

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN
SISTEMA PLATAFORMA-TANQUE CON
AGITADOR DE 1000 METROS CÚBICOS DE
CAPACIDAD PARA EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN
DE ORO UTILIZANDO LA NORMA API 650 -2020 Y
AISC -14va EDICIÓN**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniera Mecánica

AUTORA

Valeria Beatriz Abad Vidal (ORCID: 0009-0007-8063-4036)

ASESOR

Helard Henry Álvarez Sanchez (ORCID: 0000-0003-4150-9156)

Lima – Perú

2024

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Mónica Cecilia Santa María Fuster identificada con DNI No 18226712 en mi condición de autoridad responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA, DECLARO BAJO JURAMENTO:

Que la tesis denominada “DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN SISTEMA PLATAFORMA-TANQUE CON AGITADOR DE 1000 METROS CÚBICOS DE CAPACIDAD PARA EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE ORO UTILIZANDO LA NORMA API 650 -2020 Y AISC -14va EDICIÓN” ha sido elaborada por la señorita Valeria Beatriz Abad Vidal, con la asesoría de Helard Henry Álvarez Sánchez, identificado con DNI 25564293, y que se presenta para obtener el título profesional de Ingeniero mecánico, ha sido sometida a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la universidad, encontrándose un porcentaje de similitud de 1%.

En fe de lo cual firmo la presente.



Dra. Mónica Santa María Fuster
Directora de Investigación

En Barranco, el 20 de junio 2024

Dedicatoria:

A mi madre, Gina Vidal, quien me ha apoyado y brindado ánimos en el trayecto de mi carrera y trabajo, con sus consejos maravillosos y sonrisa deslumbrante. A mi padre, Vinko Abad, que sé que me está observando desde allá arriba, quien me compartió todos sus conocimientos, motivándome a seguir adelante a pesar de la adversidad, y sembró en mí la curiosidad que caracteriza a todo ingeniero. Y a mis hermanas que me acompañaron en mis noches en vela.

Agradecimientos:

Agradezco a mis padres quienes fueron mi motivación e inspiración, y a mis hermanas quienes me llevaron a la superación. Agradezco a mi institución por brindarme los conocimientos y oportunidades para conocer el mundo. Al Patronato BCP por el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera. Agradezco también a todos mis profesores, mentores y asesores por sus consejos y apoyo con la finalidad de realizar este trabajo, representando el fin e inicio de una etapa.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	18
CAPÍTULO I	23
MARCO TEÓRICO	23
1.1. Proceso de lixiviación de oro	23
1.1.1. Proceso Heap Leaching	25
1.1.2. Proceso Tank Leaching	26
1.1.3. Proceso Merrill Crowe	27
1.2. Material: Acero bajo en carbono	28
1.3. Tanques Agitadores	29
1.3.1. Funciones principales	31
1.3.2. Características en la lixiviación de oro	31
1.3.3. Capacidad del tanque	32
1.3.4. Peso específico	32
1.3.5. Diseño del tanque	33
1.3.6. Espesor de la pared del tanque	35
1.4. Componentes del tanque agitador	36
1.4.1. Motor - reductor	36
1.4.2. Selección motor - reductor	37

1.4.3. Potencia	38
1.4.4. Torque	38
1.4.5. Eje	39
1.4.6. Estructura soporte base del tanque	39
1.4.7. Accesorios del tanque agitador	39
1.5. Aplicación de esfuerzos en el tanque	40
1.5.1. Esfuerzo tangencial y longitudinal	41
1.5.2. Esfuerzo promedio y resultante	41
1.6. Aplicación de esfuerzos en eje y estructura	42
1.7. Modelo de flujo dentro del tanque agitador	42
1.7.1. Flujo axial, radial y tangencial	43
1.7.2. Placas deflectoras	43
1.7.3. Tipos de mezclado en el proceso de agitación	44
1.8. Agitadores y su clasificación	45
1.8.1. Agitador de pala	47
1.8.2. Agitador de turbina	48
1.8.3. Agitador de hélice	48
1.8.4. Agitador de ancla	49
1.9. Diseño del agitador	50
1.10. Ubicación y condiciones meteorológicas	52
1.11. Norma API 650	53
1.11.1. Criterios de diseño	54
1.11.2. Espesor de la pared del tanque	55
1.11.3. Fondo del tanque	57

1.11.4. Análisis de estabilidad del tanque	57
1.11.5. Peso específico del tanque	57
1.11.6. Virolas o anillos	58
1.11.7. Acción sísmica	62
1.11.7.1. Movimiento del fluido dentro del tanque	62
1.11.7.2. Parámetro del movimiento del suelo	63
1.11.7.3. Periodo estructural de vibración	63
1.11.7.4. Ecuación anclaje al suelo	64
1.11.7.5. Cálculo de cargas sobre la pared del tanque	65
1.11.7.6. Momento sísmico en la base del tanque	66
1.11.8. Parámetros del movimiento del suelo	67
1.11.8.1. Grupo de uso sísmico (SUG)	69
1.11.8.2. Cálculo de aceleraciones espectrales de diseño	70
1.11.8.3. Centro de acción para las fuerzas laterales efectivas	72
1.11.9. Acción eólica	74
1.11.10. Acción nival y pluvial	78
1.11.11. Seguridad del tanque contra deslizamiento	78
1.11.12. Plataforma del tanque agitador	79
1.12. Código ASME	80
1.13. Norma AISC	81
1.13.1. Definición de cargas presentes en la viga	82
1.13.2. Método LRFD	84
1.13.3. Definición de estados de carga	84
1.13.4. Combinaciones de cargas	86

1.13.5. Verificación de resistencia	87
1.13.6. Análisis por flexión	88
1.13.6.1. Carga viva	88
1.13.6.2. Carga muerta	91
1.13.7. Verificación de deflexiones	91
1.14. Background del software para el análisis del diseño	93
1.14.1. SimSolid	93
1.14.1.1. Análisis matemático por elementos finitos	94
1.14.2. RFEM	96
CAPÍTULO II	97
MARCO METODOLÓGICO	97
2.1. Tipo y enfoque de investigación	97
2.2. Fuentes y Técnicas de recolección de información	97
2.3. Componentes de la investigación	98
2.4. Diagrama de flujo	99
2.5. Fase 1: Determinación de diseño y requerimientos funcionales	100
2.5.1. Requerimientos de diseño	100
2.5.2. Matriz morfológica	102
2.5.3. Especificaciones de diseño	105
2.6. Fase 2: Diseño del tanque agitador	105
2.6.1. Requerimientos de la norma API 650	106
2.6.1.1. Dimensionamiento del tanque agitador	106
2.6.2. Espesor de la pared del tanque	107
2.6.3. Virolas o anillos del tanque	107

2.6.4. Cargas del tanque: peso específico	107
2.6.5. Análisis para la estabilidad del tanque: Acción sísmica	108
2.6.6. Análisis para la estabilidad del tanque: Acción eólica	108
2.7. Fase 3: Selección de componentes del tanque	109
2.7.1. Selección del motor - reductor	110
2.7.2. Características de los componentes del tanque	110
2.8. Fase 4: Diseño de la plataforma	112
2.8.1. Requerimientos norma AISC	112
2.8.2. Identificación de cargas	112
2.8.3. Selección de perfil de viga	113
2.9. Fase 5: Modelado y simulación del sistema	113
2.9.1. Modelado y simulación del diseño solo con plataforma	114
2.9.2. Modelado y simulación del diseño del sistema plataforma - tanque	114
2.10. Fase 6: Validación del diseño	114
2.10.1. Simulación del diseño solo plataforma	115
2.10.2. Simulación del diseño como sistema plataforma - tanque	115
2.11. Fase 7: Análisis de integración de normativa	116
CAPÍTULO III	117
RESULTADOS	117
3.1. Diseño del tanque agitador	117
3.1.1. Dimensionamiento del tanque	118
3.1.2. Peso específico del tanque	120
3.1.3. Análisis para la estabilidad del tanque: acción sísmica	121
3.1.4. Análisis para la estabilidad del tanque: acción eólica	125

3.2. Selección de componentes del tanque	128
3.3. Diseño de la plataforma	129
3.3.1. Método LRFD - Análisis por flexión	130
3.3.2. Método LRFD - Análisis por deflexión	133
3.3.3. Selección del perfil de viga	134
3.4. Modelado y simulación del sistema	135
3.4.1. Simulación de la plataforma y sistema en SimSolid	136
3.4.2. Simulación del sistema en RFEM	142
3.5. Análisis de integración de normativa	143
CONCLUSIONES	145
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
ANEXOS	155

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de los componentes secundarios del tanque	29
Tabla 2. Medidas de planchas comerciales acero A36	34
Tabla 3. Valores del agitador estándar tipo turbina	52
Tabla 4. Condiciones meteorológicas de la zona del proyecto	53
Tabla 5. Espesor mínimo del tanque	55
Tabla 6. Perfiles de coronamiento mínimo según la norma API 650	58
Tabla 7. Módulos de sección según la norma API 650 (Tabla 5.19a)	61
Tabla 8. Módulos de sección según la norma API 650 (Tabla E.1)	69
Tabla 9. Factor de importancia según la norma API 650 (Tabla E.5)	70
Tabla 10. Factor de modificación de respuesta según la norma API 650 (Tabla E.4)	72
Tabla 11. Ratio de anclaje según la norma API 650 (Tabla E.6)	73
Tabla 12. Valores de los componentes secundarios sobre la plataforma	83
Tabla 13. Cargas y combinaciones de cargas LRFD	86
Tabla 14. Factores de resistencia	87
Tabla 15. Ecuaciones de diseño	87
Tabla 16. Matriz de necesidades	102
Tabla 17. Matriz morfológica	103
Tabla 18. Selección del sistema	104
Tabla 19. Parámetros del contenido	105
Tabla 20. Medidas finales del tanque	119

Tabla 21. Parámetros del motor - reductor	128
Tabla 22. Parámetros generales de los componentes del tanque	129
Tabla 23. Valores de los componentes de la carga viva y muerta	130
Tabla 24. Valores de las cargas distribuidas	130
Tabla 25. Valores de inercia y deflexión según el perfil de viga	134
Tabla 26. Valores del perfil de viga W14x74	135

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Producción de oro	24
Figura 1.2. Representación de pilas de lixiviación	25
Figura 1.3. Planta de Cianuración con Circuito CCD	26
Figura 1.4. Composición de un tanque mezclador	30
Figura 1.5. Relación geométrica en distintos impulsores	34
Figura 1.6. Proceso de Heap Leaching en tanques agitadores	35
Figura 1.7. Conexiones de un tanque agitador según la norma API 650	40
Figura 1.8. Representación de flujo axial, radial y tangencial	43
Figura 1.9. Disposición de los deflectores	44
Figura 1.10. Homogeneización de dos fluidos	45
Figura 1.11. Patrones de flujo en sistemas de agitación	46
Figura 1.12. Agitador tipo pala	47
Figura 1.13. Agitador tipo turbina	48
Figura 1.14. Agitador tipo hélice	49
Figura 1.15. Agitador pala tipo ancla	50
Figura 1.16. Selección de tipo de agitador	51
Figura 1.17. Combinaciones de anillos atiesadores según la norma API 650	59
Figura 1.18. Movimiento horizontal en tanque rígido	62
Figura 1.19. Coeficiente de periodo impulsivo según la norma API 650	64
Figura 1.20. Zonas sísmicas del Perú	67

Figura 1.21. Diagrama de vuelco de tanque sin anclar	76
Figura 1.22. Modelo de plataforma de acceso sobre el tanque	80
Figura 1.23. Ecuación básica de diseño LRFD	85
Figura 1.24. Diagrama de cargas sobre la viga	89
Figura 1.25. Ejemplo de diseño estructural en SimSolid	94
Figura 1.26. Ejemplo de diseño estructural en RFEM 6	96
Figura 2.1. Diagrama de flujo de la investigación	100
Figura 2.2. Proceso de determinación de diseño y requerimientos funcionales	100
Figura 2.3. Estructura del circuito de cianuración con tanque agitador	104
Figura 2.4. Proceso de diseño del tanque agitador	105
Figura 2.5. Proceso de selección de componentes del tanque	109
Figura 2.6. Modelo de barandas y escaleras sobre el tanque	111
Figura 2.7. Proceso de diseño de plataforma	112
Figura 3.1. Motor eléctrico W22 WEG	128
Figura 3.2. Dimensiones de una viga	135
Figura 3.3. Diseño de estudio estructural de los tres perfiles de viga en SimSolid	137
Figura 3.4. Diseño de estudio estructural en SimSolid	138
Figura 3.5. Estudio estructural del sistema en SimSolid	139
Figura 3.6. Estudio estructural de las tres propuestas del sistema en SimSolid	141
Figura 3.7. Estudio estructural del sistema en RFEM	143

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Ecuaciones de una viga simplemente apoyada	156
Anexo 2: Cálculo de dimensiones del tanque	157
Anexo 3: Composición de planchas de acero	158
Anexo 4: Propiedades del motor eléctrico WEG	159
Anexo 5: Dimensionamiento de barandas y pasamanos	160
Anexo 6: Cálculo de perfil de viga	162
Anexo 7: Propiedades del perfil de viga W14x74	166
Anexo 8: Diseño de perfil de viga y estructura	167
Anexo 9: Composición de la plataforma	168
Anexo 10: Diseño de plataforma	169
Anexo 11: Modelado del sistema plataforma - tanque	170
Anexo 12: Análisis de perfil de viga W10x39	171
Anexo 13: Análisis de perfil de viga W10x112	172
Anexo 14: Análisis de perfil de viga W14x74	173
Anexo 15: Análisis de primera propuesta de diseño con planchas en SimSolid	174
Anexo 16: Análisis de segunda propuesta de diseño con columnas en SimSolid	175
Anexo 17: Análisis de tercera propuesta de diseño con refuerzos en SimSolid	176
Anexo 18: Análisis de plataforma con perfil de viga W14x74 en SimSolid	177
Anexo 19: Análisis de sistema plataforma - tanque en SimSolid	178

RESUMEN

El uso de tanques agitadores en la industria peruana es variado, pero solo algunas empresas cuentan con plataformas para operarlos [1]. En el sector minero, se emplean tanques agitadores para la lixiviación de oro, donde la eficiencia y calidad del proceso son cruciales, especialmente en proyectos en desarrollo [5]. No obstante, la combinación de dos normativas de diseño diferentes, API 650 para el tanque, y AISC para la plataforma, presenta un desafío y riesgo estructural significativo. Esta tesis evalúa la integración de ambas normativas en el diseño de un tanque agitador con plataforma.

El enfoque tiene tres etapas clave. La primera consta del diseño del tanque, determinando sus dimensiones y características óptimas de funcionamiento. La segunda etapa consiste en la identificación de cargas en la plataforma, aplicando el método LRFD de AISC, seleccionando el perfil de viga adecuado. Finalmente, en la tercera etapa se lleva a cabo un análisis estructural para validar la fiabilidad del diseño utilizando software especializado como SimSolid y RFEM. Todo esto, con el fin de determinar si el diseño de sistema con ambas normas es capaz de permitir una buena ingeniería.

Para evaluar la deformación del sistema y la integridad de la unión debido a las diferentes normativas, se utilizó una plataforma con una viga W14x74 para distribuir mejor las cargas y optimizar el diseño de un tanque de 12x12 metros. Los resultados obtenidos permiten establecer un proceso estándar de diseño de ingeniería para este sistema, permitiendo su análisis para otros tanques agitadores.

PALABRAS CLAVES:

Tanque; Agitador; Plataforma; Diseño; API 650; AISC; Método LRFD; SimSolid; RFEM

ABSTRACT

DESIGN AND STRUCTURAL ANALYSIS OF A PLATFORM-TANK SYSTEM WITH AGITATOR OF 1000 CUBIC METERS CAPACITY FOR GOLD LEACHING PROCESS USING API 650 - 2020 AND AISC – 14th EDITION

The use of agitator tanks in the Peruvian industry is varied, but only a few companies have platforms to operate them [1]. In the mining sector, agitator tanks are used for gold leaching, where the efficiency and quality of the process are crucial, especially in development projects [5]. However, the combination of two different design standards API 650 for the tank, and AISC for the platform, presents a significant structural challenge and risk. This thesis evaluates the integration of both standards in the design of a agitator tank with platform.

The approach has three key stages. The first consists of the design of the tank, determining its dimensions and optimum operating characteristics. The second stage consists of the identification of platform loads, applying the AISC LRFD method, selecting the appropriate beam profile. Finally, in the third stage, a structural analysis is carried out to validate the reliability of the designed using specialized software such as SimSolid and RFEM. All this, in order to determine whether the system design with both standards is able to allow good engineering.

To evaluate the deformation of the system and the integrity of the joint due to the different regulations, a platform with a W14x74 beam was used to better distribute the loads and optimize the design of a 12x12 meter tank. The results obtained allow establishing a standard engineering design process for this system, allowing its analysis for other agitator tanks.

KEYWORDS:

Tank; Agitator; Platform; Design; API 650; AISC; LRFD Method; SimSolid; RFEM

INTRODUCCIÓN

La actividad minera consiste en la extracción y procesamiento de minerales y metales preciosos, tales como el oro, cobre, plata, entre otros. Dicha actividad desempeña un papel muy importante en la economía peruana, al igual que las exportaciones del mismo país, llegando a representar el 16% del PBI peruano entre los años 2017 y 2021 [2]. En las últimas dos décadas, el sector minero peruano ha incrementado su calidad de producción en cobre y oro, dando como resultado el incremento de la inversión privada en su sector, llegando a multiplicarse cinco veces más, pasando de un valor aproximado de medio millón a dos y medio millones de toneladas métricas de cobre fino, lo cual conlleva al incremento de producción del cobre, logrando ser un importante y segundo productor de oro y cobre en el mundo [3]. Dado que el sector minero presenta incrementos, es necesario tener un óptimo funcionamiento en los equipos del sector, para mantener así su alta producción, continua y estable.

Según el Boletín Estadístico Minero [4], alrededor del 15% de las empresas mineras formales en el Perú se dedican a la producción y exportación de oro, el mineral más comercializado y valioso. Por consiguiente, es preciso analizar el proceso de extracción de oro, comprender su funcionamiento actual y considerar sus proyecciones futuras.

Para llevar a cabo esta actividad minera, se emplean diversos métodos de procesamiento de minerales con el fin de obtener extracciones puras. Uno de los procesos más comunes es la lixiviación, que implica el uso de disolventes para separar el relave o material no valioso de los metales preciosos, en un proceso conocido como “*Cyanidation leaching process*”. Dentro de la lixiviación, existen dos enfoques principales: la lixiviación en pilas (“*Heap leaching*”) y la lixiviación en tanques (“*Tank leaching*”).

