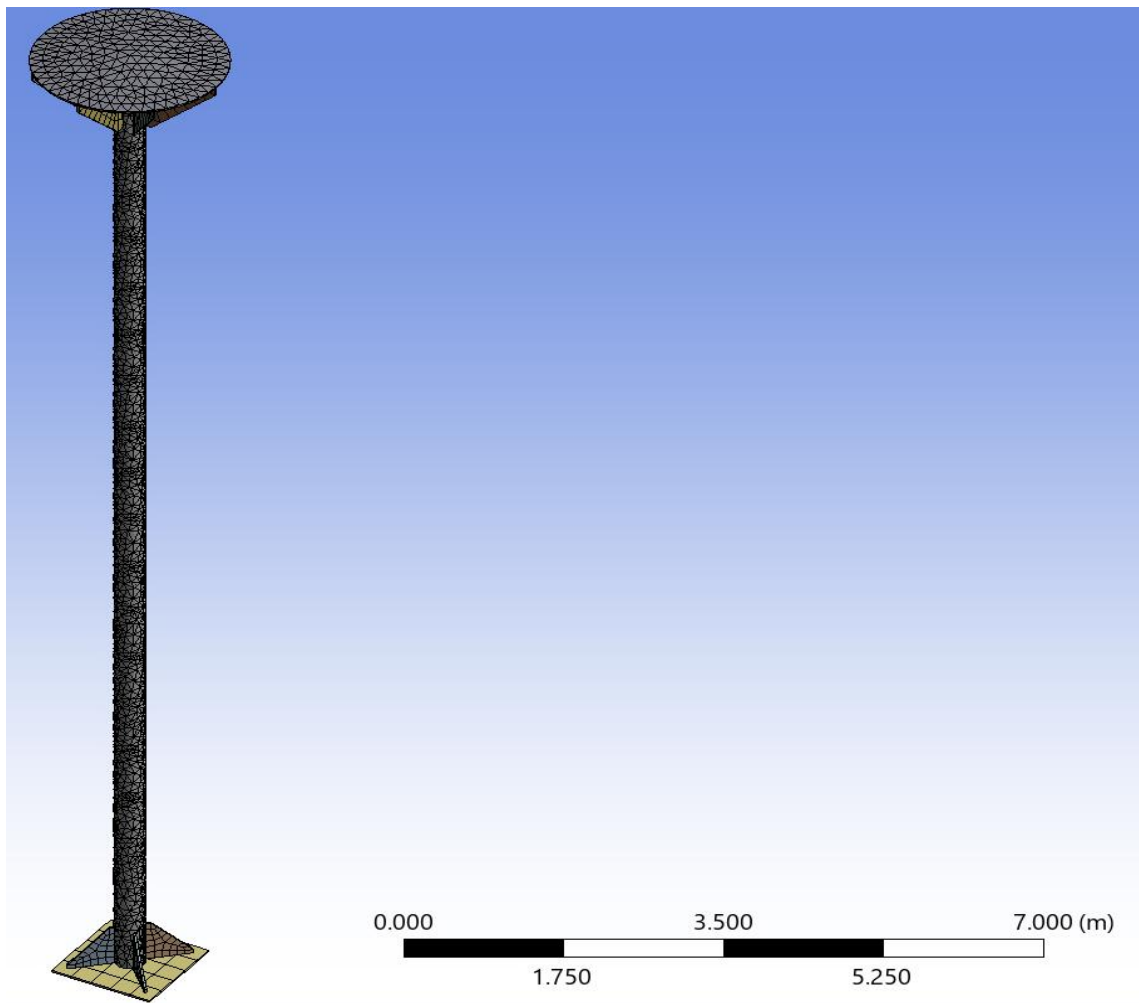
Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Geometría de la columna central del tanque de agua.



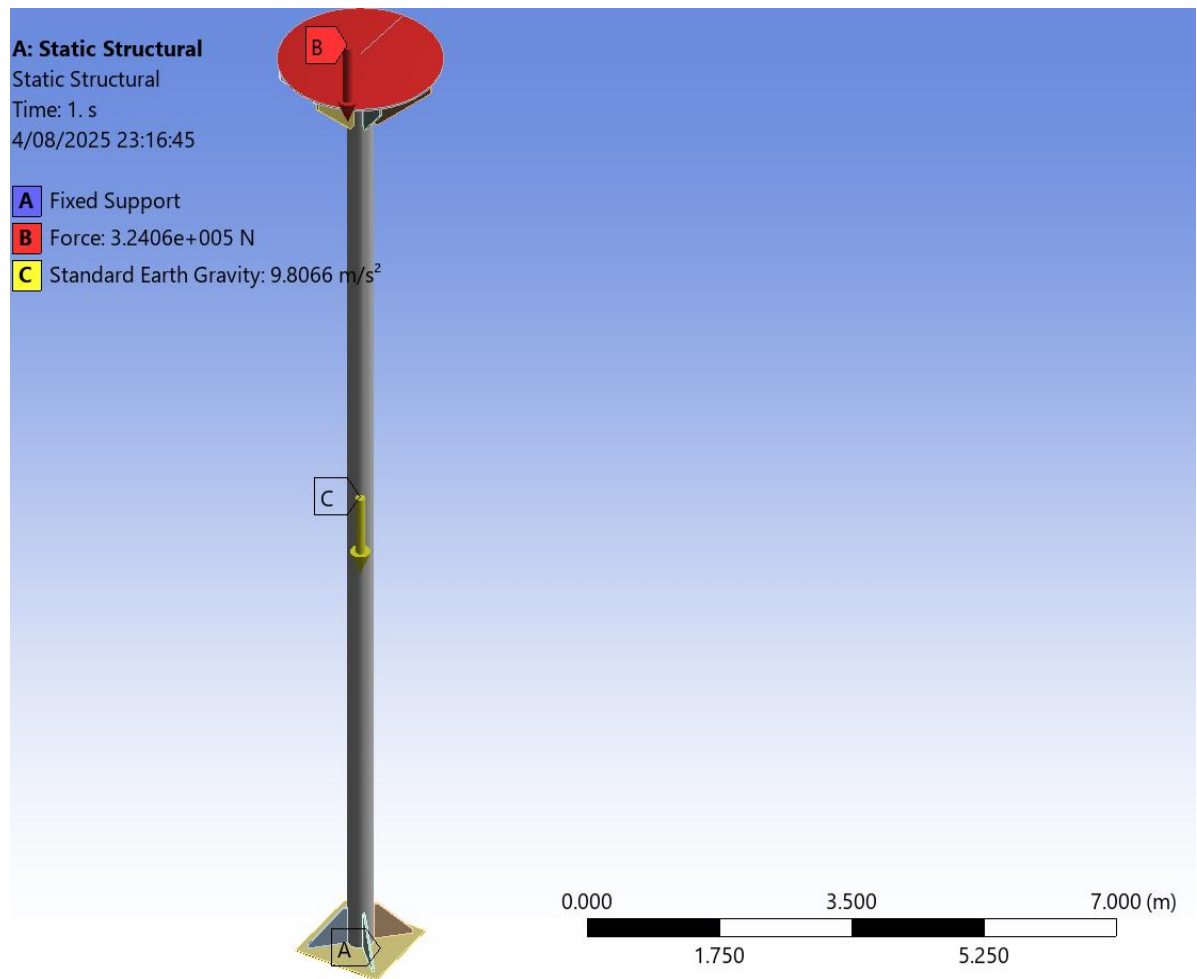
Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Enmallado para simulación de la columna central del tanque de agua.



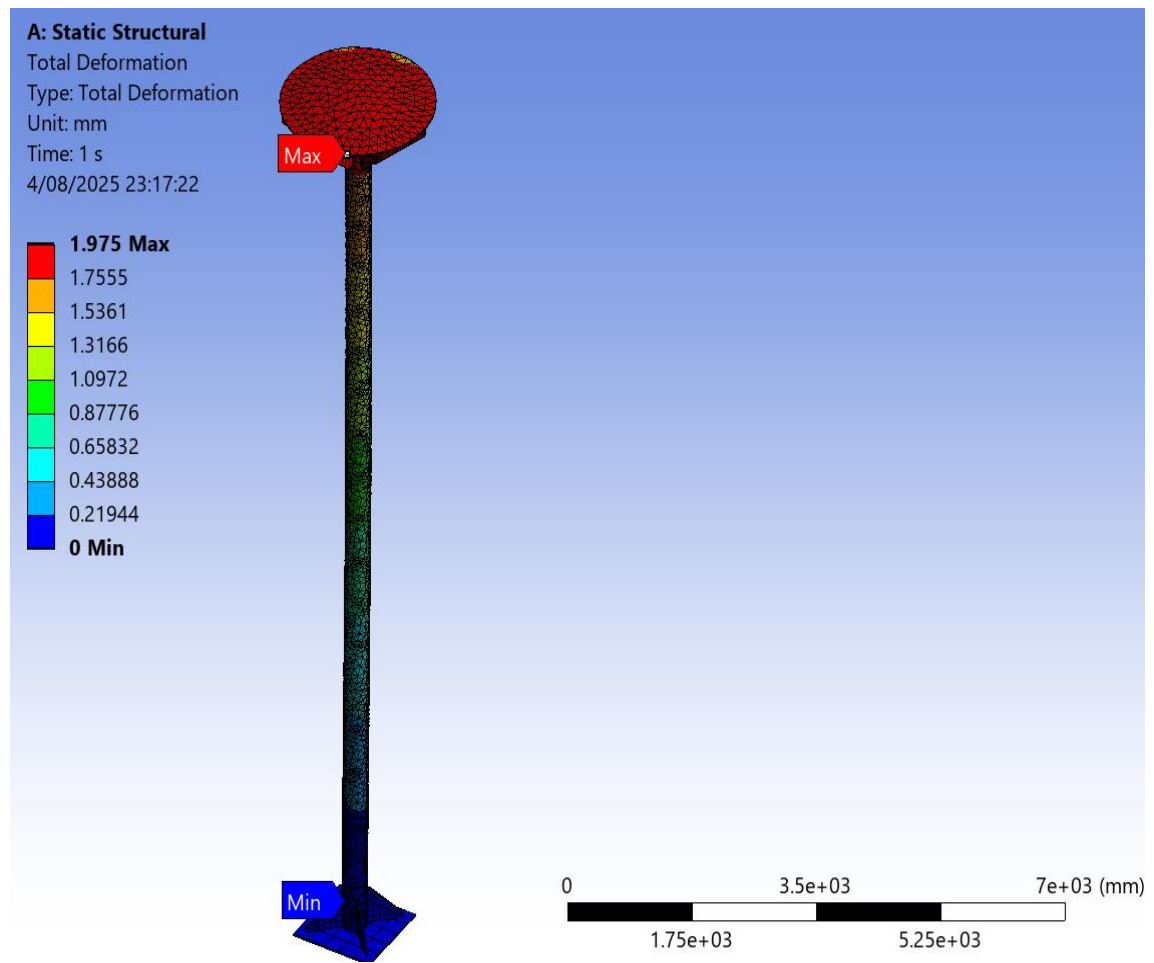
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Condiciones de carga de la columna central del tanque de agua.