En un estudio realizado el 2021, presentado en el evento LACCEI el año 2023 [5], se menciona que, de las seis principales empresas mineras productoras de oro en el Perú, el 50% de ellas hacía uso del proceso de lixiviación de oro por cianuración mediante pilas, y el otro 50% con tanques agitadores. Del total, cuatro de ellas usaban el proceso de Merrill Crowe

para la recuperación del mineral posterior a la cianuración, siendo la extracción más pura y con menos costos comparándolo con el ADR.

Con una proyección a futuro junto a la evolución de las empresas mineras que procesan oro, y con el desarrollo y origen de otras, se debe tomar en cuenta los nuevos procesos de lixiviación de oro que van a ser incorporados en ellas. Dentro del proceso, el uso de tanques agitadores ha comenzado a superar y ser mejor que el uso de lixiviación en pilas, por espacio y costos. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es diseñar y analizar la estructura de un sistema plataforma-tanque en el proceso de lixiviación de oro, con una capacidad de 1000 metros cúbicos. Las vigas o plataforma que sostienen los componentes del equipo descansan sobre la pared del tanque, en la cual reposarán los equipos que hacen accionar el tanque, y la capacidad determinada es para mantener una medida estándar y flexible.

El análisis de la capacidad del tanque en la presente investigación se ha definido sobre la base de los trabajos de investigación [18] [49], en los que se emplearon tanques agitadores menores a la capacidad establecida, con 160 metros cúbicos [18], como una mayor equivalente a los 3336 metros cúbicos [49]. Por ello es que se optó por un número con el que se pueda manejar y aproximar con facilidad la capacidad del tanque de acuerdo a las necesidades del cliente o empresa minera. Así también, el procedimiento presentado servirá de referencia para el análisis y diseños futuros en el sector.

Como se mencionó en un inicio, el sector minero emplea tanques agitadores para la lixiviación del oro, el cual se compone de un sistema plataforma-tanque, es crucial asegurar la eficiencia y calidad del proceso en todo equipo, especialmente si se encuentra en proyecto y desarrollo. El sistema cuenta con un riesgo estructural al combinar dos normativas de diseño diferentes, API 650 del año 2020, y AISC versión 14. Al ser un contexto en desarrollo, se plantea en este trabajo la evaluación de la fusión de ambas normativas en el diseño de un tanque agitador con plataforma.

La combinación de estas dos normativas en un solo sistema da lugar a incongruencias en la fusión de los elementos. Estas son las siguientes:

- Falta de recomendación o soporte definido entre plataforma y tanque.
- Inexistencia de definición de una longitud mínima de viga de plataforma al sobrepasar el diámetro del tanque.
- Falta de definición de un espesor mínimo de la estructura del tanque recomendable para el soporte de la viga.
- Estos problemas han sido identificados y estudiados en otros trabajos [18] [49], que brindan recomendaciones precisas para el diseño de empresas mineras con capacidades específicas.

Las incongruencias presentadas pueden ocasionar fallas en el diseño y la estructura al ser sometidos a cargas, como abollamiento de la estructura del tanque o el aplastamiento del alma de la viga de la plataforma. Con lo expuesto, esta tesis también se propone evaluar el análisis de cargas en la estructura del tanque, así como la reacción y consecuencias de la unión de ambos cuerpos o estructuras en un solo sistema.

Problemática

La problemática encontrada es que a la fecha no se cuenta con la elaboración de requerimientos entre ambas normativas que permitan la unión entre la plataforma y el tanque, que permite elongar la vida útil del equipo, calidad y operación de la producción, cuidando la seguridad del personal operativo y de mantenimiento.

Alcance

Como alcance del presente trabajo se realizará el análisis del diseño estructural del tanque agitador de 1000 metros cúbicos como recipiente, utilizando diversas normas o estándares para el sistema, especialmente la norma API 650 del año 2020. En cuanto la plataforma que reposa sobre el tanque, se hará uso de la norma ASME sección VIII división 2, y AISC método LRFD 14va edición, enfocándose en que el diseño cumpla con los estándares de diseño y fabricación establecidos. En este sentido, este trabajo tendrá un alcance metodológico de tipo descriptivo – explicativo, debido a que se revisará

exhaustivamente los procesos involucrados y se detallarán con precisión los efectos en cada uno, al igual que el análisis estructural.

La limitación para la realización del presente trabajo es la confidencialidad de los datos de las empresas mineras que no permitieron manejar la precisión de la información técnica, al igual que la escasez de antecedentes en el sector.

Para un correcto dimensionamiento, en el presente trabajo se empleó el uso de softwares para el modelado y análisis estructural del sistema, tales como SolidWorks, SimSolid y RFEM. Para ello, primero se definió y conoció los conceptos del proceso de lixiviación de oro y tanques agitadores, al igual que las variaciones existentes en función del agitador y componentes. Segundo, se determinaron las variables de inicio a considerar en base a la norma API 650, definiendo la metodología a aplicar. Tercero, se procedió con el cálculo del diseño estructural del tanque con la norma API 650, y con la norma AISC, el cálculo de la plataforma que soportará los componentes del tanque. Cuarto, la estructura fue diseñada en SolidWorks y validada en SimSolid, analizando los puntos de apoyo de la plataforma con la estructura del tanque, siendo el punto crítico e importante por analizar en este trabajo. Quinto, se corroboró que los cálculos realizados en base a la norma API 650 sean aceptados utilizando el software RFEM. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos.

Objetivo general

Mejorar el proceso de diseño de ingeniería para la lixiviación de oro con una capacidad de 1 000 metros cúbicos, integrando la normativa API 650 y AISC.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos definidos para el desarrollo de la tesis son los siguientes:

- Analizar el proceso de lixiviación de oro, con enfoque en el uso de tanques agitadores en la industria minera peruana

- Identificar los componentes clave y funcionalidad actual de los tanques agitadores.
- Investigar las normativas relevantes relacionadas con el diseño y operación de sistema plataforma-tanque en la industria de extracción de oro.
- Diseñar un sistema plataforma-tanque específico para el proceso de lixiviación de oro, considerando las necesidades de capacidad de 1000 metros cúbicos siguiendo la norma API 650 y AISC.
- Evaluar las cargas estáticas y dinámicas involucradas en la estructura del tanque y la plataforma.
- Validar el diseño propuesto mediante pruebas y simulaciones, haciendo uso de herramientas de análisis estructural como SolidWorks, SimSolid y RFEM.
- Analizar la integración efectiva entre plataforma y el tanque agitador, para identificar la falta de requerimientos dentro de la normativa que faciliten esta unión.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan todos los aspectos de la literatura fundamentales para el desarrollo y resultado del presente trabajo. Se inicia con la definición del proceso de lixiviación de oro, detallando los dos métodos predominantes en la actualidad: el *Heap leaching* y el *Tank Leaching*. Además, se abordó el concepto los tanques agitadores, su clasificación, características distintivas, cuáles son las funciones que cumplen y los criterios que deben ser tomados en cuenta para su correcta implementación. Posteriormente, se presentará un resumen de las principales normativas y ecuaciones que van a guiar la evaluación del diseño propuesto.

1.1. Proceso de lixiviación de oro

En una operación minera de extracción de oro, el proceso inicia en el área de chancado, donde el mineral extraído del terreno se tritura para reducir su tamaño. La mena triturada se transporta a la planta de molienda, donde se reduce aún más el tamaño de las partículas. Estos dos procesos ,chancado y molienda, están ubicados en la trituración según la **Figura 1.1**. La planta de lixiviación de oro se ubica generalmente cerca del área para facilitar el flujo eficiente de material entre estas etapas. Ahí mismo, se prepara la solución cianurada y se aplica al mineral triturado para iniciar el proceso de extracción o recuperación del oro. En base del método de lixiviación utilizado, la disposición física de la planta puede variar. En las minas peruanas, predominan dos métodos: la lixiviación en pilas (*Heap leaching*) y la lixiviación en tanques (*Tank leaching*) [6]. La primera implica apilar grandes cantidades de mineral triturado en capas, sobre las cuales se rocía una solución cianurada. Por otro lado, la lixiviación en tanques agitadores se realiza en recipientes continuos, permitiendo un control más preciso de las condiciones en el proceso. En el Perú, el proceso de lixiviación juega un papel fundamental dentro de la minería, como para la producción

final o refinación de lingotes de oro. Comúnmente, se utiliza la técnica de lixiviación con solución de cianuro, con el cianuro de sodio como la sustancia química clave [6].

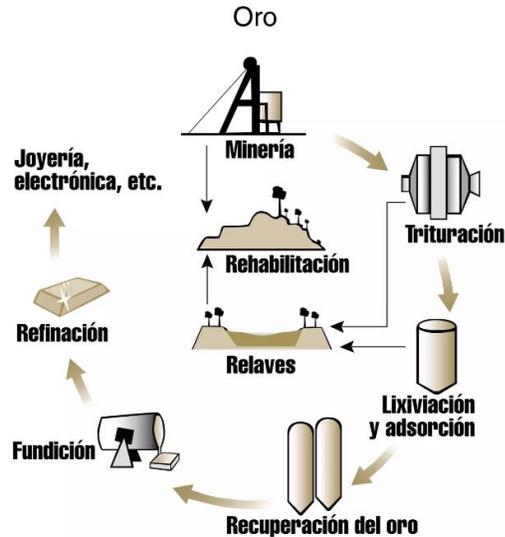


Figura 1.1. Producción de oro. De [7]

En términos generales, la lixiviación es el proceso de extraer un sólido de otro sólido en un medio líquido. En el contexto de la extracción de oro, el sólido a extraer es el oro fino contenido en la roca, y la solución líquida utilizada es cianurada, compuesta por cianuro de sodio disuelto en agua. Es crucial subrayar que el agua empleada debe poseer un pH elevado, superior a diez, para prevenir la formación de ácido cianhídrico, una sustancia altamente peligrosa. La función de la solución cianurada es reaccionar con el mineral, desprendiendo el oro fino y genera un cianuro doble de sodio de oro, proceso que tiene lugar en una pila o tanque de lixiviación [8].

Este enfoque de lixiviación en la minería peruana no solo busca la eficiencia en la extracción de oro, sino que también se compromete con prácticas ambientales seguras y la gestión responsable de los residuos generados en el proceso, gestión que se encuentra proporcionando el Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente (ICME) [7]. La adaptabilidad de estos métodos a las características específicas de los yacimientos auríferos contribuye a la sostenibilidad y eficacia de la industria minera del oro en Perú.

Según el Boletín Estadístico Minero [4], la lixiviación en tanques agitadores, o por agitación, es uno de los métodos más usados para la recuperación del mineral y separarlo del relave. Por ello, tiene ciertos requerimientos para poder realizar el proceso, los cuales son presentados inclusive en la norma API 650. De ellas, cabe resaltar la importancia en la inyección de oxígeno del medio ambiente en los tanques de agitación para una buena disolución, influenciando en el diseño de la estructura, obteniendo el diseño del tanque agitador sin cubierta.

1.1.1. Proceso Heap Leaching

El proceso minero de “*heap leach*” o lixiviación en pilas es un método convencional de extracción para extraer metales valiosos, con menos inversión inicial y más eficiente en términos de consumo de agua, especialmente común en la minería de tajo abierto [9]. Este proceso es una técnica eficaz para la extracción de metales de minerales de baja ley, pero requiere una gestión cuidadosa de los químicos utilizados y de los residuos, así como medidas de seguridad para minimizar los riesgos ambientales y de salud.

La lixiviación en pilas se ubica después de la trituración del mineral pasando por el chancado y molienda, teniendo el mineral en pequeñas partículas apilado en montones o pilas sobre una capa impermeable en una plataforma de lixiviación. Sobre estas pilas se rocía la solución cianurada, que percola a través del mineral y extrae el oro. Como se observa en la **Figura 1.2**, el montón o pila se encuentra en capas de manera ordenada, de estilo impermeable o geomembrana.

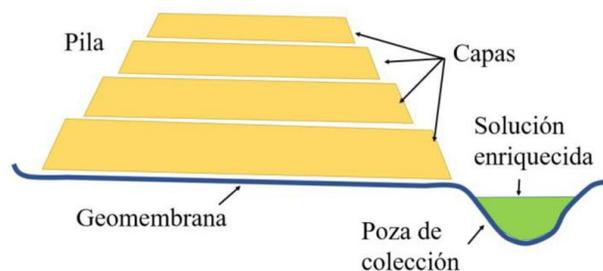


Figura 1.2. Representación de pilas de lixiviación. De [10]

En dicho proceso, también se utiliza comúnmente una solución de cianuro, la cual fluye a través del montón de la pila en la etapa de percolación, disolviendo el metal de interés mientras se desplaza a través de ella. El cianuro pasa por el sólido, separando un sólido de otro sólido mediante una disolución líquida. La solución cargada de oro se acumula en la base del montón, el cual se envía a una planta de procesamiento donde se extrae y recupera el metal. Después de su extracción, la solución lixivante se puede reciclar y reutilizar en el proceso, ayudando a reducir los costos y minimizar el impacto ambiental [6].

1.1.2. Proceso Tank Leaching

En el caso de la lixiviación en tanques, se utilizan recipientes o tanques ubicados en la planta de lixiviación. Los tanques permiten un control más preciso de las condiciones del proceso, y la solución cianurada se mezcla con el mineral en estos tanques. El proceso de lixiviación mostrada en la **Figura 1.3**, se compone de distintos equipos como la chancadora, tolva de gruesos para clasificar los minerales, triturando el mineral para la etapa de molienda y clasificarlo. La solución del mineral va al circuito de precipitación, pasando al uso de los tanques agitadores separando la solución rica del mineral del relave [3].

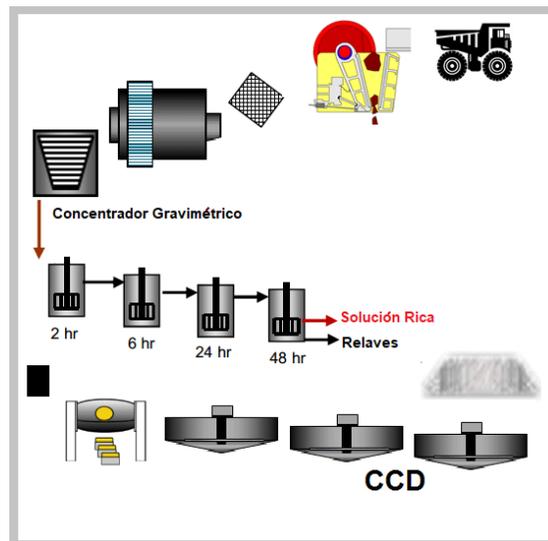


Figura 1.3. Planta de Cianuración con Circuito CCD. De [11]

El proceso de la lixiviación de oro en tanques agitadores es el siguiente: Se inicia colocando el mineral triturado en tanques agitadores, añadiendo en ella la solución lixivante, generalmente cianuro, para disolver el oro. Los tanques en su funcionamiento mantienen la suspensión del mineral y la solución del lixivante, asegurando una mezcla efectiva y una mayor eficiencia en la disolución del oro. Dichos tanques agitadores son abiertos debido a la inyección de oxígeno el cual facilita la reacción química de lixiviación, contribuyendo a la disolución efectiva del oro en la solución cianurada. Después de mantener la mezcla en los tanques por horas, la solución se procesa para recuperar el oro, a menudo utilizando métodos similares a los empleados en el heap leach.

La desventaja que tiene el proceso de lixiviación es el que requiere un largo periodo de tiempo para obtener la extracción completa del mineral, generando peligro y preocupación ambiental debido al manejo de sustancias químicas y gestión de residuos, además requiere un monitoreo y gestión ambiental para evitar problemas de contaminación [12]. Cabe resaltar que es una tecnología ampliamente utilizada en la industria minera, pero debe llevarse cumpliendo estrictamente con sus estándares de seguridad y sostenibilidad.

1.1.3. Proceso Merrill Crowe

El proceso minero Merrill-Crowe es un método utilizado para la extracción de oro y plata a partir de soluciones cianuradas que contienen estos metales. Este proceso se utiliza en la etapa de recuperación de metales preciosos de soluciones ricas, que a menudo se obtienen mediante el proceso de cianuración, como la lixiviación en montones o la lixiviación en tanques por agitación [13].

El proceso de Merrill Crowe para la recuperación de oro tanto para el proceso de lixiviación de oro en pilas como en tanques inicia con la preparación de la solución rica que en este caso contiene oro disuelto, se le agrega polvo de zinc a la solución, y al ser un metal menos noble que el oro y la plata, tiene una mayor afinidad química por el cianuro. El zinc reacciona con el cianuro para formar una sal sólida, mientras que el oro y la plata precipitan en forma de sólidos. La mezcla se somete a un proceso de clarificación para separar el oro

del líquido restante. Luego, se filtra la mezcla para separarlos completamente. El sólido que contiene oro, conocido como precipitado de Merrill-Crowe, se funde y refina para obtener el metal precioso en forma de barras o lingotes [14].

1.2. Material: Acero bajo en carbono

El acero al carbono es la mejor opción como material a utilizar para cuando se trata de estructuras de construcción, maquinarias y equipos industriales, ya que garantiza una alta resistencia al desgaste y altas durezas.

El acero al carbono es un material compuesto principalmente por hierro y carbono, teniendo alta resistencia, dureza y disponibilidad [15]. A pesar de que puede corroerse, su versatilidad lo hace muy usado en distintas aplicaciones industriales. Se clasifica en tres tipos según la concentración del carbono, el cual el A36 y A572 tienen contenido de carbón relativamente bajo.

El acero A572 o ASTM A572 es un acero de alta resistencia y baja aleación, utilizado principalmente en aplicaciones estructurales. Es bajo en carbono y tiene una combinación química de componentes que lo hace más resistente, pero a la vez más caro. El acero es utilizado en fabricación de vigas, barras y perfiles estructurales [16].

El acero A36 o ASTM A36 es un acero con baja cantidad de carbono. Tiene buena tenacidad y facilidad de conformado, posee alta resistencia a tracción y aplastamiento, siendo utilizado en la fabricación de vigas, columnas, placas y otros componentes estructurales [16].

El material que se va a emplear en este trabajo para la viga es el acero A36, el cual soportará todos los complementos correspondientes a lo largo del diámetro, por lo que su longitud a considerar debe ser mayor al diámetro del tanque.