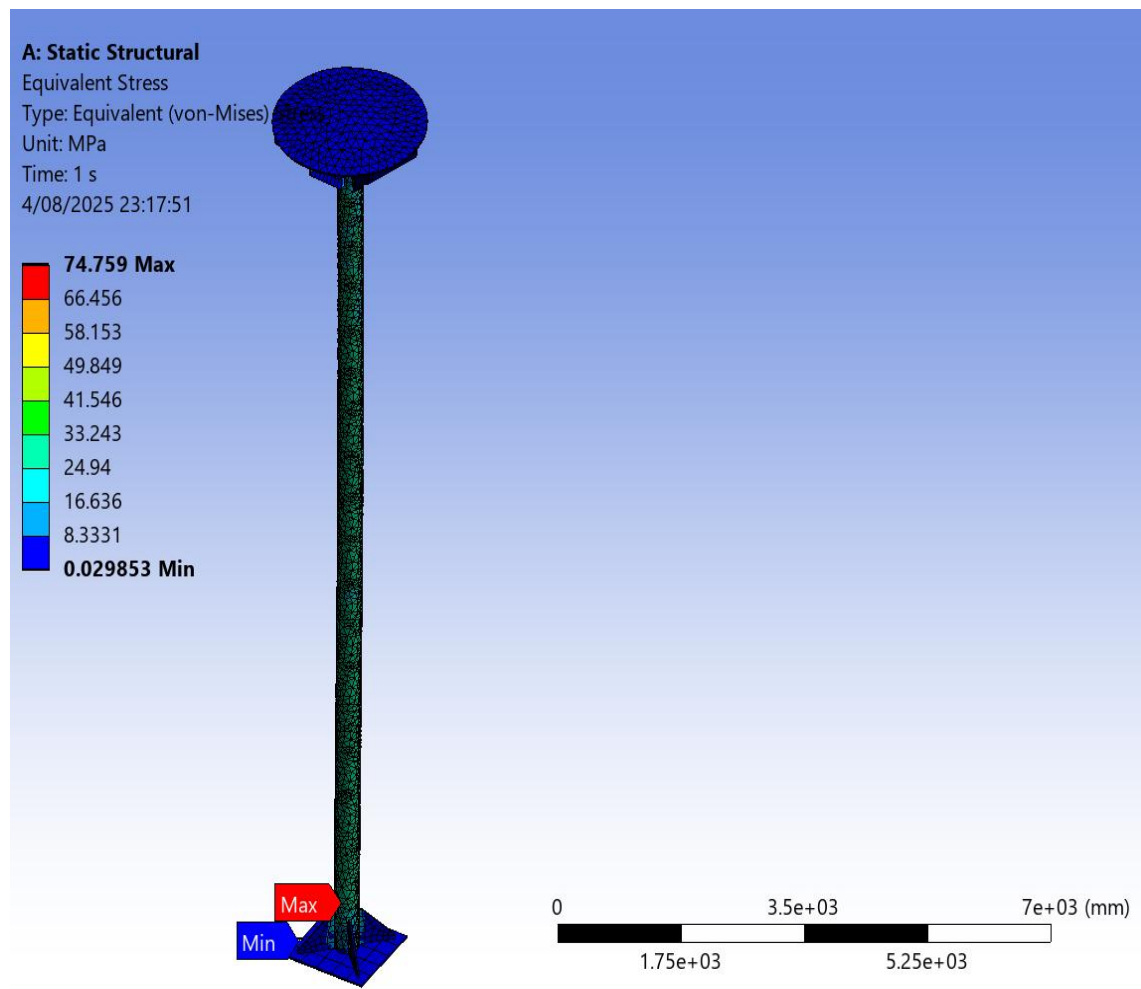
Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Análisis de deformación de la columna central del tanque de agua.



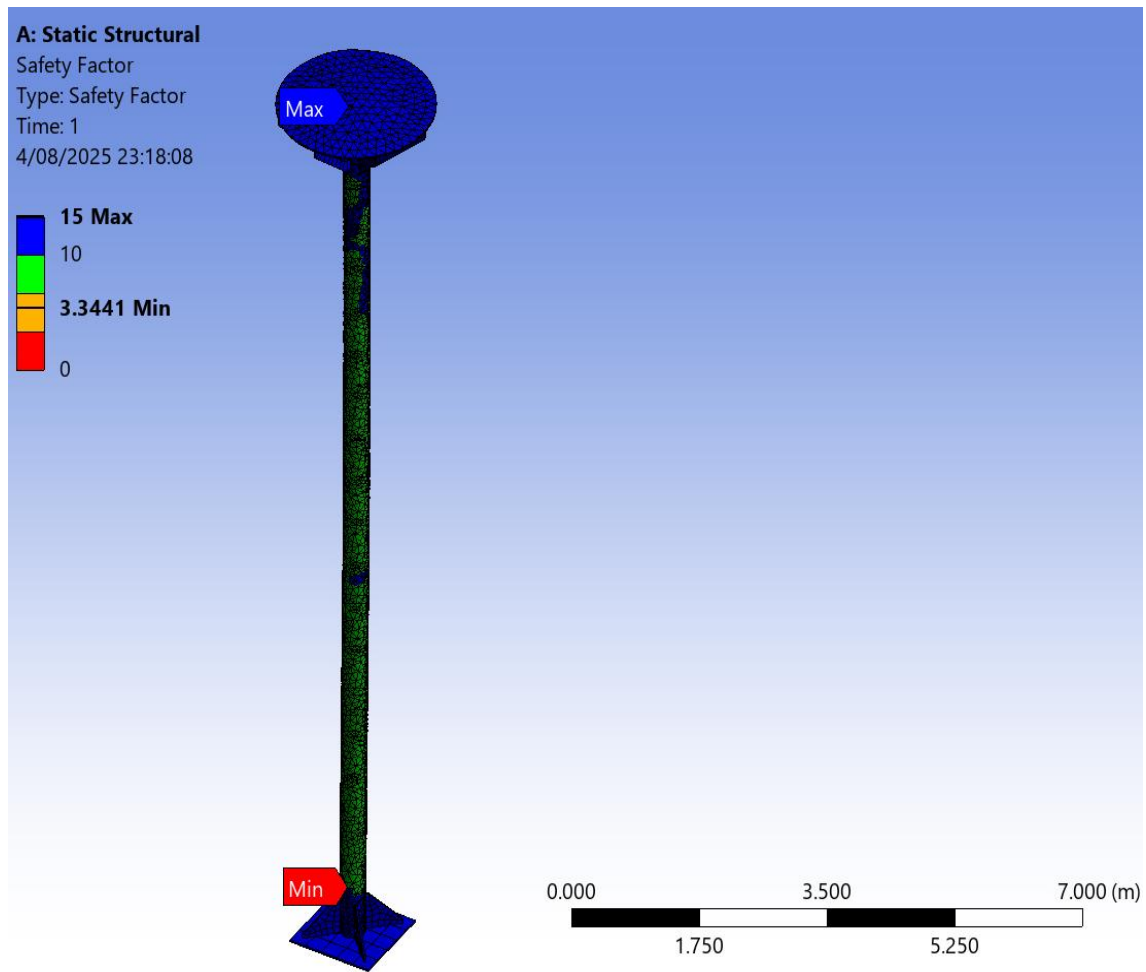
Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Análisis de estrés de la columna central del tanque de agua.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Factor de seguridad de la columna central del tanque de agua.



Fuente: Elaboración propia.

5.2. Alternativas de solución.

Optimización de costos y diseño: La matriz morfológica y la evaluación económica no solo se aplican a este tanque, sino que son herramientas versátiles para la toma de decisiones en cualquier proyecto de ingeniería. Permiten comparar de manera objetiva diversas soluciones (por ejemplo, estructuras de acero versus hormigón) en función de su costo inicial, mantenimiento y vida útil, garantizando la selección más viable y rentable.

Seguridad industrial y prevención de riesgos: El análisis de criticidad y riesgo es una metodología fundamental que puede aplicarse en cualquier planta industrial o de producción. Permite identificar y priorizar activos o sistemas que, de fallar, tendrían un

impacto catastrófico. Su aplicación ayuda a las empresas a tomar decisiones de inversión en seguridad de manera proactiva, mitigando riesgos antes de que ocurran.