Acero estructural	
Fluencia (Grado A36) (τ_y)	253 MPa
Límite de resistencia (esfuerzo a la tensión) (σ_u)	400 MPa
Densidad (γ_s)	7850 kg/m ³
Soldadura	E70XX
Pernos de conexión	ASTM A325
Varillas de anclaje (Grado A36) (F_y)	253 MPa
Longitud de viga (L_{viga})	11.5 m

Tabla 1. Valores de los componentes secundarios del tanque. De [31]

1.3. Tanques agitadores

Los tanques de mezcla o agitadores son depósitos industriales que se diseñan especialmente para la mezcla de dos o más sustancias en una o varias fases de proceso, pero sin generar ningún tipo de reacción química. Por lo tanto, son un elemento indispensable en gran cantidad de procesos productivos para acelerar la producción. Son generalmente de forma cilíndrica y pueden ser operados por lotes, con recirculación o en flujo continuo [1]. Los componentes principales que conforman un tanque mezclador se pueden reconocer en la **Figura 1.4.**, como el motor y el agitador.

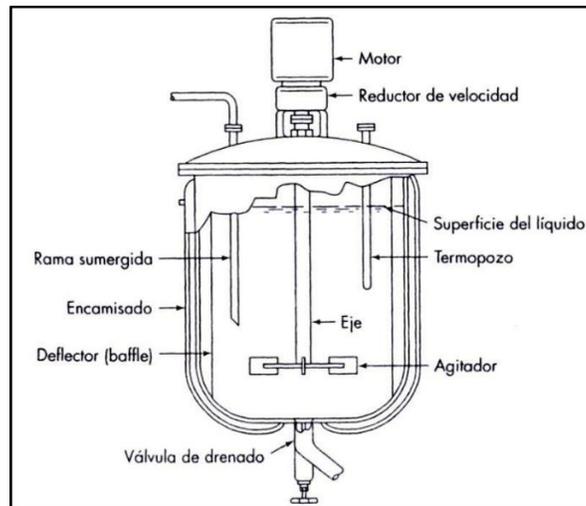


Figura 1.4. Composición de un tanque mezclador. De [17]

Dichos tanques con agitadores son diferenciados en distintos aspectos, según la forma del tanque, el agitador a usar, el sentido de impulsión del eje, el tipo de paleta del agitador, y el fluido a tratar dentro del tanque. Cada factor mencionado cumple un rol importante en el proceso de fabricación del tanque con agitador.

Los tanques agitadores son componentes esenciales en el proceso de lixiviación de oro, especialmente cuando se utiliza el método de lixiviación en tanques (*Tank Leaching*). Estos tanques cumplen funciones clave en la mezcla eficiente de la mena con la solución cianurada, facilitando la reacción química necesaria para la extracción del oro. Todo esto es importante debido a que mantiene la mezcla estable en todo el fluido. Sin esto, después de la extracción del mineral, no habría buena separación del relave con el mineral puro que se busca extraer, bajando la calidad y producción de los lingotes de oro.

La composición del tanque agitador de la presente tesis, como se mencionó anteriormente, no contará con techo debido a la necesidad de inyección de oxígeno a la mezcla. Para el análisis estructural del tanque, se cuentan con distintos tipos de cargas ejercidas sobre el cuerpo del tanque, de los cuales deben ser considerados o evaluados para analizar el efecto sobre este, las cuales son las siguientes:

- Carga hidrostática: Presión ejercida por el fluido contenido por el tanque en

reposo.

- Carga muerta: Fuerza debido al peso propio de los elementos a considerar (plataforma, motor-reductor, agitador estático).
- Carga viva: Fuerza ejercida por cuerpos externos (nieve, lluvia, viento, sismo, movimiento sobre el tanque)

Las cargas mencionadas se verán a detalle en la sección de la norma AISC, donde utilizando el método LRFD, se describirán las cargas presentes y cuáles se van a considerar.

1.3.1. Funciones principales

Los tanques agitadores están diseñados para mantener una mezcla homogénea y constante de la mena triturada y la solución cianurada. Esto asegura que la solución entre en contacto de manera efectiva con las partículas de oro en la mena. La agitación constante mejora la velocidad de las reacciones químicas entre el oro y el cianuro, facilitando su disolución. Los agitadores deben de garantizar la distribución uniforme del cianuro en toda la masa de mineral en el tanque [18]. Esto es crucial para lograr una lixiviación completa y eficiente.

En cuanto al control de sus parámetros, los tanques permiten un control preciso a sus parámetros como la temperatura, la concentración de la solución cianurada y el pH, factores críticos que afectan la eficiencia del proceso [27]. Después de la lixiviación, la separación de fases es más efectiva gracias a la agitación, permitiendo la recuperación eficiente del oro disuelto.

1.3.2. Características en la lixiviación de oro

Una de las características fundamentales en los tanques agitadores para el proceso de lixiviación es su diseño especializado. Los tanques están diseñados con formas y tamaños específicos para garantizar una agitación eficiente y distribución uniforme de reactivos. Dado que se trabaja con soluciones cianuradas, los tanques suelen estar hechos de materiales

resistentes a la corrosión, como acero inoxidable ASTM A36 o materiales recubiertos. En cuanto a su sistema de agitación, los tanques pueden tener sistemas de agitación con hélices, paletas u otros dispositivos que aseguren una mezcla adecuada.

Los tanques agitadores desempeñan un papel crucial en la lixiviación de oro al facilitar una mezcla efectiva de la mena con la solución cianurada, lo que permite la liberación y disolución eficientes del oro contenido en el mineral.

1.3.3. Capacidad del tanque

La capacidad de un tanque agitador utilizado en el proceso de lixiviación de oro puede variar significativamente dependiendo de varios factores, como el volumen del mineral que se está procesando, la concentración de la solución cianurada, y los requisitos específicos del proceso y del diseño de la planta minera.

Las capacidades de los tanques agitadores pueden ser expresadas en términos de volumen, generalmente en metros cúbicos (m^3) o litros (L). En el presente trabajo se realizó el cálculo, diseño, modelado y análisis de un tanque con 11.46 metros de diámetro, y 12 metros de altura aproximadamente, partiendo como inicio la capacidad de mineral de 1000 metros cúbicos.

Aparte de su capacidad dimensional, también se va a detallar la capacidad máxima de carga del tanque debido a que existe una variación de presión a lo largo de la altura del tanque. Junto a ello el cuerpo va a ser la prioridad en el análisis y diseño del tanque de almacenamiento, por lo cual es necesario conocer los esfuerzos máximos que deberá resistir dicho cuerpo.

1.3.4. Peso específico

Para el futuro análisis de cargas, va a ser necesario tener como dato el peso del mineral acumulado en el tanque, siendo las ecuaciones por emplear las siguientes:

$$Wp = \rho V_{ol} g \quad (\text{Ec. 1})$$

$$Wp = \rho \frac{\pi D^2}{4} Hg \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

Wp = Peso específico del tanque en $[N]$

ρ = Densidad del fluido en $[kg/m^3]$

D = Diámetro del tanque en $[m]$

H = Altura del fluido en $[m]$

g = Aceleración de la gravedad en $[m/s]$

1.3.5. Diseño del tanque

El tanque tiene como volumen $1000 m^3$, equivalente a un millón de litros. Como se cuenta con el volumen del tanque como variable inicial para calcular el diseño de toda la estructura del tanque, se utiliza la siguiente ecuación:

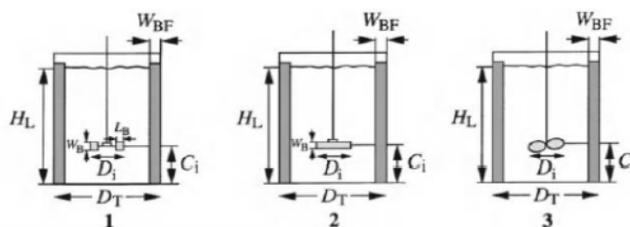
$$V = \frac{\pi \times D^2}{4} \times h = \frac{\pi \times D^3}{4} \quad (\text{Ec. 3})$$

En base al diámetro obtenido, y a la relación ideal de 1:1 de diámetro y altura del tanque, se debe de considerar las dimensiones de las planchas de acero disponibles en el mercado para el diseño de la estructura del tanque, los cuales son los siguientes:

Parámetros de planchas Acero ASTM A36	
Ancho (mm)	Largo (mm)
1200	2400
1500	2400
1500	3000
1500	6000
2400	6000

Tabla 2. Medidas de planchas comerciales Acero A36. De [52]

La norma API 650 indica que la relación óptima de diámetro/altura de un tanque es de 1:1, visualizado en la **Figura 1.5**, se debe verificar que la relación se cumpla. Dicho estándar también indica que se debe de dejar una distancia sobre el nivel normal de llenado, para evitar los derrames, el cual cumple al haber una diferencia del 6% con el volumen ocupado con el volumen libre.



Agitador	D_i/D_T	H_L/D_T	C_i/D_T	Deflector	
				W_{BF}/D_T	Número
1. Turbina Rushton $W_B/D_i = 0.2, L_B/D_i = 0.25$	0.33	1	0.33	0.1	4
2. Turbina de pala inclinada $W_B/D_i = 0.125, 6 \text{ aspas}, 45^\circ$	0.33	1	0.33	0.1	4
3. Hélice marina 3 aspas, $pitch = D_i$	0.33	1	0.33	0.1	4

Figura 1.5. Relación geométrica en distintos impulsores. Adaptado de [18]

En cuanto a que se debe dejar un mínimo de 0.5 m de distancia entre el techo y el nivel para evitar derrames no aplica para este proyecto debido a que se trata de un tanque sin

tapa. Mayormente en el proceso de lixiviación de oro, se suele tener una fila o cadena de seis a ocho tanques agitadores como se muestra en la **Figura 1.6**.

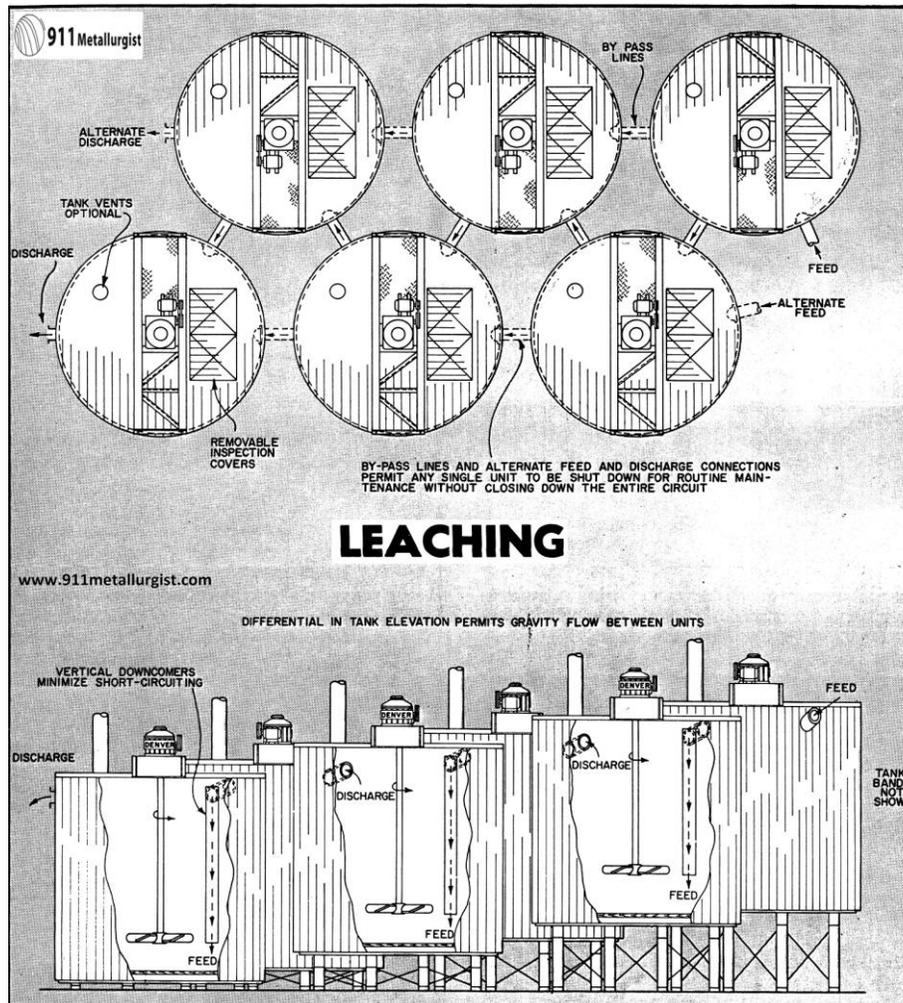


Figura 1.6. Proceso de *Heap leaching* en tanques agitadores. De [19]

1.3.6. Espesor de la pared del tanque

Según la norma API 650, el espesor de la pared del cuerpo requerido para resistir la carga hidrostática (presión ejercida por el líquido en reposo) será mayor que el calculado por condiciones de diseño o prueba hidrostática [20]. Se verá más a detalle en el capítulo de la norma API 650 del presente trabajo.

1.4. Componentes del tanque agitador

Según vaya a ser la solicitud del cliente, el tanque agitador tendrá sus dimensiones, y según el fluido que vayan a utilizar, se contaría con un listado o catálogo de agitadores óptimos para dicha mezcla, y con ello también se tomará en cuenta las dimensiones del eje para un buen funcionamiento del equipo. Como se tomarán de referencias externas los valores para la selección del motorreductor, también se tomará como referencia las dimensiones y peso que tendría el eje y agitador. En este trabajo la variable fundamental que se necesita son los pesos de los componentes para poder analizar la influencia de los equipos tanto estáticos como dinámicos y cómo actúan la plataforma y el tanque en reacción.

1.4.1. Motor – reductor

Motorreductor o motor eléctrico, determina la velocidad de rotación en función de la potencia y rpm del equipo [21]. Entre las principales características que tiene el motorreductor es el poder cambiar la dirección del eje de horizontal a vertical para poder utilizarlo en nuestro tanque de mezcla junto al agitador que se seleccione, esto claro que depende mucho del proveedor y disponibilidad del mercado de la región.

Del agitador que se va a encargar de mezclar el fluido, su accionar se debe al movimiento mecánico-eléctrico del motor transmitido a través del sistema de transmisión. Dicho sistema está compuesto por el reductor de velocidad que regula la intensidad de la velocidad que sale del motor, el eje central quien se encarga de transmitir la energía del origen al final, y el acoplamiento que une al eje con el reductor. Todo este sistema junto al motor compone al agitador completando todos los elementos principales y necesarios para tener un dispositivo agitador. Partiendo del objetivo de la evaluación de cargas presentes en la estructura del sistema plataforma-tanque, se requiere seleccionar el motor-reductor al ser parte de los elementos que influyen en el sistema como carga.

Para seleccionar el motor óptimo para la mezcla del lixiviante con el oro, se debe determinar la potencia requerida para la mezcla. La potencia necesita ser balanceada para que la agitación sea la adecuada para no generar turbulencia en la mezcla, y que pueda llegar a todas las zonas del tanque. La potencia requerida es la función de diversas variables.

$$P_M = f(d, D, H, \mu, \rho, \omega) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

d = Diámetro del impulsor en [m]

D = Diámetro del tanque en [m]

H = Altura del fluido en [m]

μ = Viscosidad dinámica del fluido en [m]

ρ = Densidad del fluido en [kg/m³]

ω = Velocidad angular del impulsor en [rad/s]

Por el momento no existe un valor estándar o ecuación de relación para la obtención de potencia para el proceso de lixiviación de oro en tanque agitadores debido a la variación existente en la capacidad del tanque. Para la obtención de potencia del motor se tiene que iniciar por un análisis de fluido, realizando cálculos de caudal y análisis de números adimensionales característicos de la hidráulica [50]. En este caso, se realizará un análisis de trabajos pasados [18] [49], realizando iteraciones e investigaciones, para obtener la potencia máxima y hacer uso de la carga más crítica para el análisis del sistema.

1.4.2. Selección motor – reductor

Al conocimiento del valor de la potencia necesaria del motorreductor, se procedería con la selección del equipo tomando las consideraciones siguientes:

- Potencia cumpla con lo requerido
- Posición vertical de la brida*
- Control electrónico
- Cumplimiento de la norma IEC

La unidad de motorreductor irá acoplado al motor como una sola unidad, siendo de eje hueco y transmisión por engranajes rectos para mayor fuerza y resistencia.

1.4.3. Potencia

La potencia, como se mencionó anteriormente, es la cantidad de energía que se genera o se consume por unidad de tiempo, o también considerado como la relación de trabajo y tiempo en la que llega a realizarse. En el caso de un movimiento circular, está representado por el torque, que sería la fuerza ejercida con una distancia respecto al punto de origen de manera perpendicular, multiplicado por la velocidad angular o velocidad en la que dará vueltas o giros respecto al punto de origen.

$$Pot = T \times \omega \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

Pot = Potencia de salida del motor en $[HP]$

T = Torque en $[N]$

ω = Velocidad angular del motor en $[\frac{rad}{s^2}]$

1.4.4. Torque

El torque describe la fuerza que tiene un agitador o impulsor aplicada a un fluido en rotación. Se transmite desde el eje del motor al eje del agitador, generando el movimiento del fluido dentro del tanque.

$$T = F \times d \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

T = Torque en $[N.m]$

F = Fuerza en $[N]$

d = Distancia del centro a donde se aplica la fuerza en [m]

1.4.5. Eje

Se va a encargar de transmitir la rotación y potencia de motor al agitador o ancla dentro del tanque, siendo este de geometría no tan larga para evitar vibraciones innecesarias o no deseadas dentro del tanque o fluido.

1.4.6. Estructura soporte base del tanque

Al ser un tanque diseñado con la norma API 650, el tanque va a reposar en el suelo directamente, sin ser necesario el uso de una estructura o patas para la estructura del tanque [20]. Lo que sí se debe de evaluar con la misma norma, es el uso de virolas o anillos, los cuales evitarán que la estructura del tanque sufra aplastamiento o abolladuras en su estructura. Lo cual, es uno de los objetivos principales del presente trabajo.

1.4.7. Accesorios del tanque agitador

Aparte de realizar el cálculo estructural del tanque y consideraciones del equipo agitador, también se debe de tomar en cuenta la existencia de los accesorios o complementos que van a formar parte de la estructura, por ejemplo, las conexiones de ingreso y salida del flujo. Los más comunes son:

- Entrada de producto (*inlet*)
- Salida del producto (*outlet*)
- Drenaje (*sump*)
- Entrada de hombre (*manhole*)

Dichas conexiones son influenciadas por el fluido y presión atmosférica al estar en contacto directo con el ambiente, por lo que no necesita un cálculo previo para su selección.

La norma API 650 se encarga de presentar los parámetros necesarios para las conexiones necesarias al tanque y realizar cualquier tipo de conexión.