Análisis estructural y validación de diseños: La simulación por elementos finitos (FEA) es una tecnología de vanguardia aplicable a la validación de cualquier estructura compleja, desde puentes y edificios hasta componentes de maquinaria y vehículos. En el contexto de la refinería, puede usarse para evaluar la integridad estructural de otras instalaciones, como tuberías, recipientes a presión o estructuras de soporte, bajo diferentes cargas.

Desarrollo sostenible y eficiencia operacional: La metodología VDI 2221, al ser un enfoque sistemático, no solo busca la funcionalidad, sino también la eficiencia. Su aplicación puede extenderse al diseño de procesos, la optimización de sistemas de energía o la implementación de tecnologías más sostenibles dentro de la refinería. Esto permite mejorar la eficiencia operativa, reducir el impacto ambiental y, al mismo tiempo, cumplir con las normativas de seguridad.

5.3. Contraste con trabajos de investigación similares.

La investigación de Saldaña-Delgado (2020) se diferencia de esta tesis principalmente en su objetivo central. Mientras que esta tesis se enfoca en el diseño específico de un único tanque para un sistema contra incendios en una refinería, Saldaña-Delgado (2020) busca desarrollar un programa informático interactivo (mediante Excel y SolidWorks) para el diseño simultáneo de una gama de tanques verticales de almacenamiento de agua con capacidades que van desde 12 m³ hasta 1200 m³. Este programa está dirigido a empresas metalmecánicas para mejorar su capacidad tecnológica y rapidez en el diseño.

Ambos trabajos coinciden en la elección del acero ASTM A36 como material de las planchas para los tanques de ejemplo, y ambos aplican la norma API 650 como guía principal para el diseño de tanques atmosféricos. En términos de consideraciones estructurales, ambos proyectos abordan el cálculo de espesores para las planchas del cuerpo, fondo y techo, y realizan análisis sísmicos, incluyendo la determinación de la necesidad de anclajes mecánicos.

Sin embargo, las herramientas de validación y enfoque metodológico difieren. Esta tesis se enfatiza el análisis por elementos finitos (FEA) para una validación

estructural rigurosa y la identificación de puntos de alta concentración de esfuerzos. En contraste, Saldaña-Delgado (2020) se basa en la integración de Excel para los cálculos y SolidWorks para el modelado 3D y la automatización del dibujo preliminar, lo que permite una respuesta rápida a las solicitudes de los clientes. Saldaña-Delgado (2020) también destaca la norma peruana E.030 para consideraciones sísmicas, mientras que esta tesis menciona NFPA 22 por su aplicación a sistemas contra incendios.

Esta tesis está enfocada en un tanque para agua contra incendios en una refinería, contrasta marcadamente con el trabajo de Ramos-López & Quijije-Cevallos (2023), cuyo objetivo es diseñar tanques de almacenamiento de agua potable para abastecer la demanda futura proyectada de la comunidad de Manglaralto.

Una diferencia fundamental radica en el material de construcción. Esta tesis diseña un tanque de acero, mientras que Ramos-López & Quijije-Cevallos (2023) se dedica al diseño de tanques de hormigón armado. Esta elección de material impacta directamente en la geometría y ubicación. El tanque de esta tesis es cilíndrico vertical, mientras que Ramos-López & Quijije-Cevallos (2023) propone dos tanques cuadrados (uno de 500m³ con dimensiones de 12x12m y otro de 400m³ con 10x10m, ambos de 4m de altura), los cuales son semienterrados o enterrados. La decisión de Ramos-López & Quijije-Cevallos (2023) de enterrar los tanques se fundamenta en un estudio de suelo que reveló la inestabilidad del terreno arcilloso de la zona.

Las normativas principales también difieren: Esta tesis se rige por API 650 y NFPA 22, mientras que Ramos-López & Quijije-Cevallos (2023) utiliza la normativa ecuatoriana CPE INEN para la proyección poblacional y el método PCA (Portland Cement Association) para el diseño estructural. Además, propone el diseño de dos tanques de capacidades distintas con sistemas independientes, a diferencia de esta tesis que se enfoca en un único tanque de gran capacidad. A pesar de estas diferencias, ambos proyectos comparten el objetivo común de satisfacer una demanda de agua específica, ya sea para protección contra incendios o para consumo humano, y consideran las condiciones del sitio, como el estudio del suelo y la topografía.

El trabajo de Valarezo (2022), se enfoca en la evaluación y actualización del diseño de tanques de agua potable de baja capacidad (100 m³, 250 m³, 500 m³) existentes

en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Esto contrasta con esta tesis, que busca el diseño de un nuevo tanque de gran capacidad para un sistema contra incendios en un contexto industrial específico.

Las diferencias en los materiales son notables: Esta tesis diseña con acero, mientras que Valarezo (2022) se concentra en tanques de hormigón armado. En cuanto a la geometría, el tanque de esta tesis es cilíndrico, mientras que los tanques estudiados por Valarezo (2022) son predominantemente de forma rectangular y, en menor medida, circular, y muchos de ellos cuentan con columnas centrales.

Las normativas principales también divergen. Esta tesis se basa en API 650 y NFPA 22. Valarezo (2022), por su parte, utiliza la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15) y normas específicas para estructuras que contienen líquidos como ACI-350-06 y ACI-350.3-01. Valarezo (2022), realiza una evaluación de los diseños existentes bajo normativas anteriores (Código Ecuatoriano de la Construcción CPE INEN 5 del año 2001) para luego proponer diseños actualizados y estandarizados que mejoren el comportamiento estructural y la vida útil.

A pesar de estas diferencias, ambos proyectos comparten la utilización de software de análisis estructural basado en elementos finitos. Valarezo (2022) usa SAP2000 para modelar los tanques tridimensionalmente y analizar su comportamiento bajo diversas cargas, una herramienta similar al FEA (Ansys) empleado en esta tesis para validar la integridad estructural y analizar esfuerzos complejos. Ambos también llevan a cabo un análisis sísmico detallado para asegurar la estabilidad de los tanques, considerando las presiones inducidas por el sismo.

El estudio de esta tesis se centró en el diseño de un único tanque de agua (6 111 m³) para un sistema contra incendios en la Refinería Iquitos, siguiendo las normas API 650 y NFPA 22. Su análisis sísmico concluyó que este tanque de gran capacidad no requería anclaje mecánico, siendo auto anclado.

En contraste, la tesis de Pinco-Robles (2020) abordó el diseño y construcción integral de siete tanques (585 m³ cada uno), sumando 4,095 m³, para almacenar productos derivados de hidrocarburos. Pinco-Robles (2020) utilizó la norma API 620, específica para tanques con presiones internas. Sus cálculos determinaron que estos

tanques sí requerían anclaje mecánico por efectos sísmicos ($J > 1,54$). Ambos emplearon acero ASTM A36.

CONCLUSIONES

Se diseñó un tanque de agua propuesto logrando exitosamente el objetivo general de aumentar la capacidad de almacenamiento del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos. La tesis demuestra que esta solución es viable, segura y económicamente justificable, al pasar de un estado deficiente a una capacidad neta de 6 111,00 m³. Este proyecto no solo mitiga el riesgo de incendio y garantiza la seguridad industrial, sino que también asegura la continuidad operativa y el cumplimiento estricto con las regulaciones nacionales e internacionales, como las normas NFPA 22 y API 650.

Se diagnosticó un déficit crítico en la capacidad de almacenamiento de agua del sistema contra incendios en la Refinería Iquitos, lo cual se atribuye a la antigüedad y el avanzado estado de deterioro de los tanques existentes. Este diagnóstico inicial, confirmado por un análisis de criticidad y riesgo, puso de manifiesto la necesidad urgente de un nuevo diseño que mitigara los riesgos significativos para la seguridad operacional de la planta, su personal y el medio ambiente.

Se determinó que el dimensionamiento de los elementos mecánicos que permitió concebir un tanque de agua con una capacidad neta de 6 111,00 m³, cumpliendo con los requerimientos del sistema contra incendios. El diseño propuesto especifica dimensiones principales de 13,10 m de altura y 24,85 m de diámetro, y se compone de 6 anillos. Se utilizaron materiales como acero ASTM A36 para las planchas del cuerpo, fondo y techo, y ASTM A53 Gr.B para las tuberías. Los cálculos de los espesores de las planchas y el peso total del cilindro es 69 495,86 kg estos fueron realizados conforme a las normativas aplicables, asegurando que el diseño es capaz de aumentar la capacidad requerida.

Se validó por simulación el diseño del tanque de agua y se realizó exitosamente mediante el software Ansys, aplicando la metodología de Análisis por Elementos Finitos (FEA). Esta prueba virtual demostró la viabilidad técnica del diseño, confirmando su integridad estructural y su capacidad para soportar las cargas operativas. Los resultados visualizados incluyeron el análisis de deformación, estrés y el factor de seguridad para el

tanque de agua y su columna central. Además, se verificó que el tanque es estable y no requiere anclaje frente a las cargas de viento y sismo, asegurando que el diseño cumple con todas las exigencias técnicas y de seguridad antes de su construcción real.

RECOMENDACIONES

Adoptar la metodología VDI 2221 para futuros diseños de ingeniería, asegurando un proceso estructurado y optimizado que considere todas las fases cruciales del proyecto.

Asegurar la selección de materiales de alta calidad (ASTM A36, A53 Gr.B) y aplicar recubrimientos protectores para prolongar la vida útil y prevenir la corrosión en la refinería.

Establecer un programa continuo de evaluación estructural y mantenimiento preventivo y predictivo para todos los activos críticos, evitando el deterioro avanzado y garantizando la seguridad operacional a largo plazo.

Realizar análisis de criticidad y riesgo periódicos y exhaustivos en todos los sistemas para identificar y priorizar inversiones en seguridad, mitigando proactivamente los riesgos significativos.

Priorizar el análisis detallado de cargas ambientales (viento, sismo) en todos los diseños, asegurando la estabilidad y seguridad de la infraestructura, como la capacidad auto anclada del tanque.

Implementar monitoreo en tiempo real con sensores de nivel, caudal y presión en el nuevo tanque. Esto facilitará la supervisión continua del estado operativo y la detección temprana de anomalías.

Optimizar continuamente el sistema integral contra incendios de la Refinería Iquitos. Evaluar equipos, protocolos de emergencia y capacitación para asegurar protección efectiva y continuidad operativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alburqueque-Garcia, J. (2021). *Diseño de un tanque de almacenamiento de base asfáltica de 10 mb de capacidad para la planta de asfalto, de refinería de Talara.*

API. (2021). *Depósitos soldados para almacenamiento de petróleo* (p. 155).

Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica. 6ta.* Fideas G. Arias Odón.

Association, A. W. W. (1985). *AWWA Standard for welded steel tanks for water storage.* American Water Works Association.

Barriga-Gamarra, B. (2016). *Métodos de diseño en Ingeniería Mecánica.*

Becerra-Hernández, Y. (2019). *Diseño, construcción y control de calidad de un tanque de capacidad de 275 ?? en la comunidad de Algamarca.*

Chen, H., Wang, Z., Langlois, K., Mohamadi, P., Tian, H., Verstraten, T., & Vanderborght, B. (2026). Investigating a novel 3D-printed electrical impedance tomography sensor for monitoring the interaction pressure on a customized physical interface in wearable robots. *Measurement*, 257, 118714. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118714>

Cusi-Yucra, F. K. (2023). *Diseño, fabricación y montaje de un tanque de agua desmineralizada y un tanque de agua residual para una planta termoeléctrica.*

Das, A., & Konar, T. (2023). Design and optimization of roof-top fire water tanks as compliant deep tank dampers-inerter for seismic protection of multi-storeyed buildings. *Journal of Building Engineering*, 80, 107957. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.107957>

Gonzáles, D., & Perrera, V. R. (2018). Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento de un fluido de alta temperatura. *Madrid: Autor-Editor (Universidad Politécnica de Madrid).*

Kang, Y., Zhu, Y., Luo, Z., Deng, X., Cheng, P., & Xia, Z. (2026). Study on the flow and enhanced heat transfer mechanism of staggered parallel pin fins minichannel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 117, 110006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2025.110006>

Nasraoui, S., Ferras, D., & Dupont, C. (2026). A phononic crystal-based solution for improved noise and vibration behavior of ram pumps. *Applied Acoustics*, 241, 111001. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.111001>

Pejerrey-Zegarra, G. E. (2017). *Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento atmosférico de 60,000 barriles para almacenaje de gasolina de 90 octanos en la selva.*

Pinco-Robles, E. (2020). *Diseño y construcción de 7 tanques de 585 m³ para almacenamiento de productos derivados de hidrocarburos en la empresa Peruquimicos S.A.C.* [Universidad Nacional del Callao]. <https://www.golder.com/insights/block-caving-a-viable-alternative/>

Pingfan, W., Jia, Y., Haochen, S., Renkun, F., Ling, Z., Lujia, H., & Guangqun, H. (2026). Performance test system developed for real-time mobile monitoring in liquid organic fertilizer distributors. *Measurement*, 257, 118645. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118645>

Pozo-Prado, E. M. (2016). *Diseño de tanques de almacenamiento de agua para sistemas contra incendios bajo norma NFPA 22 para la industria ecuatoriana.* Quito, 2016.

Ramos-López, T. R., & Quijije-Cevallos, C. E. (2023). *Diseño de un tanque de almacenamiento de agua potable para el abastecimiento de la demanda futura proyectada en la comunidad de Manglaralto.* Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Saldaña-Delgado, A. (2020). Diseño de tanques de agua con capacidad hasta 1200 m³ con techo cónico bajo norma API 650 con Excel y SolidWorks. In *Universidad Cesar Vallejo* (Issue TANQUES CON TECHO CONICO). Universidad Cesar Vallejo.

Sánchez, F. (2019). Guía de tesis y proyectos de investigación. *Centrum Legalis EIRL.*

Sistemas, I. De, & Incendio, C. (2020). *El Problema del Agua para el Combate de Incendios Sumilla.*

Song, J., Zhang, Z., Zhao, Y., Hu, H., & Ren, F. (2026). Closed-loop rotary control of flow past a circular cylinder: An experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 170, 111557. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2025.111557>

Valarezo-Riofrío, R. A. (2022). *Evaluación y diseño de los tanques de almacenamiento de agua potable de baja capacidad (100 m3, 250 m3, 500 m3) del DMQ.*

Valarezo, R. (2022). *Evaluación y diseño de los tanques de almacenamiento de agua potable de baja capacidad (100 m3, 250 m3, 500 m3) del DMQ.* Universidad Internacional SEK.

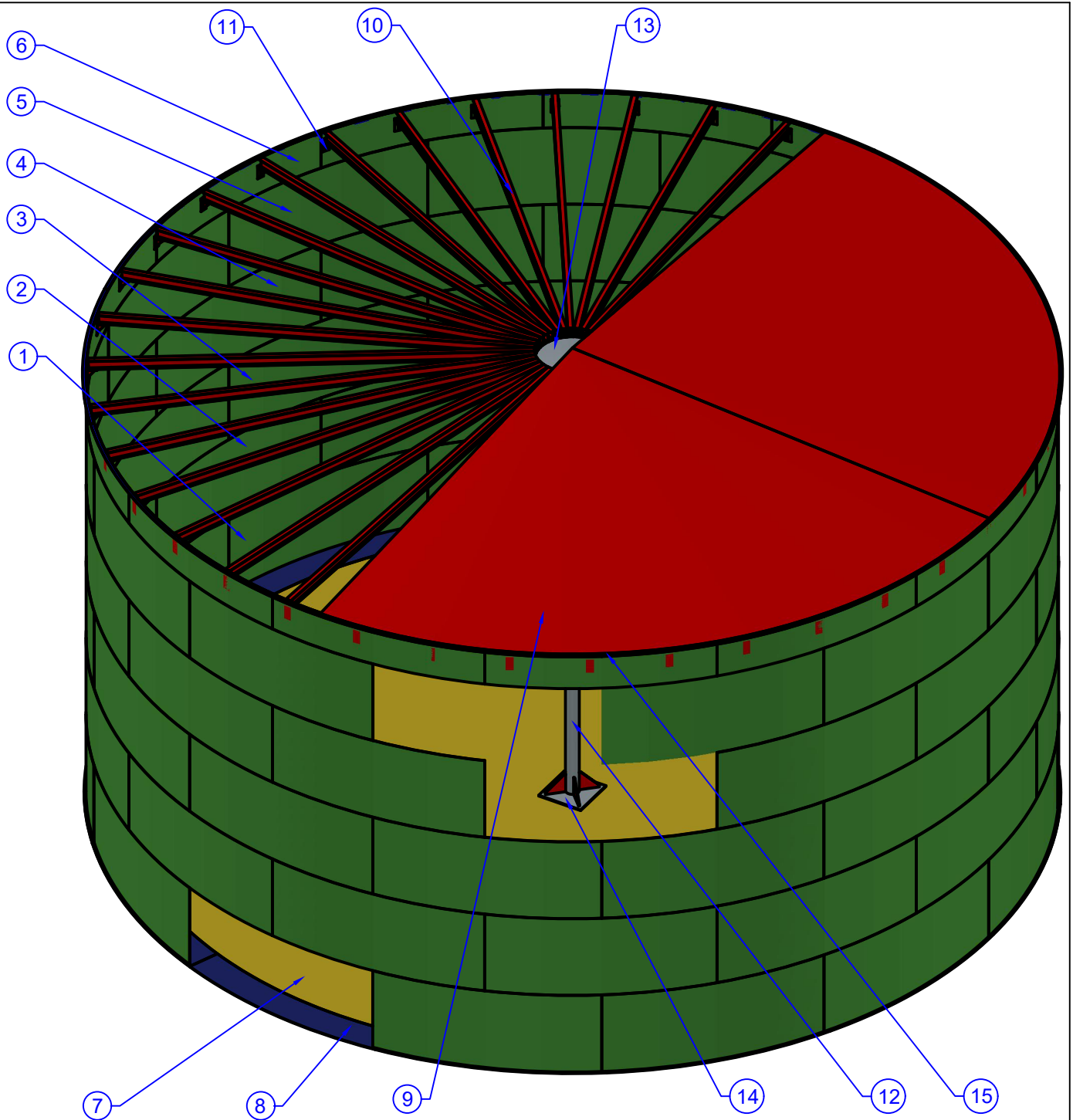
Vista, W. G. L. B., & Area, D. S. R. (2024). *NFPA Technical Committee on Fire Service Training (FIY-AAA) NFPA 1400/13E/1401/1405 First Draft Meeting (Custom ERRS Group 5).*

Wang, S., Jiang, S., Xu, Q., Li, P., & Wang, W. (2026). Prediction of underwater concrete compressive strength using Deep ELM optimized by rime optimization algorithm. *Measurement*, 257, 118648. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118648>