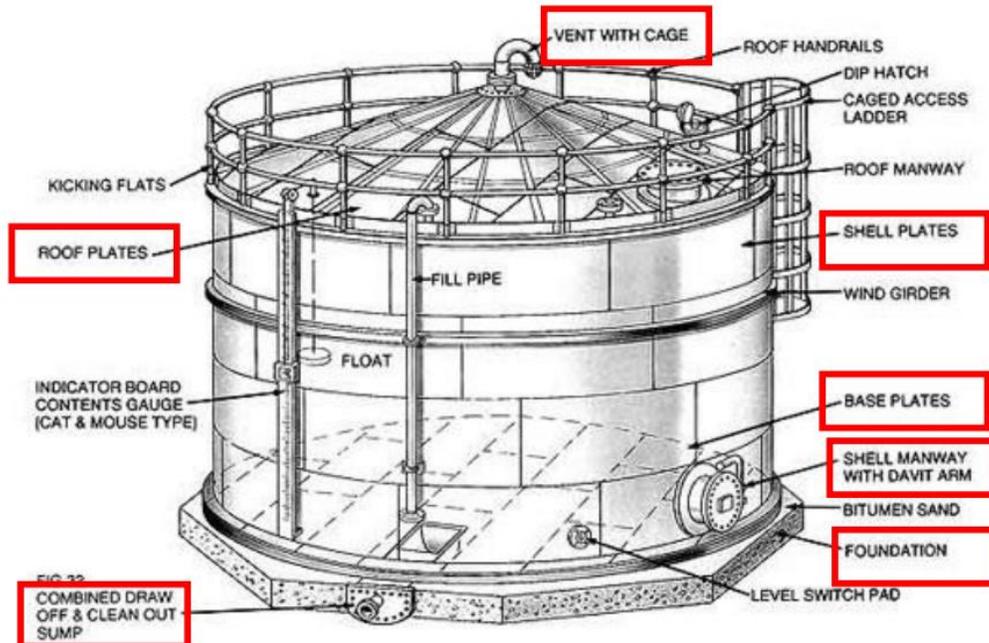


Figura 1.7. Conexiones de un tanque agitado según la norma API 650. De [20]

1.5. Aplicación de esfuerzos en el tanque

Al ser el tanque un recipiente lleno de mineral, según la altura a la que esté, generará una línea de acción con fuerzas homogéneas a lo largo de esa línea, actuando las mismas de manera perpendicular sobre la pared del recipiente. En dicha situación se hace un análisis particular sobre la pequeña sección de la pared del tanque. Al ser el tanque un cuerpo cilíndrico y simétrico, solo presentará dos esfuerzos principales, esté sometido el tanque a presión o no. Con dicho análisis y cálculo de esfuerzos se determina el espesor mínimo del cuerpo del tanque.

1.5.1. Esfuerzo tangencial y longitudinal

Los dos esfuerzos mencionados anteriormente son los esfuerzos tangencial y longitudinal [22]. El esfuerzo tangencial tiene como dirección la misma de la fuerza y se expresa con la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot r}{t} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo tangencial en $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

p = Presión manométrica del fluido en $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

r = Radio interno del cilindro en $[m^2]$

t = Espesor de pared del cilindro en $[m^2]$

En cuanto al esfuerzo longitudinal, actúa a lo largo del cuerpo del tanque, expresando con la siguiente ecuación:

$$\sigma_2 = \frac{p \times r}{2t} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \times \sigma_1 \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

σ_2 = Esfuerzo longitudinal en $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

1.5.2. Esfuerzo promedio y resultante

El esfuerzo promedio, tal cual dice su nombre, es el promedio entre los dos esfuerzos mencionados, el tangencial y longitudinal.

$$\sigma_{prom} = \frac{l}{2} \times (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

$$\sigma_{prom} = \text{Esfuerzo promedio en } \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

En cuanto al esfuerzo resultante, así como la fuerza producida por la partícula tiene su resultante, por tercera ley de Newton de acción reacción, dicha resultante tendrá una reacción de misma magnitud en sentido contrario. La cual corresponde al esfuerzo resultante representado por:

$$R = \frac{l}{2} \times (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

$$R = \text{Resultante de fuerzas concurrentes en } \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

1.6. Aplicación de esfuerzos en eje y estructura

Tanto el agitador como sus partes llegan a soportar la acción de variados esfuerzos y cargas exteriores al accionar y entrar al proceso de agitación. Por ello se tendrá que determinar los tamaños y dimensiones adecuado de sus componentes, llegando a identificar los esfuerzos de compresión, tracción, torsión y pandeo sobre los elementos como el eje y estructura a diseñar que va a soportar tanto el tanque y motorreductor. Dichos esfuerzos también pueden ser considerados para un futuro estudio enfocado en la mezcla del fluido.

1.7. Modelo de flujo dentro del tanque agitador

Según el tipo de agitador, fluido del tanque, tamaño y demás características que presente todo el tanque como sistema, se va a producir cierto tipo de flujo en el interior del tanque. En cuanto a la velocidad que el flujo va a tener en cualquier parte del tanque, tendrán

tres componentes, existiendo una velocidad predominante que va a depender de las variaciones del movimiento y de la velocidad de estas.

1.7.1. Flujo axial, radial y tangencial

El primer componente de velocidad presentado en la **Figura 1.8** es la velocidad axial, el cual el fluido actúa en dirección paralela al eje de impulsor, el fluido se bombea hacia abajo o hacia arriba. El segundo componente en la misma figura es la velocidad radial, la cual actúa en dirección perpendicular al eje, fluyendo el fluido desde la parte superior e inferior con mayor cizallamiento y turbulencia y menor bombeo. El tercer y último componente es la velocidad tangencial o rotacional, en el cual el fluido actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular trazada por el impulsor, moviéndose en un remolino, con el conocido movimiento de remolino con un vórtice de superficie [24].

Generalmente para flujos axiales se utilizan impulsores de hélices marinas con ángulos en sus palas no mayores a 90° , para radiales se utilizan turbinas planas y para flujos tangenciales, especialmente para velocidades bajas, se utilizan impulsores de palas [25].

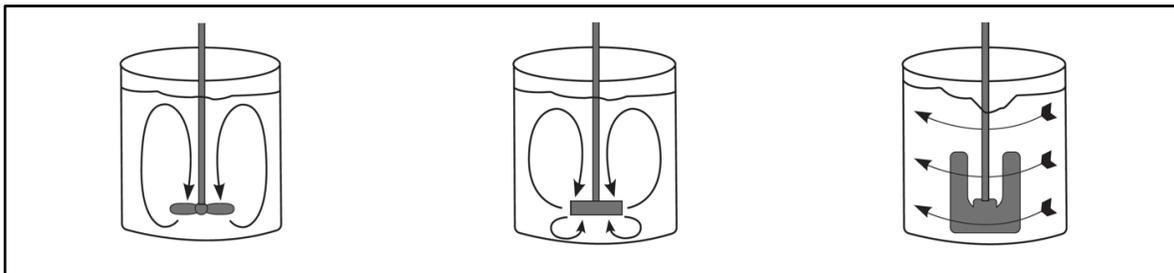


Figura 1.8. Representación de flujo axial, radial y tangencial. De [26]

1.7.2. Placas deflectoras

Deflectores o baffles son pequeñas estructuras colocadas en las paredes internas del tanque que generan pequeñas turbulencias en el fluido aparte de la agitación principal hecha por la paleta. El objetivo de los baffles es el impedir el efecto vórtice que crea remolinos en el fluido, logrando mayor turbulencia y mejor mezcla del fluido [24]. En el proceso de

lixiviación de oro en tanque agitador, donde la mezcla del fluido es el mineral triturado junto a la solución de cianuro, se debe evitar la generación de vórtices dentro de la mezcla. Los vórtices reducen considerablemente la eficiencia de la mezcla debido a que la fuerza centrífuga estancará el sólido en las paredes llevándolo al fondo del tanque agitador [23]. La anchura de dichos baffles depende de la viscosidad del fluido. La **Figura 1.9** muestra la disposición de las placas deflectoras dentro del tanque de mezcla, en donde varía la disposición de los deflectores. En la disposición a), es un deflector fijo a la pared para fluidos de baja viscosidad, en la disposición b) es un deflector colocado separado de la pared para líquidos de moderada viscosidad, y en la tercera disposición c), es un deflector colocado separado de la pared y en ángulo para líquidos de alta viscosidad.

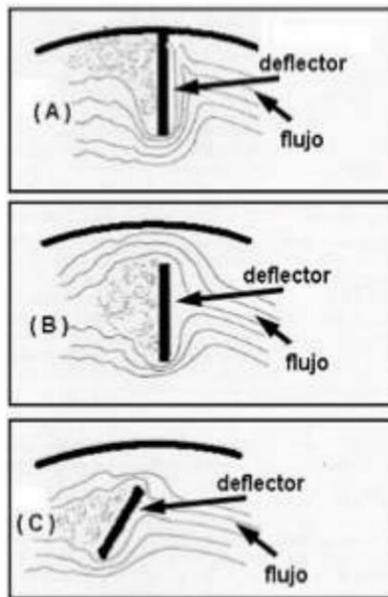


Figura 1.9. Disposición de los deflectores. De [24]

1.7.3. Tipos de mezclado en el proceso de agitación

La mezcla del fluido es lo que se va a obtener al accionar del agitador, dando como resultado mezcla de dos o más sustancias sin reacción química. A pesar de la ausencia de reacción, en donde sí se puede visualizar el cambio es en su estado físico, teniendo como nombre mezcla homogénea o heterogénea.

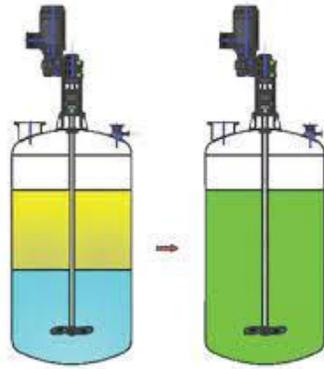


Figura 1.10. Homogeneización de dos fluidos. De [27]

La mezcla homogénea es cuando no se pueden diferenciar las sustancias mezcladas a simple vista, habiendo conseguido una mezcla de ambas perfecta. Mientras que la mezcla heterogénea es lo opuesto, puedes comparar y detectar las sustancias mezcladas a simple vista, sea por color o estados distintos [28].

Ante la agitación del fluido dentro del tanque, también existe el caso de la suspensión de un sólido en un líquido que mantiene las partículas sólidas en la totalidad del líquido. La inyección de gas al fluido también es un tipo de mezclado al obtener reacción de gas y líquido. Luego también existe el intercambio térmico y la fermentación del fluido, la cristalización para purificar la sustancia sólida, e hidrogenación [25].

1.8. Agitadores y su clasificación

Los agitadores son los dispositivos que se encargan de generar movimientos rotativos dentro del tanque en la mezcla para mantenerla homogénea. En su mayoría los equipos o tanques son recipientes cilíndricos, y un agitador mecánico, montado en un eje y accionado por un motor eléctrico [21]. Dichos agitadores también tienen un sentido de montaje, que puede ser de manera horizontal, vertical o sumergidos, el cual para esta investigación se hará el uso de montaje vertical.

Toda característica, valores y/o propiedades de los agitadores serán extraídos de la norma API 650, norma que se encarga de dar valores establecidos a agitadores y deflectores para recipientes con agitadores: tipos, términos y principales dimensiones [29].

En función de la dirección del impulsor generada dentro del recipiente, los agitadores para tanques pueden ser de flujo axial o radial. Los que generan corrientes paralelas al eje del agitador y los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial [24]. Dicho sentido de flujo va a depender según la elección del impulsor, características del fluido y geometría del tanque [30]. En este caso, se han determinado cuatro posibles agitadores para que cumplan con el objetivo de separar la pureza del mineral del relave. En la **Figura 1.11** se puede observar los distintos flujos que se generan dentro del tanque según el sentido de flujo que genera el agitador.

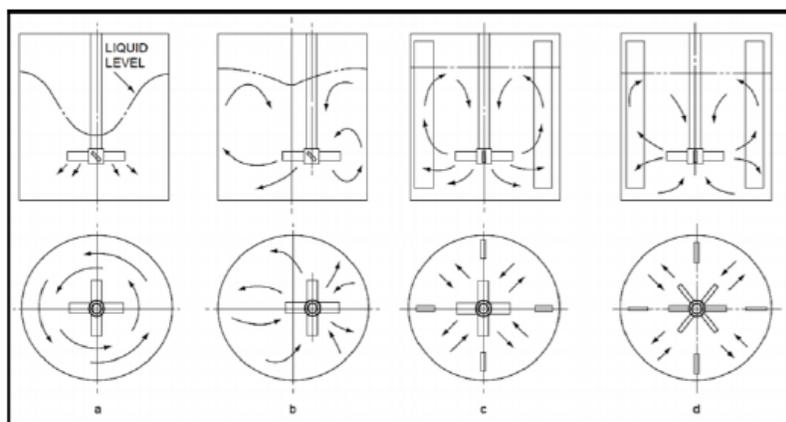


Figura 1.11. Patrones de flujo en sistemas de agitación. De [24]

Se presentan cuatro patrones de flujo en la figura, donde a) es un agitador concéntrico al encontrarse el eje en el centro del tanque, sin deflectores. En b) el eje se encuentra fuera del centro por lo que hay un desfase en su ubicación, reduciendo el vórtice que se genera y observa en el anterior caso. En c) es el mismo caso que el primero, solo que este presenta deflectores, siendo un agitador axial con deflectores. Por último, en el caso d) es un agitador radial con deflectores.

Así como existen distintos tipos de flujo en los agitadores, lo que más denota son los tipos del mismo agitador que se pueden utilizar, dependiendo del fluido y calidad de la mezcla a la que se quiera llegar.

1.8.1. Agitador de pala

Los agitadores de palas se pueden utilizar en procesos de suspensión, dispersión y homogeneización para productos de baja y media viscosidad. Pueden ser montados en depósitos de fondo bombeado o cónico. Las palas son agitadores de flujo axial, idóneos para suspensiones y disoluciones de sólido-líquido porque impiden que las partículas sólidas se depositen en el fondo del depósito. Giran a una velocidad comprendida entre 20 y 150 rpm, se utilizan para la mezcla de líquidos.

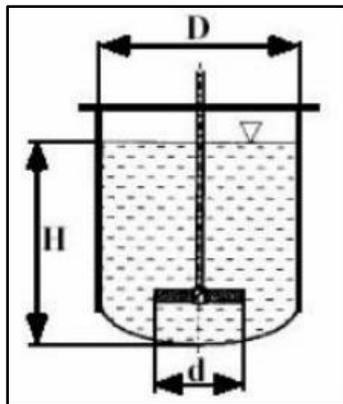


Figura 1.12. Agitador tipo pala. De [31]

Donde:

D = Diámetro nominal del tanque en $[m]$

H = Nivel del fluido de diseño $[m]$

d = Diámetro nominal del agitador en $[m]$

1.8.2. Agitador de turbina

Los agitadores de turbina se pueden utilizar en procesos de emulsión y dispersión, donde es necesario trabajar a velocidades elevadas. Son eficaces en un rango amplio de viscosidades con una gran efectividad de mezcla. Pueden ser montados en depósitos de fondo bombeado o cónico.

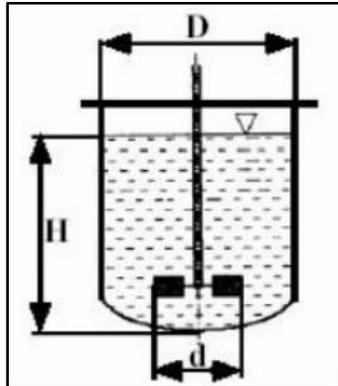


Figura 1.13. Agitador tipo turbina. De [31]

Donde:

D = Diámetro nominal del tanque en [m]

H = Nivel del fluido de diseño [m]

d = Diámetro nominal del agitador en [m]

1.8.3. Agitador de hélice

Los agitadores tipo hélice se pueden utilizar para los procesos de suspensión, dispersión y homogeneización para productos poco viscosos, donde es necesario trabajar a velocidad media y alta. Pueden ser montados en depósitos de fondo bombeado o cónico. Las hélices son agitadores de flujo axial, idóneos para suspensiones o disoluciones de sólido-líquido porque impiden que las partículas sólidas se depositen en el fondo del tanque. Además, se utilizan para la mezcla de líquidos.

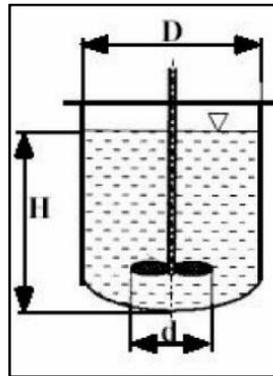


Figura 1.14. Agitador tipo hélice. De [31]

Donde:

D = Diámetro nominal del tanque en $[m]$

H = Nivel del fluido de diseño $[m]$

d = Diámetro nominal del agitador en $[m]$

1.8.4. Agitador de ancla

Los agitadores tipo ancla están destinados principalmente a la mezcla de productos de alta viscosidad y fluidos no newtonianos, es decir, carecen de un valor de viscosidad determinado porque esta depende de la temperatura. Pueden ser montados en depósitos de fondo bombeado o cónico. Dicho agitador tiene una forma en la que llega a ajustar al perímetro interno de las paredes del tanque, con una pequeña holgura o espaciado entre las superficies, como se muestra tanto en la **Figura 1.15**, cubriendo entre un 50 u 80% [30].

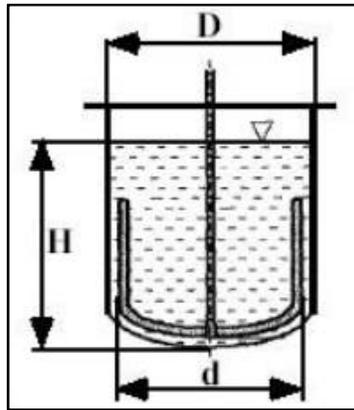


Figura 1.15. Agitador pala tipo ancla. De [31]

Donde:

D = Diámetro nominal del tanque en [m]

H = Nivel del fluido de diseño [m]

d = Diámetro nominal del agitador en [m]

1.9. Diseño del agitador

Al ser el agitador uno de los componentes principales e importantes que harán accionar la función de la lixiviación de oro, es importante definir el diseño aproximado ya que van a ser usados para el cálculo del diseño de la plataforma, el cual va a soportar dichos componentes fundamentales de un tanque agitador.

Cabe resaltar que, la información primordial que se necesita para analizar el resultado y objetivo de este trabajo es el peso que puede tener dicho agitador debido al análisis de cargas que se va a realizar sobre la plataforma. No es de gran importancia el diseño preciso del agitador para este trabajo, y si el agitador resulta ser de un peso muy elevado, la plataforma pasaría a ser una superficie con mayor nivel de seguridad en cuanto a firmeza. Y si el peso de la plataforma es mayor debido al exceso del peso del agitador o sus componentes, se podrá ver con mayor facilidad el efecto que puede llevar la plataforma a la orilla superior del tanque.