Yafac-Torres, J. J. (2020). *Diseño de tanque de almacenamiento de Nafta con protección catódica para la refinería de Iquitos.*

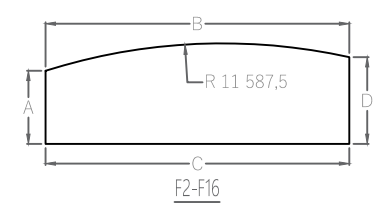
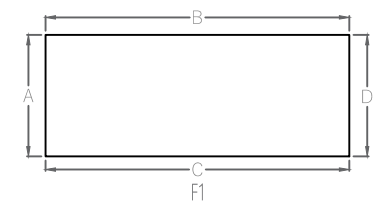
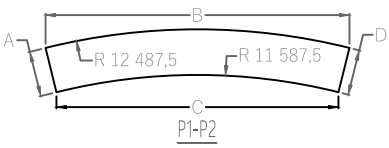
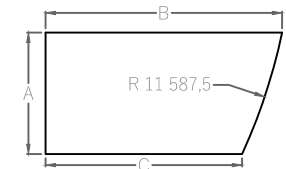
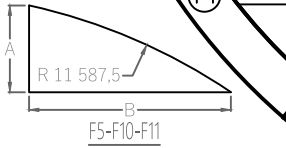
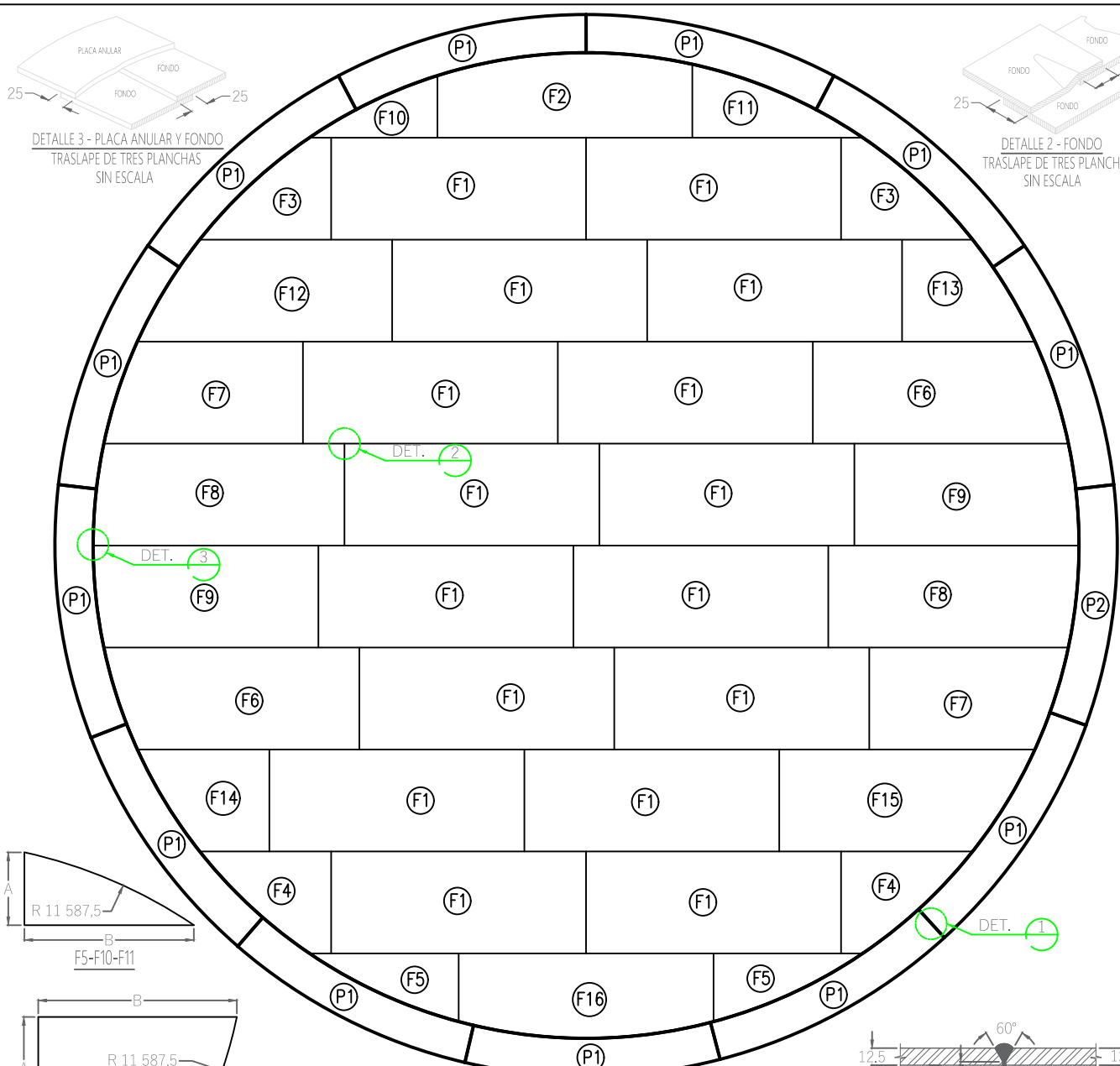
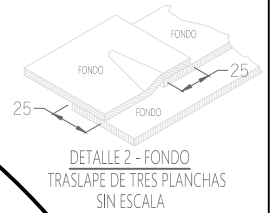
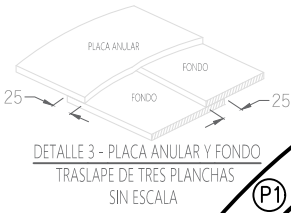
Yifan, Z., Ye, C., Fei, X., & Yong, Z. (2026). A novel algorithm for drift spectrum analysis in dynamic process monitoring with optical fiber sensors. *Measurement*, 257, 118611. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118611>

ANEXOS

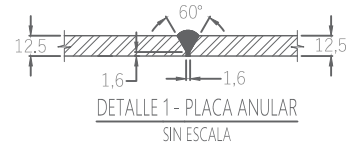


COMPONENTES DEL TANQUE CONTRAINCENDIO DE REFINERÍA IQUITOS			
N .	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	COMENTARIO
1	Planchas del primer anillo	ASTM A36	Plancha de espesor 12,5mm
2	Planchas del segundo anillo	ASTM A36	Plancha de espesor 12mm
3	Planchas del tercer anillo	ASTM A36	Plancha de espesor 8mm
4	Planchas del cuarto anillo	ASTM A36	Plancha de espesor 6mm
5	Planchas del quinto anillo	ASTM A36	Plancha de espesor 6mm
6	Planchas del sexto anillo	ASTM A36	Plancha de espesor 6mm
7	Planchas del fondo	ASTM A36	Plancha de espesor 9,5mm
8	Placa anular	ASTM A36	Plancha de espesor 12,5mm
9	Planchas del techo	ASTM A36	Plancha de espesor 6mm
10	Vigas radiales	ASTM A36	Perfil W10x22
11	Ménsula de soporte para viga radial	ASTM A36	Planchas de espesor 12,5mm y 9,5mm
12	Columna central	ASTM A53 GR.B	Tubería Ø14" sch.40
13	Capitel	ASTM A36	Plancha de espesor 25,4mm
14	Placa base	ASTM A36	Plancha de espesor 25,4mm
15	Anillo de refuerzo superior	ASTM A36	Perfil L 100mmx100mmx12,5mm

<i>Autor</i>	<i>Froylan Gonzales Bautista</i>	<i>15-08-2025</i>	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN			
<i>Proyecto</i>	<i>Diseño de Tanque Contra incendio de Refinería Iquitos</i>					
<i>Escala</i> 1:150	PLANO DE CONJUNTO -TANQUE CONTRAINCENDIO		<i>Unidad</i>	<i>mm</i>	<i>Lamina</i>	
			<i>Tamaño</i>	<i>A4</i>	<i>1 de 6</i>	