Se cuenta con el siguiente diagrama con el que se puede determinar el modelo de agitador a utilizar en el presente trabajo. En la **Figura 1.16**, el lado izquierdo del gráfico, se tiene la viscosidad del fluido o del lixiviante con el oro, el cual es mucho menor al valor de cien. En la parte superior muestra el valor de la capacidad del tanque de almacenamiento, el cual supera el valor proyectado en la tabla. Según las propiedades del fluido y tanque, el tipo de agitador óptimo es un “*propeller turbine*” o una turbina con palas inclinadas, de tipo de flujo axial.

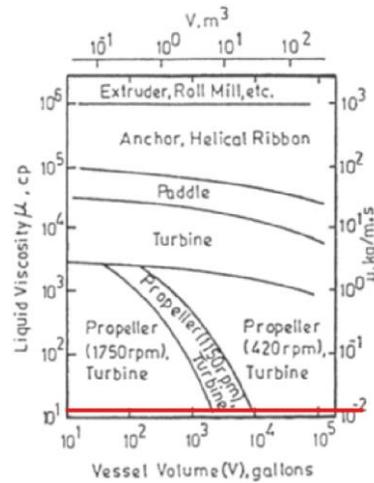


Figura 1.16. Selección de tipo de agitador. De [32]

Debido a recomendaciones generales de distribuidores de agitadores tipo turbina, mencionan que el tanque cuente con deflectores para distribuir el flujo del lixiviante de manera óptima. Las cargas del agitador se verán influidas directamente a las cargas de la plataforma, y debido al tipo de agitador, será una carga axial. Las características del agitador determinado se pueden observar en la siguiente tabla.

Parámetro	Valor
Tipo	Axial
Relación diámetro/tanque	0.3
Diámetro del impeler (mm)	3438

Tabla 3. Valores del agitador estándar tipo turbina. De [27]

Teniendo la relación del diámetro del agitador con el del tanque, se puede obtener el diámetro aproximado del agitador. En base a fuentes externas [27], se puede obtener el peso del agitador más próximo a nuestros cálculos. Teniendo el agitador de un material Acero 304L y con un diámetro de casi 3.5 metros, su peso aproximado es de 101.117 kg.

1.10. Ubicación y condiciones meteorológicas

Dependiendo de la ubicación que vaya a tener el tanque a diseñar, tendrá variedad de parámetros que van a influir en la estructura del diseño, debido a las condiciones climatológicas a las que se puede enfrentar, presentando actividades externas que podrían afectar como lluvias, nieve y fuertes ventiscas. Dichas fuerzas se ven reflejadas en la ecuación de método LRFD, donde tiene variables propias justo para situaciones que se mencionó con anterioridad.

Perú es uno de los principales productores de oro a nivel mundial, y la extracción de este metal precioso se lleva a cabo en varias regiones del país. La zona o región que concentra la mayor extracción de oro en el Perú es en el norte, en La Libertad [33]. Con sus datos de ubicación, altura y demás parámetros serán de utilidad para cálculos futuros en un análisis más profundo, luego de haber realizado y entendido el procedimiento de un diseño y análisis estructural primario.

Datos meteorológicos de la zona		
Parámetros	Valor	Unidad
Presión atmosférica	73	kPa
Temperatura mínima	12	°C
Temperatura máxima	17	°C
Zona sísmica	2	—
Velocidad del viento	75	km/h
Precipitación media anual	630	mm
Carga pluvial	0.4	kPa
Carga nival	0.2	kPa

Tabla 4. Condiciones meteorológicas de la zona del proyecto. De [18]

1.11. Norma API 650

Proviene de las siglas “*American Petroleum Institute*”, es la representación de todos los segmentos de la industria del gas natural y petróleo de Estados Unidos, liderando el desarrollo de estándares operativos y equipos en su industria [29]. La norma API 650 es un estándar en la que se basa de distintas experiencias acumuladas de tanques, facilitando su fabricación a presión atmosférica.

La norma API 650 brinda un alcance general que va a ayudar en la fabricación y diseño del tanque agitador de este proyecto, brindando limitaciones al igual que el código ASME, las cuales son las siguientes:

- Geometría cilíndrica
- Orientación vertical
- Material Acero
- Fabricación por soldadura
- Apoyo sobre suelo plano

- Presión interna máxima de 18 kPa
- Temperatura máxima de 93 °C

La norma API 650 toma varias normas referenciales como el ANSI (*American National Standard Institute*) y el AISC (*American Institute of Steel Construction*).

1.11.1. Criterios de diseño

Existen variedad de variables que representan distintos tipos de cargas para el criterio de diseño del tanque, definidas por la misma norma API 650. Dichas variables son las siguientes:

- Carga muerta (D_L): Peso propio de los elementos del tanque
- Presión interna de diseño (P_i): Presión manométrica del interior del tanque. Generalmente cero.
- Prueba hidrostática (H_t): Presión a la cual se realizará la prueba hidrostática al tanque fabricado.
- Cargas de techo flotante interno (D_f , L_{f1} , L_{f2}): Efectos sobre el tanque, que ocasiona el peso del techo flotando sobre el fluido almacenado.
- Carga viva mínima en el techo (L_r): Representa las cargas externas variables aplicadas sobre el techo.
- Sismo (E): Representa las cargas externas aplicadas sobre el tanque durante un sismo.
- Nieve (S): Representa las cargas debido al peso de nieve acumulada sobre el tanque.
- Líquido almacenado (F): Efectos del líquido almacenado, varía según la densidad y altura del tanque.
- Prueba de presión (P_t): El valor de la presión en una prueba de presurización interna.
- Viento (W): Acción del viento sobre el tanque. Puede ocasionar volcadura o deformación.

Aparte de tener variables de distintos tipos de cargas como criterio de diseño, también se tienen factores de diseño que se debe de considerar o establecer desde el inicio, los cuales son los siguientes:

- Temperatura de diseño (basado en condiciones ambientales)
- Máxima temperatura de diseño
- Gravedad específica de diseño
- Tolerancia por corrosión (si se da el caso)
- Factores sísmicos
- Capacidad del tanque

1.11.2. Espesor de la pared del tanque

Según la norma API 650, debe cumplir los siguientes requerimientos.

- Para diámetro nominal en metros, menor a 15.24, el espesor mínimo en milímetros de la pared no deberá ser menor a 4.76 mm.
- El espesor será calculado sobre la base del nivel de altura del tanque.

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

Tabla 5. Espesor mínimo del tanque. De [29]

El material por utilizar para el tanque serán placas de acero A36, teniendo un esfuerzo de fluencia de 250 MPa, y esfuerzo de tracción de 400 a 550 MPa. Teniendo las consideraciones de la norma API, se podrá realizar el análisis y cálculo hidrostático para comprobar si el espesor de la pared del tanque cumple con los requerimientos de la norma. Para facilitar el procedimiento de cálculo, se va a utilizar la siguiente ecuación [18] previo al método del pie:

$$S_d = \min \left[\frac{2}{3} \sigma_f, \frac{2}{5} \sigma_t \right] \quad (\text{Ec. 16})$$

$$S_t = \min \left[\frac{3}{4} \sigma_f, \frac{3}{7} \sigma_t \right] \quad (\text{Ec. 17})$$

Para calcular el espesor del tanque, se suele utilizar el método de un pie [20].

$$t_d = \frac{4.9D(H - 0.3)G}{S_d} + CA \quad (\text{Ec. 18})$$

$$t_t = \frac{4.9D(H - 0.3)}{S_t} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

t_d = Espesor de tanque de diseño [mm]

t_t = Espesor del tanque de prueba hidrostática [mm]

D = Diámetro nominal del tanque en [m]

H = Nivel del fluido de diseño [m]

G = Gravedad específica de diseño del fluido almacenado [m]

CA = Tolerancia de corrosión [mm]

S_d = Esfuerzo máximo permisible de diseño [MPa]

S_t = Esfuerzo máximo permisible de prueba hidrostática [MPa]

1.11.3. Fondo del tanque

Según la norma API 650, el fondo del tanque al ser una base plana y con contacto directo a la superficie, debe cumplir con las siguientes características:

- El fondo del tanque deberá ser soportado por una base de hormigón o asfalto.
- Uso de placa anular cuando el diámetro del tanque supere los 30 m. No aplica.
- En general el espesor del fondo del tanque es menor al espesor de la estructura del tanque debido a que son insensibles a la presión hidrostática del fluido. Siendo el espesor mínimo de 6 mm.
- Debido al filete de soldadura del fondo con la estructura del tanque, el fondo debe de tener mayor diámetro que el del exterior, con 50 mm como mínimo.

Según las indicaciones presentadas en la norma API 650, es necesario calcular el espesor necesario de la base del tanque al igual que se hizo para la pared del tanque.

1.11.4. Análisis de estabilidad del tanque

Debido a la ubicación geográfica de la operación minera, el tanque se va a encontrar expuesto a condiciones meteorológicas que podrían afectar la estabilidad del tanque, fuerzas externas como ventiscas, tormentas de nieve y acción sísmica que podrían volcar la estructura del tanque agitador. Por ello, se deberá comprobar si se necesita anclar el tanque al suelo si es que el momento del vuelco producido por el viento es mayor que el propio tanque.

1.11.5. Peso específico del tanque

Aparte del peso que tiene el propio mineral, también existen los pesos efectivos W_i y W_c , los cuales son el peso impulsivo del líquido y peso convectivo del líquido respectivamente. Estos valores se obtendrán a través del resultado del peso específico del tanque, expresándose en la siguiente ecuación.

$$W_i = \frac{\tanh(0.866 \times D/H)}{0.866 \times D/H} \times W_p; \text{ Si } D/H \geq 1.33 \quad (\text{Ec. 20})$$

$$W_i = \left[1 - 0.218 \frac{D}{H} \right] \times W_p; \text{ Si } D/H < 1.33 \quad (\text{Ec. 21})$$

$$W_c = 0.23 \frac{D}{H} \times \tanh\left(\frac{3.67 H}{D}\right) \times W_p \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

W_i = Peso impulsivo del líquido en [N]

W_c = Peso convectivo del líquido en [N]

1.11.6. Virolas o anillos

Según la norma API 650, las virolas o anillos en la pared del tanque se pueden requerir debido a la soldadura o unión de la pared del tanque con el techo. Los anillos son primordiales en cuanto a seguridad y duración del equipo en el caso de que se genere sobrepresión en el interior del tanque, brindando también resistencia a la acción del viento contra la volcadura, evitando abollamiento y desperfectos en el tanque. Lo que se consigue con el uso de virolas en el tanque es darle mayor rigidez para evitar que colapse la estructura hacia su interior.

El tanque agitador para la lixiviación de oro al necesitar la inyección de oxígeno para procesar el mineral no cuenta con cubierta o tapa. Por lo que el anillo de la última virola del tanque obligatoriamente debe de contar con anillos atiesadores.

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

Tabla 6. Perfiles de coronamiento mínimo según la norma API 650. De [29]

El anillo de rigidización o virola de la parte superior del tanque cumple con una función importante en este análisis del proyecto, ya que el anillo según el modelo a escoger va a ser quien reciba las cargas de la plataforma, y quien disipe o evite la abolladura en las paredes del tanque. Según la norma API 650, existen diferentes configuraciones de anillo atiesador y pared del casco.

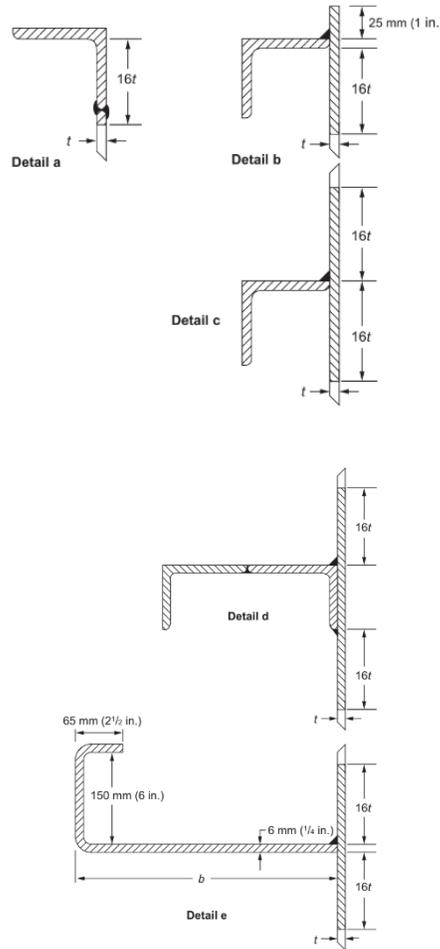


Figura 1.17. Combinaciones de anillos atiesadores según la norma API 650 (Fig. 5.24). De [29]

De todas las combinaciones presentadas en la figura anterior, la disposición del anillo a escoger será el detalle b debido a la demanda y situación del sistema plataforma-tanque, la cual va a contribuir con la inercia otorgando rigidez a la pared del tanque. Para seleccionar las dimensiones del anillo, se hará uso de la siguiente ecuación.

$$Z_{min} = \frac{D^2 \times H_2}{17} \times \left(\frac{V}{190}\right)^2 \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde:

Z_{min} = Módulo de sección mínimo requerido [cm^3]

H_2 = Altura total del tanque [m]

D = Diámetro del tanque en [m]

V = Velocidad de diseño del viento [km/h]

Al saber que en base a la norma API 650 debe de tener un perfil mínimo de 50x50x6 mm debido al diámetro del tanque a diseñar, en la siguiente tabla se puede observar los perfiles que se pueden seleccionar al haber escogido la opción b de combinación de anillos atiesadores en la **Tabla 7**.

Table 5.19a - Section Moduli (cm^3) of Stiffening-Ring Sections on Tank Shells (SI)

Dimensions in millimeters

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6
Member Size	As-Built Shell Thickness				
	5	6	8	10	11
Top Angle: Figure 5.24, Detail a					
65 x 65 x 6	6.58	6.77	-	-	-
65 x 65 x 8	8.46	8.63	-	-	-
75 x 75 x 10	13.82	13.97	-	-	-
Curb Angle: Figure 5.24, Detail b					
65 x 65 x 6	27.03	28.16	-	-	-
65 x 65 x 8	33.05	34.67	-	-	-
75 x 75 x 6	35.98	37.49	-	-	-
75 x 75 x 10	47.24	53.84	-	-	-
100 x 100 x 7	63.80	74.68	-	-	-
100 x 100 x 10	71.09	87.69	-	-	-

Tabla 7. Módulos de sección según la norma API 650 (Tabla 5.19a). De [29]

Los anillos atesadores o virolas pueden estar ubicadas cada cierta altura del tanque en función de su diámetro. Para calcular la mínima altura en la que se necesita un anillo, se toma el espesor mínimo del tanque en la siguiente ecuación (5.9.6 de la norma API 650) [29].

$$H_I = 9.47 t + \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} \times \left(\frac{190}{V}\right)^2 \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

H_I = Distancia vertical entre el atesador superior y anillo intermedio [m]

t = Espesor del tanque [mm]

V = Velocidad de diseño del viento [km/h]

D = Nivel del fluido de diseño [m]

1.11.7. Acción sísmica

1.11.7.1. Movimiento del fluido dentro del tanque

Al estar diseñando el tanque en base a la norma API 650, aborda sólo los requisitos de diseño estructural y seguridad del tanque, mas no los efectos sísmicos. Como el tanque agitador, al igual que cualquier otro equipo o estructura, estará sujeto bajo los mismos efectos sísmicos que cualquier otro. Por ello, la norma que facilita el cálculo y análisis de dicho efecto sobre el tanque será la norma AISC [34].

El motivo por el que se realizaría un cálculo del efecto de la estructura bajo la acción sísmica es debido a que el tanque estaría sometido bajo dos cargas como producto de un sismo, en donde una parte del fluido se moverá al igual que el tanque, conocido como componente compulsiva, mientras que la otra parte se moverá con intensidad mayor, llamado componente convectiva [18].

Todos estos movimientos hacen que el contenido del tanque se vuelva inestable, y al ser dos tipos de movimientos, cada uno tendría su propia aceleración y fuerza, los cuales generarán un momento de volcadura dentro del tanque.

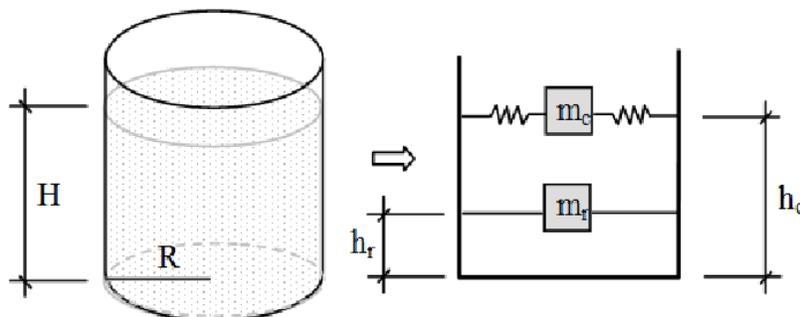


Figura 1.18. Movimiento horizontal en tanque rígido. De [35]

1.11.7.2. Parámetro del movimiento del suelo

Tanto la norma API 650 como la AISC hacen referencia al cálculo y diseño sísmico para el diseño de estructura del tanque, siendo ambos extraídos de la norma ASCE 7, usando la metodología LRFD, el cual brinda una variable dentro de su ecuación para el análisis de cargas.

Dicho procedimiento haciendo uso del método de cortante basal calculando el momento sísmico, se realizaría sólo si Perú estuviese dentro de la zona en la que se aplica la norma ASCE 7, pero como Perú no se encuentra dentro de la norma ASCE 7, se debe recurrir a normas locales. Se debe consultar la Norma Técnica Peruana E0.30: Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE).