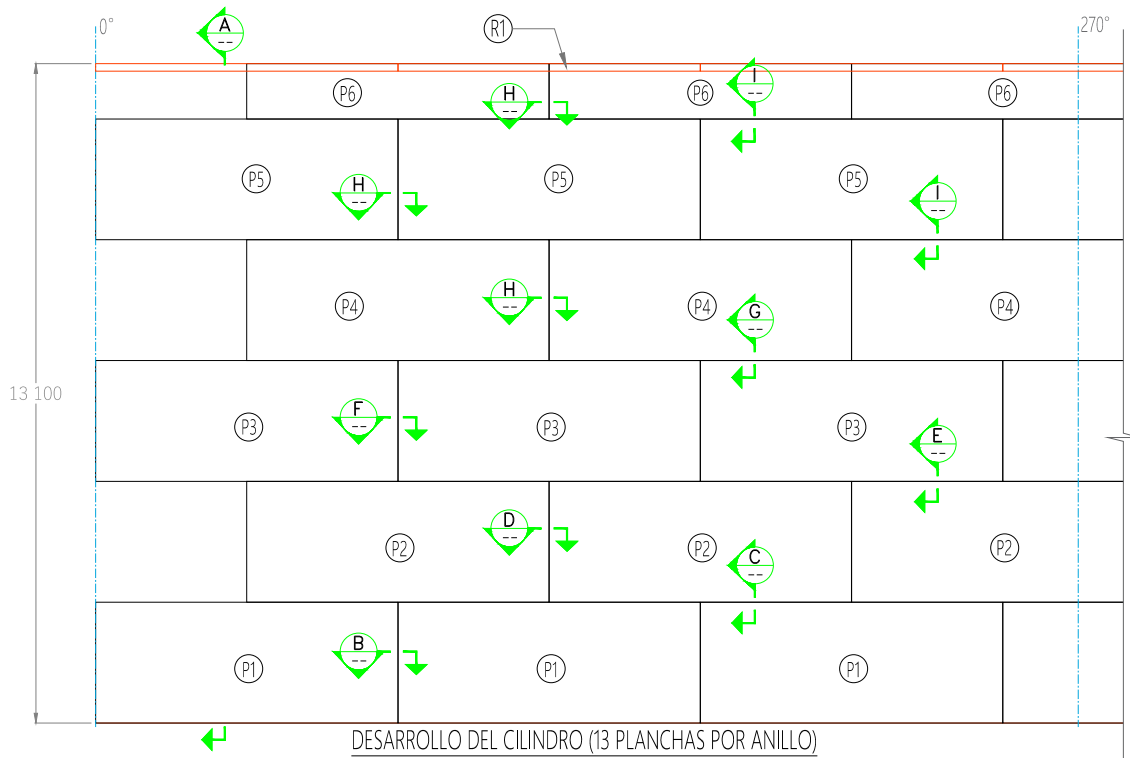


DISTRIBUCIÓN DE PLANCHAS DE FONDO Y PLACA ANULAR

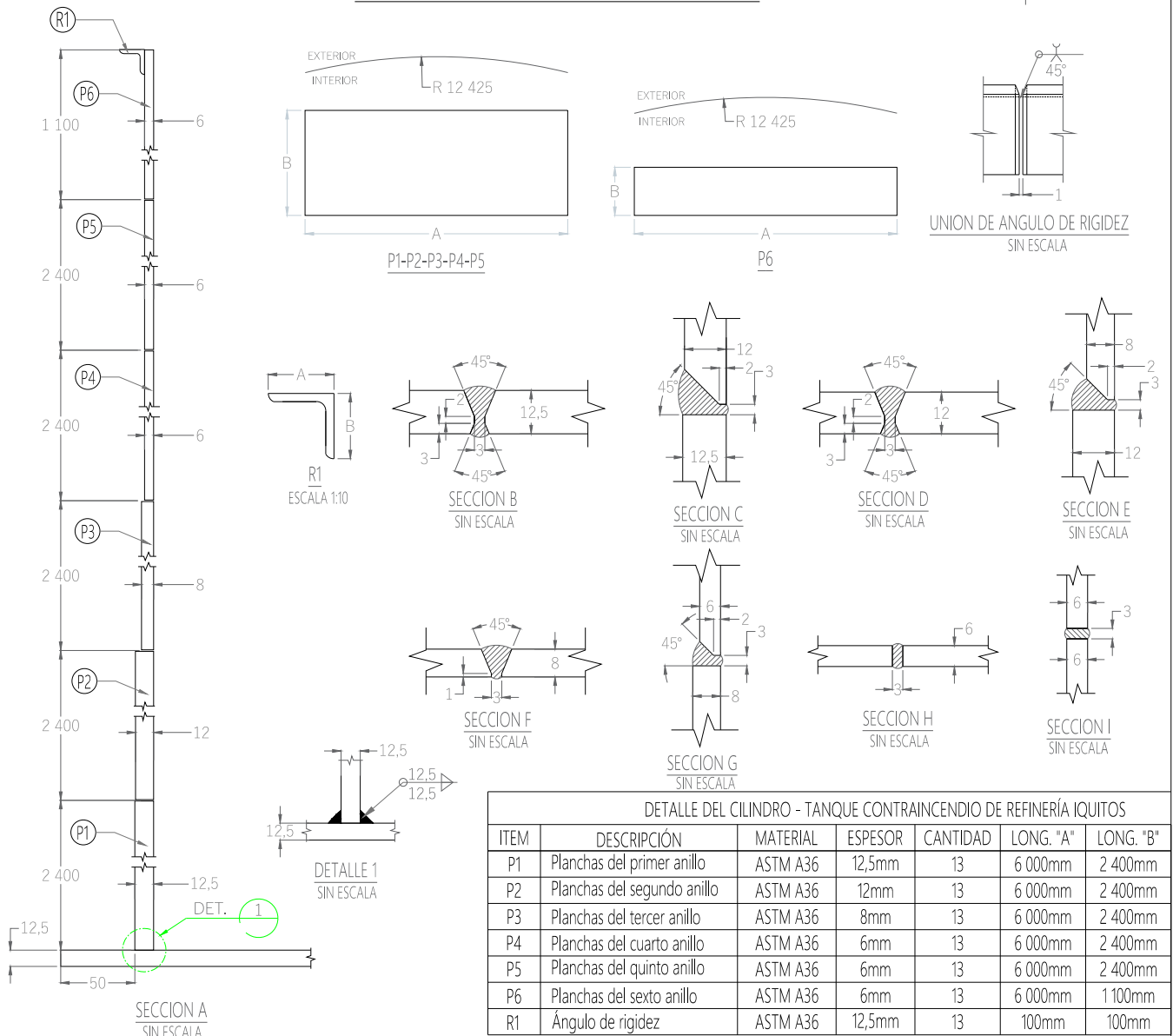


DETALLE DEL FONDO Y PLACA ANULAR - TANQUE CONTRAINCENDIO DE REFINERÍA IQUITOS								
ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	ESPESOR	CANTIDAD	LONG. "A"	LONG. "B"	LONG. "C"	LONG. "D"
F1	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	16	2 400mm	6 000mm	6 000mm	2 400mm
F2	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	1	1 446mm	6 000mm	6 000mm	1 715mm
F3	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	2	2 400mm	489mm	3 079mm	-
F4	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	2	2 400mm	489mm	3 079mm	-
F5	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	2	1 592mm	3 489mm	-	-
F6	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	2	2 400mm	5 210mm	6 000mm	-
F7	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	2	2 400mm	4 673mm	3 883mm	-
F8	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	2	2 400mm	5 900mm	5 649mm	-
F9	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	2	2 400mm	5 024mm	5 275mm	-
F10	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	1	1 446mm	2 989mm	-	-
F11	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	1	1 715mm	3 989mm	-	-
F12	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	1	2 400mm	5 983mm	4 516mm	-
F13	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	1	2 400mm	1 643mm	3 110mm	-
F14	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	1	2 400mm	1 626mm	3 093mm	-
F15	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	1	2 400mm	6 000mm	4 533mm	-
F16	Planchas de fondo	ASTM A36	9,5mm	1	1 592mm	6 000mm	6 000mm	1 592mm
P1	Planchas de placa anular	ASTM A36	12,5mm	12	900mm	6 000mm	5 568mm	900mm
P2	Planchas de placa anular	ASTM A36	12,5mm	1	900mm	5 699mm	5 289mm	900mm

Autor	Froylan Gonzales Bautista	15-08-2025	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN			
Proyecto	Diseño de Tanque Contra incendio de Refinería Iquitos					
Escala 1:150	DETALLE DE FONDO Y PLACA ANULAR - TANQUE CONTRA INCENDIO			Unidad mm	Lamina 2 de 6	
			Tamaño A4			

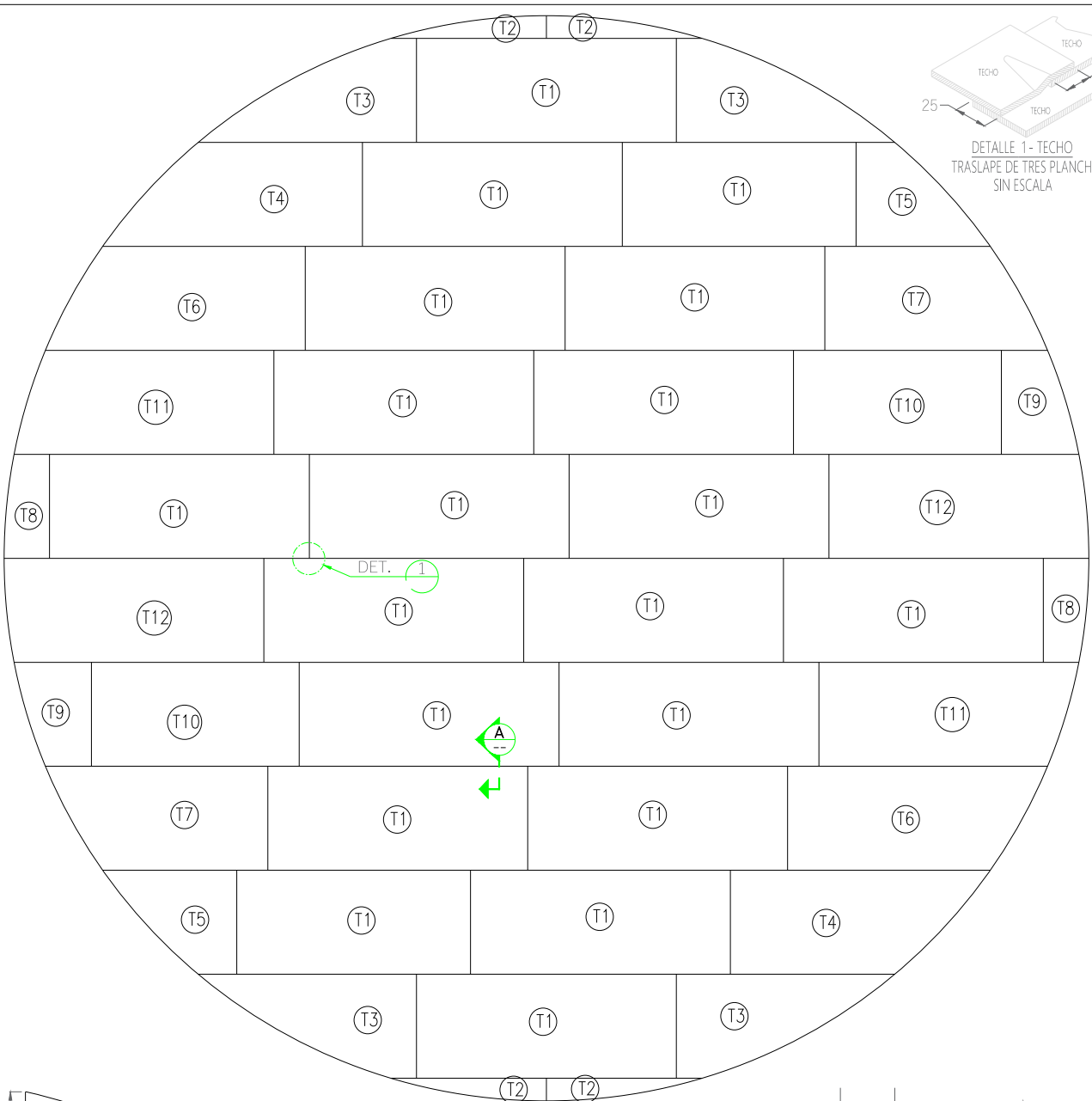
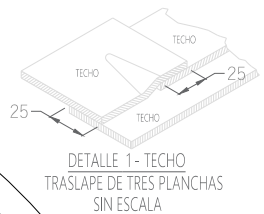


DESARROLLO DEL CILINDRO (13 PLANCHAS POR ANILLO)

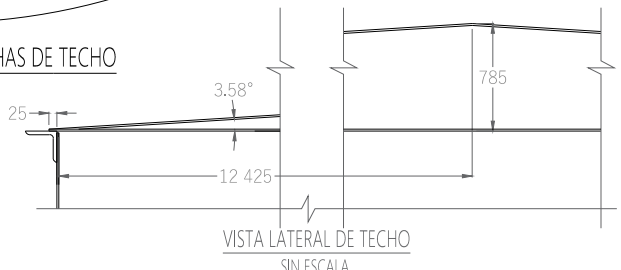
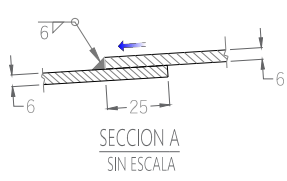
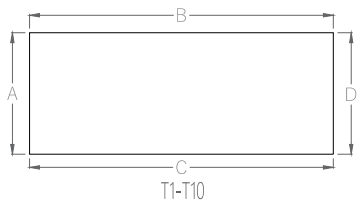
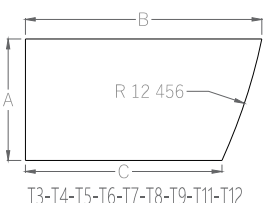
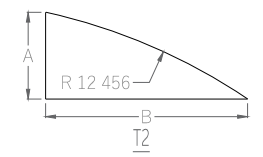


DETALLE DEL CILINDRO - TANQUE CONTRAINCENDIO DE REFINERÍA IQUITOS						
ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	ESPESOR	CANTIDAD	LONG. "A"	LONG. "B"
P1	Planchas del primer anillo	ASTM A36	12,5mm	13	6 000mm	2 400mm
P2	Planchas del segundo anillo	ASTM A36	12mm	13	6 000mm	2 400mm
P3	Planchas del tercer anillo	ASTM A36	8mm	13	6 000mm	2 400mm
P4	Planchas del cuarto anillo	ASTM A36	6mm	13	6 000mm	2 400mm
P5	Planchas del quinto anillo	ASTM A36	6mm	13	6 000mm	2 400mm
P6	Planchas del sexto anillo	ASTM A36	6mm	13	6 000mm	1 100mm
R1	Ángulo de rigidez	ASTM A36	12,5mm	13	100mm	100mm

Autor	Froylan Gonzales Bautista	15-08-2025	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN			
Proyecto	Diseño de Tanque Contra incendio de Refinería Iquitos					
Escala	1:150		Unidad	mm	Lamina	
	DETALLE DE CILINDRO - TANQUE CONTRA INCENDIO		Tamaño	A4	3 de 6	



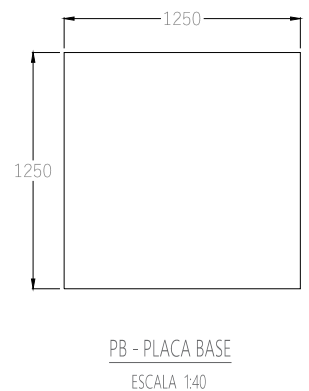
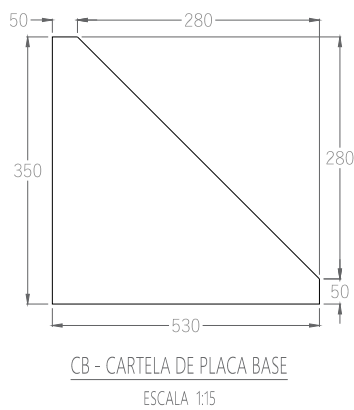
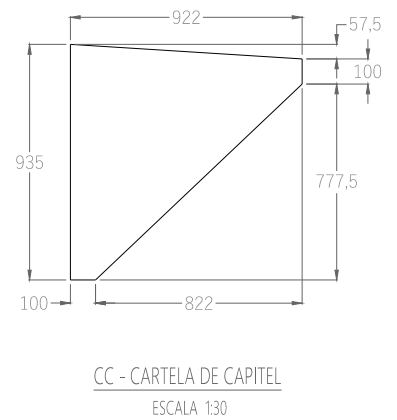
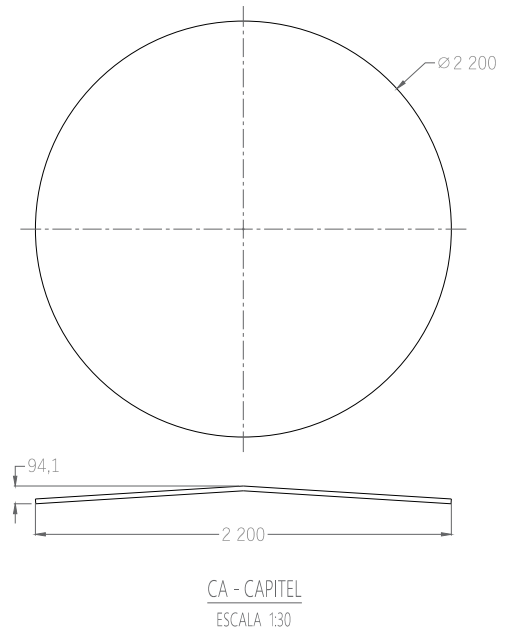
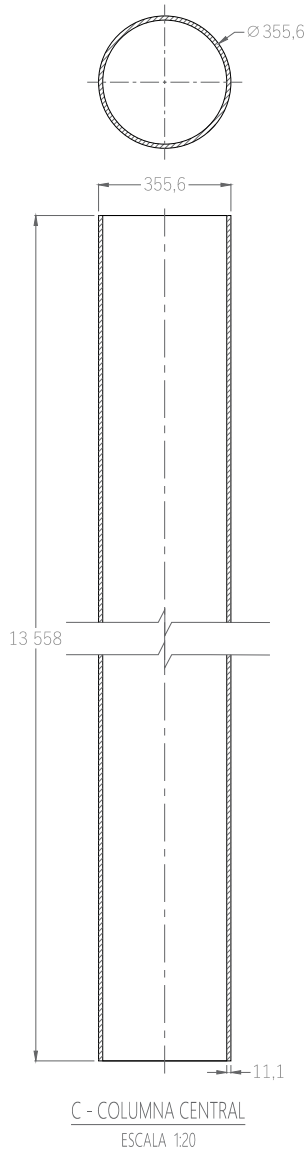
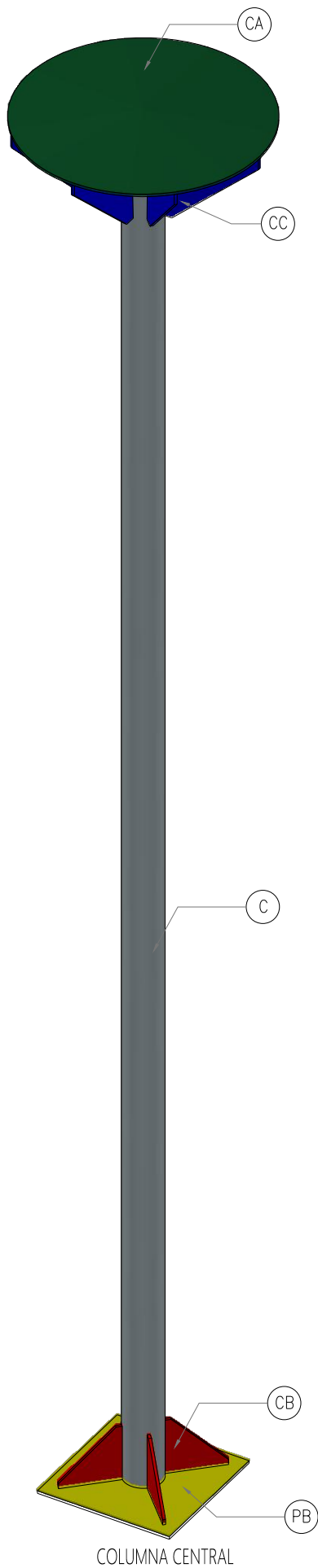
DISTRIBUCIÓN DE PLANCHAS DE TECHO