1.11.7.3. Periodo estructural de vibración

Para realizar el cálculo del periodo estructural de vibración, se cuenta con dos componentes, uno es de tipo impulsivo y el otro convectivo. La ecuación para el periodo impulsivo y su gráfica para determinar su valor son las siguientes.

$$T_i = \frac{I}{\sqrt{2000}} \times \frac{C_i H}{\sqrt{\frac{t_u}{D}}} \times \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde:

T_i = Periodo natural impulsivo

C_i = Coeficiente de periodo impulsivo (Figura 2.11) en base de $H/D = 6.2$

H = Altura de diseño [m]

E = Módulo de Young del material del cuerpo del tanque [MPa]

t_u = Espesor equivalente del cuerpo del tanque [mm]

ρ = Densidad del fluido [$\frac{kg}{m^3}$]

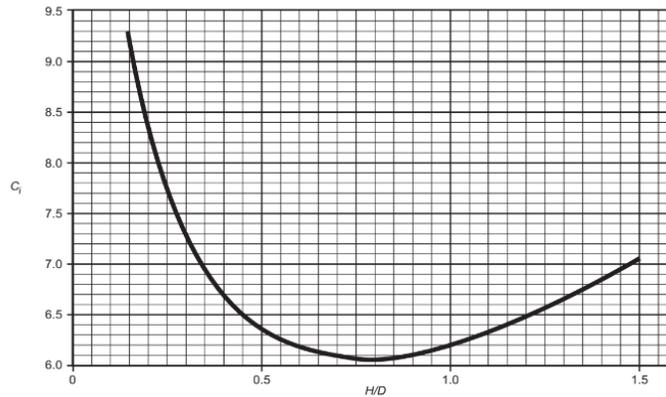


Figura 1.19. Coeficiente de periodo impulsivo según la norma API 650 (Tabla E.4.5.1). De [29]

El periodo convectivo o de chapoteo se calcula utilizando las siguientes ecuaciones:

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh \frac{3.68H}{D}}} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$T_c = 1.8 K_s \sqrt{D} \quad (\text{Ec. 27})$$

1.11.7.4. Ecuación anclaje al suelo

Luego de realizarse el primer cálculo y saber que la norma ASCE 7 no aplica al territorio peruano, por lo que la misma norma API 650 brinda una alternativa para los que están fuera de la zona delimitada por el ASCE 7.

Para corroborar si el tanque necesita anclaje al suelo debido a los movimientos telúricos o se puede mantener por su propio peso. Por ello, haciendo uso de la norma API 650, se pasará por variedad de ecuaciones para obtener las variables que van a ser reemplazadas en la ecuación principal para obtener el Ratio de anclaje, el cual determinará si se necesita o no de anclaje en el tanque para movimientos sísmicos. Dicha ecuación principal se expresa en la siguiente ecuación:

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2 \times [w_t \times (1 - 0.4A_v) + w_a - 0.4w_{int}]} \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde:

J = Ratio de anclaje

M_{rw} = Momento sísmico en la base del tanque

D = Diámetro del tanque en [m]

A_v = Coeficiente de aceleración vertical

w_t = Carga de carcasa y techo actuando en la base del tanque en [N/m]

w_a = Resistencia de elevación en la región anular [N/m]

w_{int} = Carga de elevación debido a la presión interna [N/m]

1.11.7.5. Cálculo de cargas sobre la pared del tanque

Para el valor de la carga interna o w_{int} , se toma como cero al no contener presión interna debido a la falta de techo. En cuanto al valor de la resistencia de elevación, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$w_a = 99t_a \times \sqrt{F_y \times H \times G_e} \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde:

t_a = Espesor de planchas de fondo en [mm]

F_y = Esfuerzo de fluencia mínimo de las placas de fondo en [MPa]

A_v = Coeficiente de aceleración vertical

G_e = Gravedad específica influido por A_v , $G_e = G \times (1 - 0.4A_v)$

Luego de obtener el valor de w_a , se procede a calcular la siguiente variable de la ecuación que nos determinará si el tanque requiere de anclaje al suelo o no, el cual es la carga de la carcasa y techo actuando en la base.

$$w_t = \frac{W_s}{\pi \times D} + W_{rs} \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde:

w_t = Carga de carcasa y techo actuando en la base del tanque en $[N/m]$

w_s = Peso total de la carcasa y accesorios en $[N]$

w_{rs} = Carga del techo actuando en la carcasa en $[N/m]$

D = Diámetro del tanque en $[m]$

1.11.7.6. Momento sísmico en la base del tanque

Ahora como última variable faltante a calcular para determinar si el tanque requiere de anclaje al suelo o no, es el momento sísmico en la base del tanque respecto a los anillos del tanque, el cual se representa con la siguiente ecuación:

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i (X_i W_i + X_s W_s X_r W_r)]^2 + [A_c \times (X_c W_c)]^2} \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde:

M_{rw} = Momento sísmico en la base del tanque en $[N \cdot m]$

A_i y A_c = Aceleración de la componente impulsiva y convectiva

X_i = Centro de acción impulsivo

X_c = Centro de acción convectivo

X_r = Centro de acción del techo

X_s = Centro de acción de la pared

W_i = Peso impulsivo del líquido en [N]

W_c = Peso convectivo del líquido en [N]

W_r = Peso del techo en [N]

W_s = Peso de la pared en [N]

1.11.8. Parámetros del movimiento del suelo

Debido a que la zona o departamento en donde se ha proyectado la instalación del diseño de este trabajo está fuera de la norma ASCE 7, como se mencionó anteriormente, se recurre al uso de normativas locales, la cual es la E0.30: Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) [36].

En ella brindan factores dependiendo de la zona, y según el factor que corresponda, se deriva a la ecuación del API 650 para el diseño de estructura del tanque, tomando el factor de zona como la aceleración pico del terreno S_p .

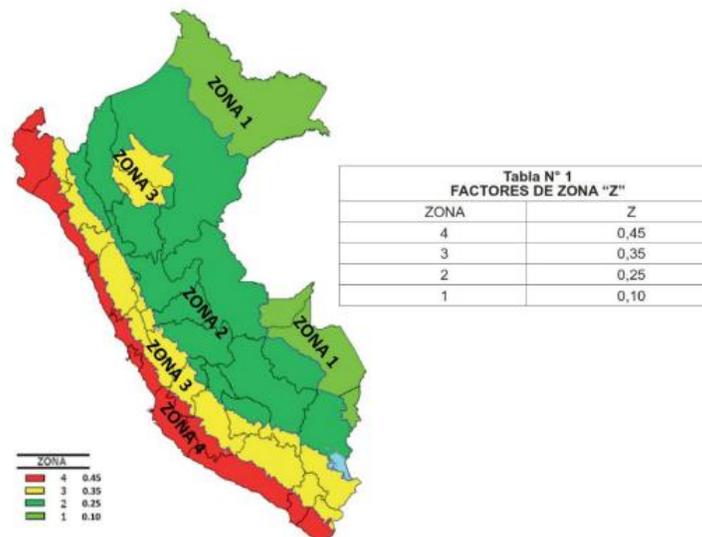


Figura 1.20. Zonas sísmicas del Perú. De [36]

Con dicho factor se obtienen los parámetros de máxima acción sísmica, los cuales van a ayudar a obtener los coeficientes de sitio con respecto a la aceleración y velocidad en la norma API 650.

$$S_s = 2.5 \times S_p \quad (\text{Ec. 32})$$

$$S_l = 1.25 \times S_p \quad (\text{Ec. 33})$$

Donde:

S_s = Parámetro de máxima aceleración sísmica, 5% amortiguada, de periodos cortos (0.2 segundos) asociada al periodo impulsivo

S_l = Parámetro de máxima aceleración sísmica, 5% amortiguada, de periodos de 1 segundo asociada al periodo convectivo

Según la norma API 650 existen seis tipos de terreno, y la provincia en la que va a ser instalado el equipo le corresponde un tipo C [18]. Con esto se obtendrá los coeficientes de sitio con respecto a la aceleración F_a y la velocidad F_v respectivamente.

Table E.1 - Value of Fa as a Function of Site Class

Site Class	Mapped MCE(R) Spectral Response Accelerations at Short Periods				
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.0$	$S_S \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
^a Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.					

Table E.2 - Value of Fv as a Function of Site Class

Site Class	Mapped MCE(R) Spectral Response Accelerations at Short Periods				
	$S_S \leq 0.1$	$S_S = 0.2$	$S_S = 0.3$	$S_S = 0.4$	$S_S \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
^a Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.					

Tabla 8. Módulos de sección según la norma API 650 (Tabla E.1). De [29]**1.11.8.1. Grupo de uso sísmico (SUG)**

Dependiendo del contenido de los tanques agitadores, estos pueden ser clasificados en base al grado de peligro que podría ser expuesto el personal debido al material que

almacene el tanque en caso de su daño estructural. El grupo de uso sísmico se encarga de darle valor a la estructura del tanque en base al grado del material, el cual está clasificado de la siguiente manera:

- **SUG III:** Tanques esenciales para funcionamiento durante y luego de un terremoto, o tanques que almacenan sustancias dañinas y no tiene un adecuado sistema de control para prevenir exposición humana.
- **SUG II:** Tanques que de fallar presentan un riesgo a la salud de las personas, pero cuentan con un sistema de control en caso de accidentes.
- **SUG I:** Tanques que no caen dentro de ninguna de estas dos características.

En este trabajo debido a que el tanque contiene una mezcla de cianuro el cual puede resultar tóxico y presentar cierto riesgo a la exposición a los trabajadores, será considerado en la categoría II, el cual son aquellos que almacenan material que puede representar peligro sustancial (SUG II).

Table E.5 - Importance Factor (*I*) and Seismic Use Group Classification

Seismic Use Group	<i>I</i>
I	1.0
II	1.25
III	1.5

Tabla 9. Factor de importancia según la norma API 650 (Tabla E.5). De [29]

1.11.8.2. Cálculo de aceleraciones espectrales de diseño

Para continuar con el cálculo, ahora se necesita obtener las variables de las aceleraciones espectrales de diseño, aceleraciones que son necesarias debido al efecto que puede tener el fluido sobre la estructura del tanque en caso de un sismo.

$$A_i = 2.5 Q F_a S_p \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) \quad (\text{Ec. 34})$$

$$A_c = 2.5 K Q F_a S_p \left(\frac{T_S T_L}{T_c^2} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde:

K = Coeficiente de ajuste de aceleración espectral

Q = Factor de escala de terremotos máximos

$$F_a = 1.15$$

$$F_v = 1.5$$

$$S_p = 0.25 \text{ (Ec. 37)}$$

R_{wi} = Factor de modificación de respuesta inductiva

R_{wc} = Factor de modificación de respuesta convectiva

T_L = Periodo de transición más prolongado

$$T_S = \frac{F_v \times S_I}{F_a \times S_a}$$

I = Coeficiente de importancia (SUG)

Cada variable presentada en la ecuación de aceleraciones debe ser calculada, por lo que se procederá en la sección del marco teórico a realizar el cálculo de cada una. Como se verá, hay una cadena antecesora de ecuaciones previas para llegar a la ecuación final del factor de anclaje de la estructura del tanque al suelo.

Ciertas variables presentadas en las ecuaciones tienen determinado sus valores dependiendo si la zona destinada está dentro de la aplicación de la norma ASCE 7 o no. Como el coeficiente de ajuste de aceleración espectral (K), el cual según la norma tiene especificado el valor si se ubica dentro de las zonas delimitadas, pero como este no es el caso, se toma el valor de 1.5. Igualmente, para el caso de T_L , si está dentro de la zona de la norma, se calcula la variable en base a la norma, pero si no, tiene un valor de 4. Y por último el valor

del factor de escalado de terremotos máximos (Q), el cual dentro de norma tiene un valor de $\frac{2}{3}$, y fuera de ella el valor de 1. En cuanto al valor de R_{wi} y R_{wc} , es en base a la siguiente tabla.

Table E.4 - Response Modification Factors for ASD Methods

Anchorage system	R_{wi} (impulsive)	R_{wc} (convective)
Self-anchored	3.5	2
Mechanically-anchored	4	2

Tabla 10. Factor de modificación de respuesta según la norma API 650 (Tabla E.4). Adaptada de [29]

Al tener el tanque su propio agitador, corresponde a la primera fila de la tabla, teniendo los valores de 3.5 y 2 para R_{wi} y R_{wc} respectivamente. En cuanto el valor del coeficiente de importancia, como se mencionó anteriormente, se tiene el grupo de uso sísmico, o SUG por sus siglas en inglés, y se determinó que, debido al contenido y necesidad primordial del tanque agitador en la planta, el sistema se encuentra en el grupo dos, es decir, en SUG II. Lo que da como valor de $I = 1.25$.

1.11.8.3. Centro de acción para las fuerzas laterales efectivas

De la ecuación para obtener la certeza si el tanque requiere de anclajes o no, solo faltaría conocer el valor de las variables de centro de acción, tanto impulsivo como convectivo. En cuanto al centro de acción del techo, debido a que el tanque del presente trabajo no cuenta con uno, como se mencionó anteriormente, su valor es igual a cero.

Las ecuaciones para obtener cualquier variable en el diseño del tanque son extraídas de la norma API 650 [29], y las ecuaciones para hallar las variables mencionadas, son las presentadas a continuación.

$$X_i = 0.375 H ; Si D/H \geq 1.33 \quad (\text{Ec. 36})$$

$$X_i = \left[0.5 - 0.094 \frac{D}{H} \right] \times H ; \text{ Si } D/H < 1.33 \quad (\text{Ec. 37})$$

$$X_c = \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67 H}{D} \times \sinh\left(\frac{3.67 H}{D}\right)} \right] \times H \quad (\text{Ec. 38})$$

Donde:

X_i = Centro de acción impulsivo

X_c = Centro de acción convectivo

Finalmente, con todas las ecuaciones presentadas, más adelante se calcularán y se reemplazarán todos los valores obtenidos en la ecuación de momento sísmico en la base del tanque.

Siguiendo con las indicaciones y cálculo que brinda la norma API 650 para el diseño estructural del tanque, como valor final se va a obtener el factor del ratio de anclaje J, el cual va a determinar si el tanque requiere de anclaje o no para la acción sísmica que pueda ocurrir en la zona.

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2 \times [w_t \times (1 - 0.4A_v) + w_a - 0.4w_{int}]} \quad (\text{Ec. 28})$$

Table E.6 - Anchorage Ratio Criteria

Anchorage Ratio J	Criteria
$J \leq 0.785$	No calculated uplift under the design seismic overturning moment. The tank is self-anchored.
$0.785 < J \leq 1.54$	Tank is uplifting, but the tank is stable for the design load providing the shell compression requirements are satisfied. Tank is self-anchored.
$J > 1.54$	Tank is not stable and cannot be self-anchored for the design load. Modify the annular ring if $L < 0.035D$ is not controlling or add mechanical anchorage.

Tabla 11. Ratio de anclaje según la norma API 650 (Tabla E.6). De [29]

1.11.9. Acción eólica

La estructura del tanque también resulta afectada, como los movimientos sísmicos, por ventiscas o viento, lo cual puede generar desestabilidad o un momento de volcadura sobre la estructura del tanque, siendo la parte superior la zona con mayor influencia. Al tener definida la ubicación en la que va a ser instalado el tanque, se sabe que la provincia tiene una velocidad de viento de 75 km/h.

Al igual que la acción sísmica, la norma API 650 brinda ecuaciones y pasos para calcular los momentos que van a estar presentes en la estructura del tanque y que puedan ser un peligro o riesgo de volcadura para el tanque (*5.11 Wind Load on Tanks*). De la misma manera, se deberá calcular la presión interna y peso del tanque para que sean comparado entre ellos con las ecuaciones de momento de vuelco que se generan por la fuerza del viento tanto vertical como horizontal. Con esto se determinará si el tanque necesita anclaje o no debido a las cargas del viento.

El primer valor por calcular es la presión que se ejerce sobre las paredes del tanque en función de la velocidad del viento, el cual se determina con la siguiente ecuación:

$$P = 0.86 \times \left(\frac{V}{190} \right)^2 = 0.134 \text{ kPa} \quad (\text{Ec. 39})$$

Dicha presión es ejercida en cierta área de la estructura del tanque, área que se obtiene multiplicando el diámetro del tanque por su altura, obteniendo el área total de la pared del tanque.

$$A_p = D \times H \quad (\text{Ec. 40})$$

$$F_p = P \times A_p \quad (\text{Ec. 41})$$

En base a la norma API 650 (5.11.2.1 pg. 143) [29], para que el tanque sea considerado que no necesita anclaje al suelo por las acciones del viento, debe cumplir con los siguientes requerimientos:

I. Viento + Presión interna vs Peso del tanque

$$0.6 M_w + M_{pi} < M_{DL}/1.5 + M_{DLR} \quad (\text{Ec. 42})$$

II. Viento + Presión interna vs Peso del tanque + Fluido

$$M_w + 0.4M_{pi} < (M_{DL} + M_F)/2 + M_{DLR} \quad (\text{Ec. 43})$$

III. Viento (horizontal) + Presión interna vs Peso del tanque

$$M_w + 0.4M_{pi} < (M_{DL} + M_F)/2 + M_{DLR} \quad (\text{Ec. 44})$$

Donde:

M_w = Momento de vuelco de la presión de viento en [N.m]

M_{pi} = Momento por acción de la presión interna en [N.m]

M_{DL} = Momento por acción del peso del casquete en [N.m]

M_{DLR} = Momento por acción del peso del techo en [N.m]

M_F = Momento por el peso del líquido en [N.m]

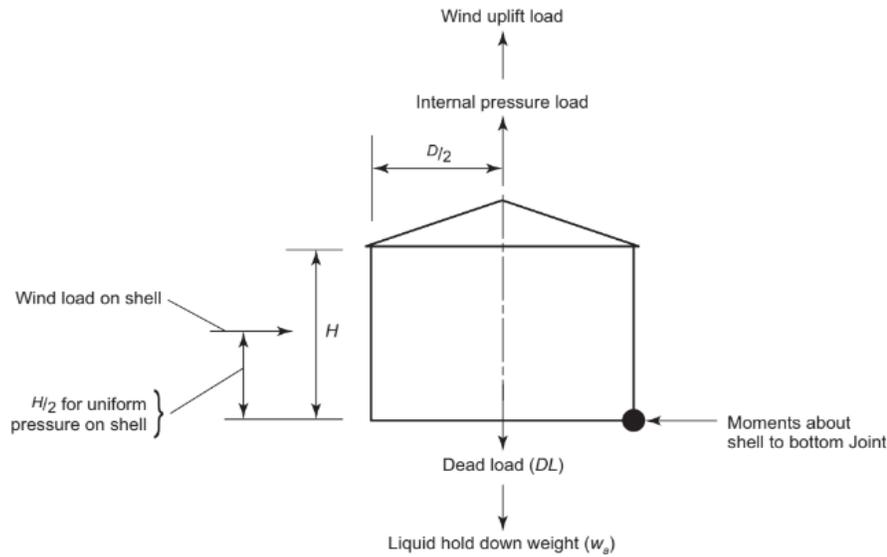


Figura 1.21. Diagrama de vuelco de tanque sin anclar. De [29]

En base a la figura donde muestra el esquema de verificación contra el vuelco para tanques sin anclar, se puede observar que el viento se presenta en dos componentes, afecta al tanque tanto de manera vertical como horizontal. El punto referente para el momento es la unión de la pared del tanque al suelo, y el momento que se va a generar en base a la fuerza de la velocidad del viento es a la mitad de altura del tanque como al extremo de este, tanto para la fuerza del viento horizontal y vertical respectivamente.

Debido a que el tanque de este trabajo no cuenta con cubierta porque necesita la inyección constante de oxígeno, se descarta el momento de la componente vertical. Por lo que la ecuación de momento para el tanque sería el siguiente:

$$M_w = M_{ws} + M_{wr} \quad (\text{Ec. 45})$$

Como se aclaró antes, el momento vertical se desprecia ($M_{wr} = 0$) por ser inexistente ante la ausencia de techo. La ecuación pasa a ser la siguiente:

$$M_w = M_{ws}$$

$$M_w = F_t (H/2)$$

Al igual que el momento vertical se desprecia por la ausencia de techo, también se desprecia el momento por acción de presión interna, ya que tampoco aplica en este caso.

El siguiente momento por calcular es el momento generado por el peso del tanque, el cual está compuesto por el peso de la pared o carcasa del tanque, y del techo de este. Este tanque no cuenta con techo por lo que se desprecia su término. Con el peso de la carcasa calculado, se puede expresar el momento generado con la siguiente ecuación.

$$M_{DL} = m_s \times g(D/2) \quad (\text{Ec. 46})$$

El momento faltante es el momento generado por el peso del líquido, el cual se presenta en dos ecuaciones y se toma el menor resultado de los dos.

$$w_{L1} = 70 t_b \sqrt{F_{by}GH} \quad (\text{Ec. 47})$$

$$w_{L2} = 70.4 HD \quad (\text{Ec. 48})$$

Donde:

w_L = Peso del fluido equivalente de la circunferencia de la carcasa en [N/m]

F_{by} = Esfuerzo de fluencia mínimo de las placas de fondo en [MPa]

H = Altura del fluido en [m]

G = Gravedad específica del fluido o 0.7 equivalente

D = Diámetro del tanque en [m]

t_b = Espesor requerido de las placas de fondo, sin considerar C.A en [mm]

Para calcular el momento por la acción del fluido, aparte del peso de fluido equivalente, se necesita hallar la fuerza en el perímetro de la pared.

$$2p = \pi D$$

$$w_a = w_L \times 2p$$

$$M_F = w_a(D/2)$$

Luego de obtener todas las variables, se vuelve a los requisitos presentados en las ecuaciones 46, 47 y 48 para verificar si cumple o no, y si necesita anclaje o no.

1.11.10. Acción nival y pluvial

La acción nival y pluvial es cuando el tanque se ve afectado por lluvias intensas como en la selva, o nevadas como en la sierra alta. Ambas situaciones climatológicas no van a afectar en la estabilidad del tanque debido a que la estructura no cuenta con techo, y solo se vería afectado en la superficie superior que sería el espesor de la pared del tanque. Al ser mínima la influencia de las acciones nivales y pluviales, se desprecia.

1.11.11. Seguridad del tanque contra deslizamiento

Lo último que debe de verificarse y asegurarse que el tanque como estructura al almacenar el fluido no vaya a volcarse por algún movimiento y que pierda su firmeza, es el deslizamiento del tanque en la base durante un sismo. Aunque el tanque no se vaya a volcar, puede haber el caso de que suceda una acción deslizante en la base del tanque con la superficie en la que reposa. Dicha acción sucede debido a la fuerza cortante, el cual tiene su contrario que es la fuerza resistente al deslizamiento, y para que no ocurra dicho movimiento en la base del tanque, la fuerza resistente al deslizamiento por sismo debe ser mayor a la fuerza cortante en la base del tanque.

$$V_s > V \quad (\text{Ec. 49})$$

Donde:

V = Fuerza cortante total en la base del tanque en [N]

V_s = Fuerza resistente al deslizamiento en [N]

De las ecuaciones de la norma API 650, se sabe del método de cortante basal, el cual considera la carga sísmica como un equivalente de fuerzas laterales, involucrando a las dos componentes existentes, impulsiva y convectiva.

$$V_s > V \quad (\text{Ec. 49})$$

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} \quad (\text{Ec. 50})$$

$$V_i = A_i \times (W_s + W_r + W_f + W_i) \quad (\text{Ec. 51})$$

$$V_c = A_c \times W_c \quad (\text{Ec. 52})$$

Como se puede observar, la mayoría de las variables van a ser obtenidas en ecuaciones anteriores. Con dicho resultado se podrá determinar si el tanque es estable bajo el movimiento del sismo, sin llegar a producirse deslizamiento, o no.

1.11.12. Plataforma del tanque agitador

Luego de realizarse el cálculo mediante la norma API 650 para la estructura del tanque y de los componentes que lo conforman, es el momento de realizar el cálculo de la plataforma que se va a encargar de soportar y mantener el agitador como un todo, dando la función final de un tanque agitador. La plataforma no solo sirve para soportar el equipo, también es usada para el acceso del personal de mantenimiento u operativo, para cuando se tenga que realizar una revisión al equipo o supervisión de esta o mezcla del tanque.

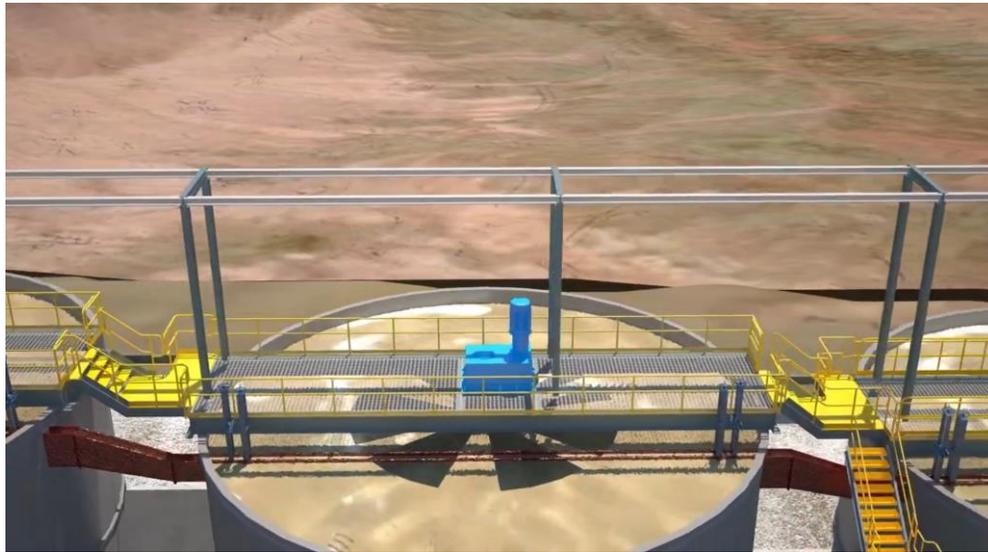


Figura 1.22. Modelo de plataforma de acceso sobre tanque. De [37]

Como ejemplo se tiene la **Figura 2.22**, en el cual se puede visualizar de color celeste el motor junto a la caja reductora, el cual se encuentra reposado en un conjunto de vigas y grillas metálicas que conforman la plataforma de soporte, acceso o de mantenimiento. En la misma plataforma se puede visualizar que se encuentra reposando en los dos extremos de la plataforma sobre el borde o último anillo del tanque agitador. Aquel punto es crítico y el cual se va a analizar cómo es que sucede la reacción al ser diseñado cada parte con una norma distinta.

1.12. Código ASME

El Código de Calderas y Recipientes a Presión brindado por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME) es un conjunto de normas para el diseño y construcción de recipientes a presión y derivados, incluyendo selección de materiales, fabricación, pruebas e inspección. Está compuesto por once secciones, y dentro de cada sección hay divisiones. Para este trabajo se va a hacer mención y uso de la sección VIII del código donde establece procedimientos para la fabricación de recipientes a presión no expuestos a la acción directa del fuego, siendo el objetivo de este trabajo.

Dicha sección está constituida por tres divisiones, en donde la primera menciona las reglas para la construcción de dicho recipiente, la segunda división menciona reglas alternativas con respecto a la primera, y la tercera división son reglas alternativas para la construcción de recipientes de alta.

El código por usar en específico en este proyecto será del código ASME Sección VIII División 1. La ligera diferencia que hay entre la división uno y dos es en base a los factores de seguridad, siendo en la primera la que tiene mayor valor [41].

En base a las normas obtenidas del código ASME, nos ha brindado limitaciones para el diseño de nuestro tanque, los cuales son las siguientes:

- Presión máxima menor a 3000 PSI
- Calentadores tubulares sujetos a fuego
- Recipientes a presión que son parte integral de componentes de sistemas de tuberías
- Sistema estacionario
- Volumen mínimo del recipiente 120 galones

1.13. Norma AISC

Así como existe normativa o regulaciones para construcción, o especificaciones técnicas para el diseño de un tanque agitador, también existen códigos o requerimientos mínimos para el óptimo funcionamiento de las estructuras para evitar el riesgo de vida y garantizar la seguridad de los usuarios [42]. La norma AISC es un código de construcción para el diseño de estructuras de acero. Lo novedoso y la forma en cómo se va a aplicar dicha norma es al evaluar y analizar la interacción que habrá entre el diseño de la plataforma de soporte o mantenimiento, con el espesor o pared del tanque agitador.

Para el diseño de la estructura del tanque se hará referencia de ciertas normas del AISC como requisito:

- AISC 360-16: Norma estándar para perfiles de acero, haciendo referencia al diseño en general.
- AISC 341-16: Norma que brinda requerimientos mínimos para estructuras que sean ubicadas en zonas con riesgo sísmico.
- AISC 358-16: Norma para el diseño de uniones estructurales que sean ubicadas en zonas con riesgo sísmico.
- ASCE 7-16: Código de referencia del AISC como complemento a las normas anteriores para toma de muestras de carga muerta, viva, naturales como lluvia, nieve, viento, etc.
- El código ASCE 7 tiene zonas donde aplica la norma, pero al ser Perú una de las zonas que están fuera de ella, se deberá consultar la normativa local, el cual es la Norma Técnica E0.30: Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE).

La norma AISC 360 será la más utilizada en el transcurso del desarrollo del proyecto, ya que brinda un método para propósitos de diseño, llamado “Diseño en Base a Factores de Carga y Resistencia” o por sus siglas LRFD, el cual será utilizado para cálculos como acción sísmica o eólica, también para la definición de silueta de la viga ante un análisis de cargas estáticas y distribuidas.

1.13.1. Definición de cargas presentes en la viga

El diseño de la plataforma se ha realizado en un software de diseño SolidWorks, haciendo uso de dos vigas principales que cruzan de un extremo a otro de las paredes del tanque pasando por el centro. Además, se hará uso de vigas de menor longitud para distribuir las fuerzas y para que reposen las planchas metálicas o grillas y el motorreductor.

Las cargas estáticas presentes que estarán sometidos en el centro de la plataforma son los accesorios operacionales del agitador, los cuales se pueden encontrar en la **Tabla 5** del presente trabajo. Se tienen los componentes motor reductor, agitador y eje, los cuales dan

una suma de 3869.78 kg, siendo el valor total del peso a considerar para la carga estática. Con dicho valor, se va a tomar para el cálculo y elección de perfil de viga.

Posterior a ello, se calculará también las cargas distribuidas, los cuales son cargas que van a estar sometidas a lo largo de la viga, como la baranda o pasamanos de la plataforma, grilla o superficie para operaciones de mantenimiento (40 kg/m²).

Componente	Peso
Pasamanos	419.3 kg
Rodapié	53.31 kg
Grilla metálica	966 kg
Total	1438.6 kg

Tabla 12. Valores de los componentes secundarios sobre la plataforma.

Teniendo presente todos los elementos y las cargas que van a someter a las vigas del tanque, se podrá realizar el cálculo de la viga y selección de sus dimensiones, empleando la norma AISC 360.

Teniendo en cuenta los movimientos y vibraciones que se puede generar en la actividad del tanque agitador, se debe de considerar ciertos puntos para el análisis modal.

- Para cuando se realice el modelamiento del sistema, se debe de tener bastante cuidado y atención en las uniones. De ello va a depender bastante la rigidez del sistema, influenciando altamente el resultado. Por ello, se realizó el diseño con uniones simples y en algunos casos completamente rígidas.
- Se puede apreciar que el peso del tanque incluyendo su contenido es mucho mayor a la plataforma incluyendo el agitador al considerar el tamaño del sistema en conjunto. La plataforma con agitador llega a 1.4 toneladas, mientras que el tanque junto a su contenido llega a un valor de 1450 toneladas.
- El agitador se encuentra en el centro de la plataforma y el tanque para evitar que se genere un alabeo en la plataforma.

1.13.2. Método LRFD

La manera en la que se va a calcular el diseño de la viga no va a ser por el modelo tradicional de ecuaciones de esfuerzos, sino será mediante el uso de la norma AISC, norma que brinda una serie de pasos y consideraciones [43].

Como primer paso para calcular una viga utilizando la norma AISC 360, se debe de identificar y determinar las cargas que actúan sobre la viga, y calcular las magnitudes y el tipo de distribución que tendrán las cargas sobre la viga. Todo esto ha sido calculado y definido previamente, siendo los componentes de funcionamiento del agitador como carga estática (motor, agitador, eje), y los accesorios de la plataforma y operador como carga distribuida (pasamanos, grilla metálica, rodapié).

Como segundo paso se procede a la selección de la sección transversal de la viga, basándonos en las cargas calculadas previamente junto a los requisitos de resistencia. La norma AISC brinda en su manual tablas y gráficos que facilitan la selección del perfil.

1.13.3. Definición de estados de carga

Para la suma de cargas, se va a utilizar el método LRFD, el cual compara el efecto de las reacciones sobre la viga, teniendo que ser menor a la resistencia. La ecuación principal de dicho método es la siguiente.

$$R_u \leq \phi \times R_n \quad (\text{Ec. 53})$$

Donde:

R_u = Resistencia requerida (LRFD)

R_n = Resistencia nominal

ϕ = Factor de resistencia

$\phi \times R_n$ = Resistencia de diseño

La resistencia requerida hace referencia a la fuerza máxima en un miembro o conexión bajo cargas factorizadas, la resistencia nominal refiere a la fuerza que causa la falla del miembro o conexión, y la resistencia de diseño es la resistencia nominal multiplicada por un factor de resistencia.

Para una expresión más sencilla del método LRFD, se tiene la **Figura 1.23** en la que se grafica la misma ecuación, mostrando que la resistencia requerida debe ser menor o igual que la resistencia de diseño. Ambos lados de la ecuación están sujetas a distintas incertidumbres como el tipo de carga a la que va a estar sometida la estructura, e incertidumbre en el modelaje y análisis estructural [28].

<p>Efecto de las acciones (Fuerzas, esfuerzos, deflexiones, etc.) [Q]</p>	\leq	<p>Resistencia a los efectos de las acciones (Resistencia, rigidez, ductilidad) [R]</p>
--	--------	--

Figura 1.23. Ecuación básica de diseño LRFD. De [34]

Tomando ahora parte de la norma ASCE-7, las cargas nominales a considerar en el análisis estructural son las siguientes.

- **Cargas muertas (D):** Carga muerta debido al peso propio de los miembros estructurales y todo elemento soportado por la edificación. En este caso particular, además del peso propio de los elementos estructurales se consideran como cargas muertas el peso del grating (tramex).
- **Cargas vivas (L):** Carga viva producida por el peso de los ocupantes y cualquier otro elemento movable soportado por la edificación. En este caso particular se consideraron como cargas vivas la sobrecarga del mantenimiento y funcionamiento del agitador. La carga viva de la plataforma deberá de soportar una carga distribuida de 500 kg/m².
- **Cargas Sísmicas (E):** Determinado en base a la Normativa peruana E 0.30.
- **Carga viva de techo (L_r):** Carga viva de techo no considerada para esta estructura.
- **Carga de viento (W):** Carga de viento no considerada para esta estructura.

- **Carga de nieve (S):** Carga de nieve en función a las condiciones del diseño, se considerará una presión de 0.4 kPa.
- **Carga de lluvia (R):** Carga debido al agua pluvial o hielo no considerada para esta estructura.

1.13.4. Combinaciones de cargas

Junto a todas estas variables, existe una combinación de cargas y cargas factorizadas ya establecidas, presentadas en la Sección de las especificaciones AISC-LRFD [34], de las cuales se tomará el valor mayor o más crítico según el valor que se tenga con las variables expuestas con anterioridad [29].

Combinaciones de carga	Cargas factorizadas
(CC-1)	1.4D
(CC-2)	1.2D + 1.6L + 0.5 (Lr o S o R)
(CC-3)	1.2D + 1.6L (Lr o S o R) + (0.5L o 0.8W)
(CC-4)	1.2D + 1.6W + 0.5L + 0.5 (Lr o S o R)
(CC-5)	1.2D + 1.0E + 0.5L + 0.25
(CC-6)	0.9 + 1.6W
(CC-7)	0.9D + 1.0E

Tabla 13. Cargas y combinaciones de cargas LRFD. De [34]

Factor de resistencia ϕ	Estado límite
0.90	Flujo plástico en la sección total.
0.75	Fractura (fractura en la sección neta, ruptura por cortante y tensión, fractura de tornillos, fracturas de soldadura, etc.)
0.85	Pandeo de columnas aisladas.
0.90	Flexión y cortante (vigas)
0.90	Miembros sujetos a compresión axial y flexión (miembros flexocomprimidos o columnas)

Tabla 14. Factores de resistencia. De [34]

Teniendo la ecuación de diseño base, ahora se debe de segmentar por tipos de fuerza expresado en la siguiente tabla:

Ecuaciones de diseño	Tipo de ecuación
$T_u \leq \phi \times T_n$	Tensión
$P_u \leq \phi \times P_n$	Compresión
$M_u \leq \phi \times M_n$	Flexión
$V_u \leq \phi \times V_n$	Cortante

Tabla 15. Ecuaciones de diseño. De [34]

1.13.5. Verificación de resistencia

El siguiente requisito es verificar la resistencia de la sección transversal seleccionada para asegurarse de que cumple con los estándares especificados en la normativa. Dicha verificación implica evaluar la resistencia a la flexión, cortante, aplastamiento, entre otros. Dado que la flexión es generalmente la carga más crítica en comparación con el cortante, la práctica común en el diseño de vigas es priorizar la resistencia a la flexión y luego verificar la resistencia al cortante. El proceso de diseño se describe de la siguiente manera.

Inicialmente, se calcula la resistencia al momento requerido, es decir, el momento de carga factorizada (M_u) para LRFD, como se indica en la **Tabla 8** de ecuaciones de diseño. Aunque el peso de la viga es parte de la carga muerta, se desconoce en este punto debido a la incertidumbre sobre el tipo de perfil de viga. Si se ignora al principio del proceso de diseño, la forma seleccionada generalmente será satisfactoria al recalcular el momento más tarde. Por lo tanto, es crucial seleccionar un perfil que cumpla con los requisitos de resistencia, y esto se puede lograr de varias maneras. El método más práctico implica utilizar las ecuaciones de las tablas de diseño de vigas de la Parte 3 del manual AISC [43].