DETALLE DE TECHO - TANQUE CONTRAINCENDIO DE REFINERÍA IQITOS

ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	ESPESOR	CANTIDAD	LONG. "A"	LONG. "B"	LONG. "C"	LONG. "D"
T1	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	20	2 400mm	6 000mm	6 000mm	2 400mm
T2	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	4	525mm	3 588mm	-	-
T3	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	4	2 400mm	5 045mm	588mm	-
T4	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	2	2 400mm	6 000mm	3 796mm	-
T5	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	2	2 400mm	893mm	3 097mm	-
T6	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	2	2 400mm	6 000mm	4 680mm	-
T7	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	2	2 400mm	3 817mm	5 138mm	-
T8	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	2	2 400mm	1 050mm	818mm	-
T9	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	2	2 400mm	5 024mm	5 275mm	-
T10	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	2	2 400mm	4 800mm	4 800mm	2 400mm
T11	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	2	2 400mm	6 000mm	5 276mm	-
T12	Planchas de techo	ASTM A36	6mm	2	2 400mm	5 768mm	6 000mm	-

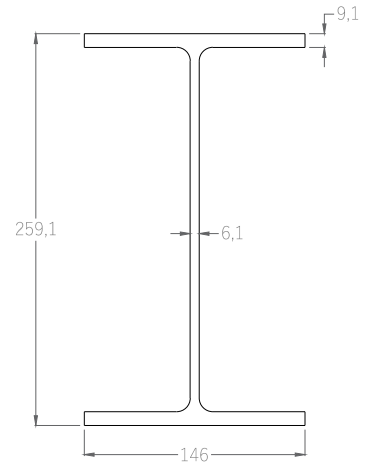
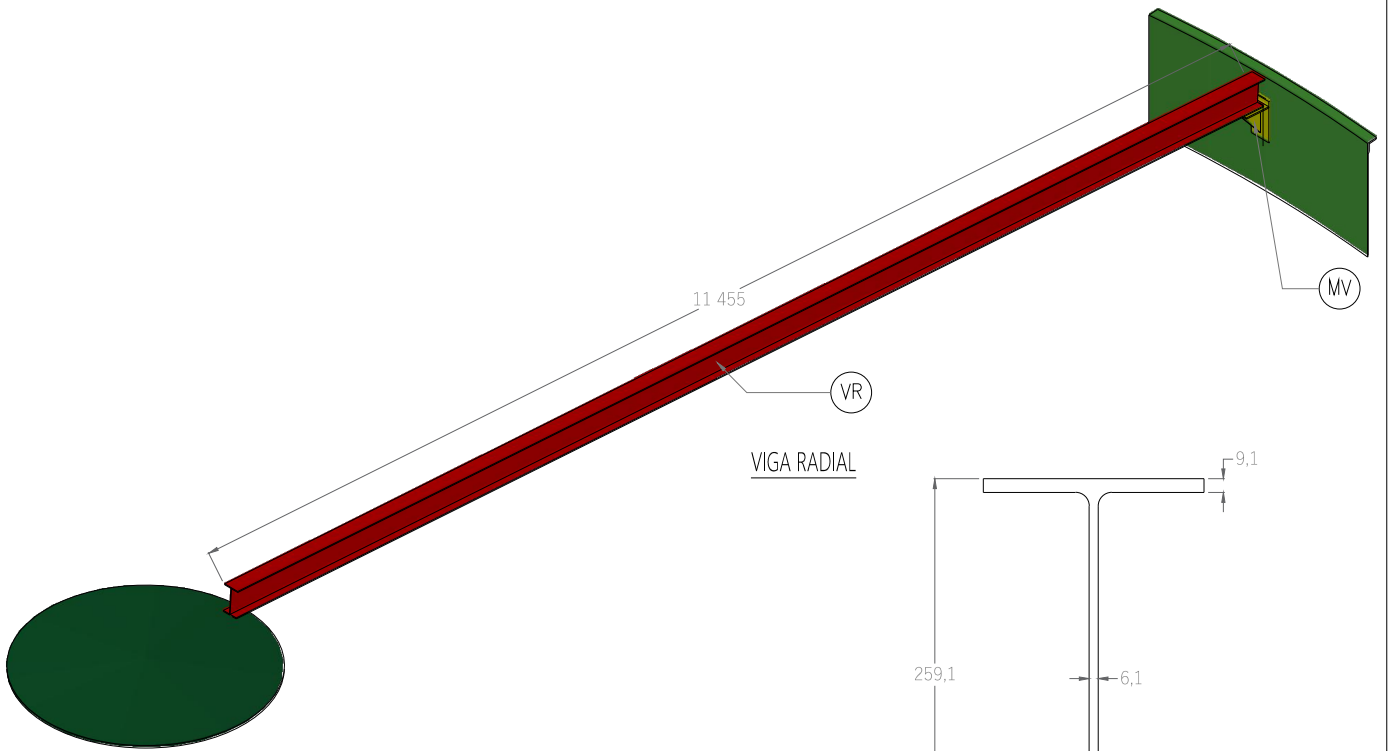
Autor	<i>Froylan Gonzales Bautista</i>	<i>15-08-2025</i>	UNIVERSIDAD NACIONAL			
Proyecto	<i>Diseño de Tanque Contraincendio de Refinería Iqitos</i>		JORGE BASADRE GROHMANN			
Escala	DETALLE DE TECHO - TANQUE CONTRAINCENDIO		Unidad	mm	Lamina	
1:150			Tamaño	A4	4 de 6	



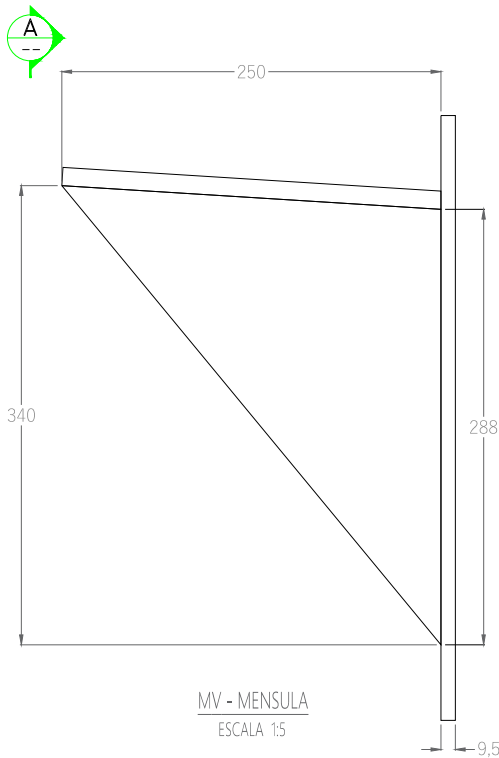
COLUMNA CENTRAL

DETALLE DE COLUMNA CENTRAL - TANQUE CONTRAINCENDIO DE REFINERÍA IQITOS					
ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	ESPESOR	CANTIDAD	COMENTARIO
C	Columna central	ASTM A53 GR.B	11,1mm	1	Tubería Ø14" sch.40
PB	Placa base	ASTM A36	25,4mm	1	-
CB	Cartela de placa base	ASTM A36	12,5mm	4	-
CC	Cartela de capitel	ASTM A36	25,4mm	8	-
CA	Capitel	ASTM A36	25,4mm	1	-

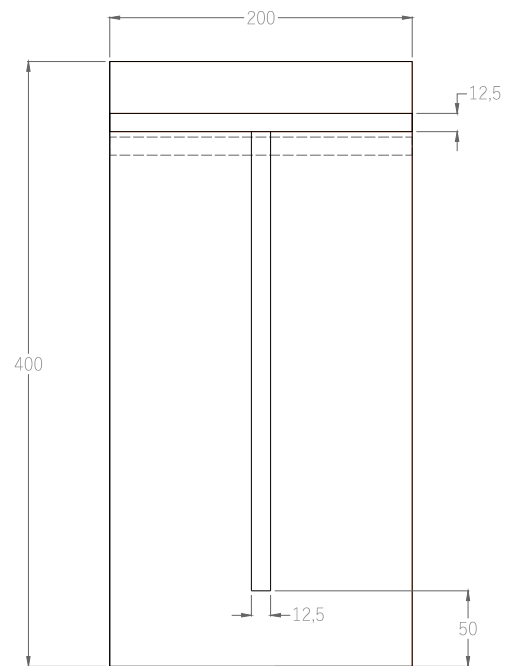
Autor	Froylan Gonzales Bautista	15-08-2025	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN			
Proyecto	Diseño de Tanque Contra incendio de Refinería Iqitos					
Escala 1:50	COLUMNA CENTRAL - TANQUE CONTRA INCENDIO		Unidad	mm	Lamina	
			Tamaño	A4	5 de 6	



VR - VIGA RADIAL
ESCALA 1:5



MV - MENSULA
ESCALA 1:5



SECCION A
ESCALA 1:5

DETALLE DE VIGA RADIAL - TANQUE CONTRAINCENDIO DE REFINERÍA IQUITOS				
ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	COMENTARIO
VR	Viga radial	ASTM A36	38	Perfil W10x22
MV	Mensula de soporte para viga radial	ASTM A36	38	Planchas de espesor de 12,5mm y 9,5mm

<i>Autor</i>	<i>Froylan Gonzales Bautista</i>	<i>15-08-2025</i>	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN		
<i>Proyecto</i>	<i>Diseño de Tanque Contra incendio de Refinería Iquitos</i>				
<i>Escala</i> 1:60	VIGA RADIAL -TANQUE CONTRAINCENDIO		<i>Unidad</i> mm	<i>Lamina</i> 6 de 6	
			<i>Tamaño</i> A4		