Finalmente, se debe verificar la resistencia al cortante o la deflexión como análisis final para asegurarse de que la elección del perfil de la viga sea correcta. En el análisis de deflexión, comúnmente se divide la longitud con un valor constante de 240, pero, dado que se trata de una viga crítica en este trabajo, se busca la deflexión mínima, por lo que el divisor en la ecuación de deflexión máxima se ajustará de 240 a 720.

1.13.6. Análisis por flexión

En el caso de que la viga estuviese conectada a otros elementos como columnas o placas de apoyo, se tendría que diseñar y verificar las conexiones según el criterio de la norma AISC 360, pero como en este trabajo no se da el caso, no será necesario el proceder con el cálculo o análisis de dicho paso.

1.13.6.1. Carga viva

La viga por diseñar se encuentra en soportes simples los cuales serían los bordes de la pared del tanque. Las cargas por considerar dentro de la viga van a ser el peso mismo de la plataforma como barandas y grilla metálica, como la carga axial del agitador. El diagrama de representación de fuerzas en la viga es el siguiente.

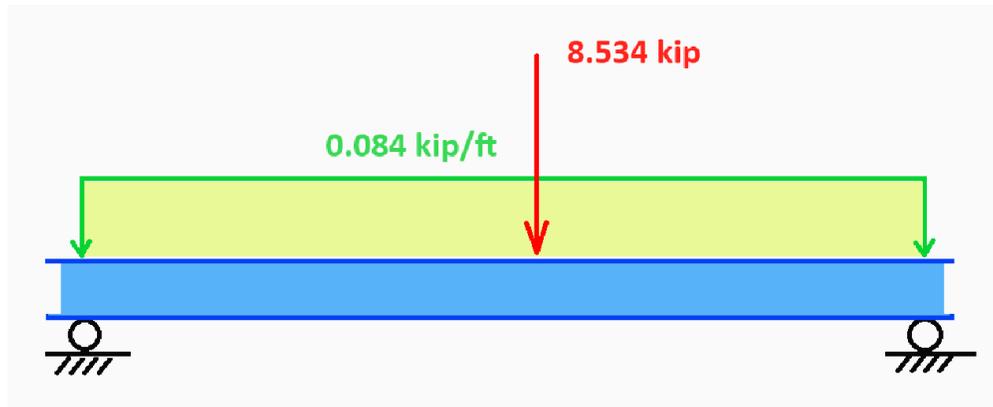


Figura 1.24. Diagrama de cargas sobre la viga.

Como se puede observar, los extremos de la viga en donde va a estar soportado por el borde del tanque se consideran como apoyos simples. La viga presenta una carga distribuida a lo largo de ella, y una carga específica.

Como se mencionó anteriormente, se va a ignorar el peso de la viga (carga muerta) para después verificar su efecto y confirmar la selección luego del análisis por flexión. Con las cargas presentes (cargas vivas), se hará uso de la siguiente ecuación factorizada.

$$W = 1.2D + 1.6L \quad (\text{Ec. 54})$$

Donde:

W = Intensidad de la carga distribuida uniformemente factorizada (LRFD).

D = Carga muerta debido al peso propio de los miembros estructurales.

L = Carga viva debido a la ocupación y equipo (0.31 kips/ft).

Luego de haber obtenido el valor de la carga factorizada, se accede al manual AISC Sección 3, Tabla 3-23, página 404 [43] (**Anexo 1**) de donde se obtendrán las ecuaciones de momento de una viga simplemente apoyada, con una sola reacción en cada apoyo, y con una carga uniformemente distribuida.

De la sección del manual, al estar analizando por el factor más crítico que es la flexión, se va a utilizar la ecuación de momento máximo en el centro de la viga.

$$M_{m\acute{a}x} = M_{ul} = \frac{W \times L^2}{8} \quad (\text{Ec. 55})$$

Reemplazando los valores de la carga factorizada y tomando L como la longitud de la viga en pies, se obtiene dicho resultado.

Ahora, rescatando la ecuación del **Anexo 1**, y el factor de resistencia de la **Tabla 14** con el valor de 0.9 al tratarse de una viga, se obtiene lo siguiente mediante el método LRFD.

$$R_u \leq \phi \times R_n \quad (\text{Ec. 56})$$

$$\phi = 0.9$$

$$\text{Momento nominal} = \text{Momento pl\acute{a}stico} = F_y \times Z_x$$

Donde:

F_y = Esfuerzo de fluencia (36.6 ksi)

Z_x = Factor de resistencia en elementos a flexi3n

Teniendo las variables definidas, utilizando la ecuaci3n de resistencia para momento y teniendo los valores del momento m\acute{a}ximo y nominal, se puede desarrollar la ecuaci3n.

$$M_{ul} \leq \phi \times M_{nl} \quad (\text{Ec. 57})$$

$$M_{ul} \leq \phi \times F_y \times Z_{xl} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$Z_{xl} = \frac{M_{ul}}{(\phi \times F_y)} \quad (\text{Ec. 59})$$

Luego de obtener el valor del factor de resistencia en elementos a flexi3n, considerando las cargas que soporta la viga que son los accesorios de funcionamiento del

tanque agitador y las barandas y plataforma para el mantenimiento y operación, se procede a la selección del perfil de la viga.

1.13.6.2. Carga muerta

Para la selección del perfil de la viga, se va a acudir a la plantilla de Excel AISC, la cual brinda dimensiones y propiedades de perfiles de acero AISC [44]. En un inicio se puede decir que, en base a lo calculado en la carga viva, el perfil de viga elegido es correcto, ya que soporta el factor de flexión, pero falta realizar el mismo análisis considerando el peso de la viga y el análisis de deflexión. Al tratarse de una estructura o plataforma de mantenimiento que va a tener constante fuerza de agitación, se busca que tenga la menor deflexión posible, por ello es por lo que se va a realizar el cálculo de flexión incluyendo el peso de la viga utilizando un perfil mayor.

Conociendo el perfil de la viga, el segundo número de su nomenclatura es el peso según la longitud de ella. Con dicho valor y volviendo a realizar el mismo procedimiento del método LRFD, se volverá a analizar si el perfil seleccionado es el adecuado.

1.13.7. Verificación de deflexiones

En este último e importante paso, se va a evaluar y verificar que las deflexiones de la viga cumplan con los límites permitidos en la norma. Especialmente importante para estructuras sensibles a las deformaciones, como pisos y techos, siendo en este caso la viga una plataforma en la que transitará un operario y soportará equipos.

Este análisis es importante en las estructuras, ya que además de ser seguras, deben de cumplir con un factor de utilidad. Una estructura útil es aquella que se desempeña satisfactoriamente, sin causar ninguna incomodidad o percepción de inseguridad para los ocupantes o usuarios finales de la estructura.

Para una viga, ser útil generalmente significa que las deformaciones principales a la flexión deben ser limitadas. La deflexión excesiva suele ser una indicación de un elemento muy flexible, lo que puede provocar problemas con las vibraciones. Las deflexiones en sí mismas pueden causar problemas en los elementos adheridos a la viga, pueden resultar dañados por pequeñas distorsiones, además los usuarios de la estructura pueden ver grandes deflexiones negativamente y asumir erróneamente que la estructura no es segura.

La ecuación de deformación máxima permitida es la siguiente.

$$\Delta_{un} = \frac{L}{720} \quad (\text{Ec. 60})$$

Volviendo al manual AISC 360 para viga, en la misma tabla de la que se adquirió la ecuación para el momento máximo de vigas, también se va a extraer del **Anexo 1** la ecuación de deflexión máxima en el centro de la viga.

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{5WL^4}{384EI} \quad (\text{Ec. 61})$$

Donde:

W = Intensidad de la carga viva distribuida (kips/in).

L = Longitud de la viga (in).

E = Módulo de elasticidad o módulo de Young

I = Momento de inercia mayor del perfil de viga

El eje x es el eje fuerte y el que se va a usar para encontrar la deflexión. Para que se cumpla el análisis de deflexión y que el perfil escogido sea el ideal para el objetivo del proyecto, la deflexión nominal debe ser mayor a la deflexión crítica.

$$\Delta_{un} \geq \Delta_{m\acute{a}x} \quad (\text{Ec. 62})$$

Dicho valor como resultado después de los cálculos realizados, si se observa que no se cumplen, se debe de elegir otro perfil de viga con otro valor de inercia en el eje x, hasta que el valor de deflexión máxima sea menor a la nominal. Y con este último cálculo e iteraciones necesarias, se podrá seleccionar el perfil de viga a utilizar para la plataforma del sistema del presente trabajo.

1.14. Background del software para el análisis del diseño

Para el análisis del diseño final de la estructura, luego de todos los cálculos realizados para diseñar tanto para la estructura del tanque como para la plataforma que soportará sus componentes, se realizaron distintas pruebas en el software. El primero de ellos será para la plataforma soporte, analizando la reacción de la composición de la estructura con su carga, y también para el análisis del sistema como uno solo. El segundo será el análisis del tanque con la carga eólica, para confirmar si el cálculo fue certero y la norma API 650 cumple.

1.14.1. SimSolid

SimSolid es un software de simulación por elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés) que utiliza enfoque de modelado directo para el análisis estático, optimizando el comportamiento estructural de diseños mecánicos.

Lo que diferencia a SimSolid de los otros programas como SolidWorks o HyperMesh, es su capacidad de realizar los análisis directamente sobre la geometría del modelo CAD, sin necesidad de generar una malla como requieren dichos softwares.

Utiliza la tecnología de análisis de frontera extendida (XFEA por sus siglas en inglés) que permite obtener resultados precisos en geometrías complejas y uniones soldadas, sin necesitar una discretización fina de la malla como los otros programas. Esto convierte a SimSolid en una herramienta eficiente y rápida para el análisis de conjuntos de diseño complejos [45].

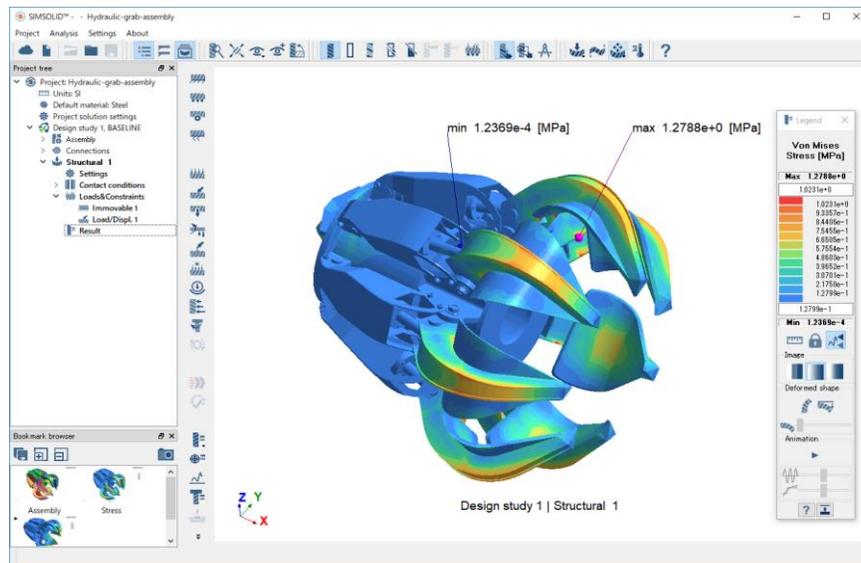


Figura 1.25. Ejemplo de diseño estructural en SimSolid. De [45]

Aunque SimSolid no genere mallas en los modelos CAD, ahorrando tiempo y complejidad, sí utiliza el análisis de elementos finitos de manera precisa y directa en los modelos CAD, eliminando la necesidad de preprocesamiento.

SimSolid emplea un método matemático llamado “Análisis de Vóxeles Extendidos” (XVA) que utiliza elementos volumétricos en lugar de elementos finitos tradicionales. Esto permite realizar el análisis directamente en el modelo CAD sin mallar.

El proceso de XVA consiste en: discretizar el modelo CAD en una matriz 3D de vóxeles, calcular propiedades mecánicas para cada vóxel, realizar el análisis de tensiones y desplazamientos con una formulación especial de elementos finitos extendidos, y finalmente visualizar los resultados. Entre más preciso sea el tamaño del elemento, el resultado será más preciso a costa de mayor esfuerzo computacional.

1.14.1.1. Análisis matemático por elementos finitos

El análisis matemático que realiza SimSolid se basa en el Método de Elementos Finitos (MEF), involucrando: discretización en vóxeles, formulación de elementos, matrices

de rigidez, ensamblaje del sistema, aplicación de condiciones de contorno, solución del sistema de ecuaciones, y post-procesamiento.

El MEF permite resolver numéricamente problemas complejos mediante la discretización en elementos finitos, interpolación para formular ecuaciones algebraicas aproximadas, y resolución del sistema de ecuaciones resultante. De esta manera se puede obtener soluciones eficientes y precisas para diversos problemas de ingeniería [46]. Método del cual involucra las siguientes ecuaciones diferenciales.

- Ecuaciones de equilibrio:

Esta ecuación expresa el equilibrio de fuerzas en una dirección dada, mayormente en el dominio del soporte.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (\text{Ec. 53})$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (\text{Ec. 54})$$

- Relación esfuerzo - deformación:

Relaciona esfuerzos y deformaciones mediante la Ley de Hooke generalizada, la cual permite obtener las tensiones.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \times \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{zz} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 55})$$

- Relaciones deformación unitaria - desplazamiento:

Relaciona desplazamientos con deformaciones usando relaciones geométricas en dos dimensiones.

$$\varepsilon_x = \frac{\delta U}{\delta x} \quad (\text{Ec. 56})$$

$$\varepsilon_y = \frac{\delta V}{\delta y} \quad (\text{Ec. 57})$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta U}{\delta y} + \frac{\delta V}{\delta x} \quad (\text{Ec. 58})$$

1.14.2. RFEM

Al igual que el SimSolid, el software RFEM 6 es un software de análisis estructural basado en el método de elementos finitos (FEM). Permite modelar y analizar sistemas estructurales en 2D y 3D, teniendo en cuenta diferentes tipos de cargas, materiales y condiciones de contorno, complementando el análisis con la revisión de normas estructurales dadas el caso de diseño, pudiendo revisar y analizar si es que el diseño cumple o no cumple con la norma respectiva [47].

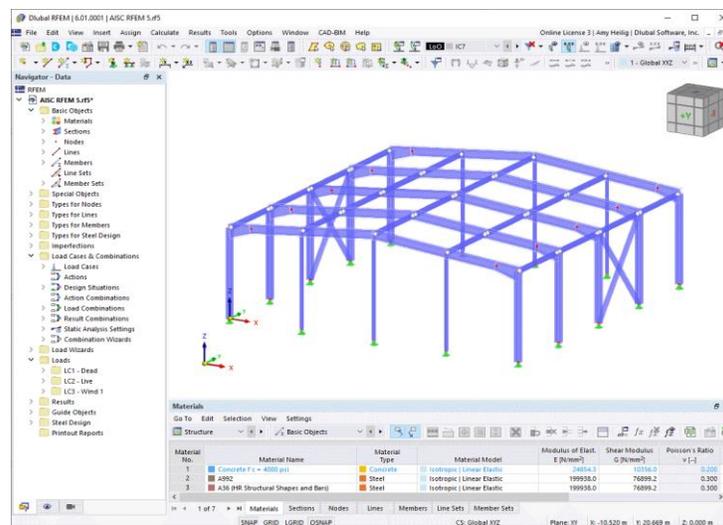


Figura 1.26. Ejemplo de diseño estructural en RFEM 6. De [47]

RFEM utiliza el método matemático de elementos finitos, el cual se implementa mediante algoritmos numéricos para la discretización del dominio, la generación de mallas, soluciones de ecuaciones y visualización de resultados, similar al software SimSolid [48]. La diferencia entre una y otra es la precisión y comparativa entre normas existentes.

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se proporciona información relevante del diseño y análisis del sistema abordado en este trabajo. El proceso metodológico se divide en tres etapas: recolección de información, planteamiento de variables y diseño y finalmente, la realización de simulaciones y presentación de resultados correspondientes a cada fase del trabajo.

2.1. Tipo y enfoque de la investigación

Según Roberto Sampieri [55], la investigación descriptiva se define como: el estudio donde se busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice (tanque agitador), sin necesidad de indicar cómo se relacionan estas. Dado que esta investigación tiene como objetivo mejorar el proceso de lixiviación integrando dos normativas, se cuenta con la descripción de dos elementos en los que se va a aplicar dichas normativas (plataforma y tanque), especificando los requerimientos de diseño, se puede concluir que esta investigación es de tipo descriptiva.

Además, el enfoque de esta investigación es de tipo explicativo, ya que da a conocer el por qué ocurre un aplastamiento o abollamiento en la junta de la plataforma con el tanque agitador (fenómeno) y en qué condiciones se manifiesta (fuerzas involucradas).

Por lo tanto, el alcance metodológico es de tipo descriptivo-explicativo, ya que implica una revisión exhaustiva de los procesos involucrados, detallando con precisión sus efectos, así como el análisis estructural de las fuerzas involucradas.

2.2. Fuentes y Técnicas de recolección de información

En esta investigación se distinguen entre fuentes primarias y secundarias. Lo que diferencia entre una y otra es que la investigación primaria son fuente de información

original, mientras que la secundaria son los que ya han procesado información de alguna fuente primaria [55].

En el contexto de este trabajo sobre la mejora del diseño, se realizará descripción del tanque agitador y plataforma, todo el proceso de diseño y cálculos realizadas están comprendidas bajo las normas API (American Petroleum Institute) y AISC (American Institute of Steel Construction), son consideradas como fuentes primarias. Estas normativas proporcionan los parámetros de consideración para el diseño y cálculo, tanto para el tanque agitador como para la plataforma.

Por el contrario, en el marco teórico se han utilizado principalmente fuentes secundarias, como investigaciones publicadas en revistas o tesis de investigación, para obtener información actualizada y explicativa de los fundamentos teóricos necesarios para esta investigación.

2.3.Componentes de la investigación

Al ser un trabajo de investigación descriptivo-explicativo, se presentan los componentes fundamentales a desarrollar a lo largo del trabajo.

El primer elemento es el tanque agitador para el proceso de lixiviación de oro, utilizado en la industria minera para la extracción del mineral. Este equipo consiste en un recipiente cilíndrico, conteniendo una mezcla de mineral aurífero y solución lixivante, que suele ser una solución cianurada, con el propósito de promover la mezcla haciendo uso de un sistema de agitación.

El segundo elemento fundamental a lo largo del trabajo es la plataforma que va a reposar sobre el tanque agitador. Dicha estructura es fundamental ya que proporciona soporte al sistema de agitación, facilita el acceso al equipo y al personal operativo. La plataforma se ubica sobre la parte superior del tanque agitador y está dimensionada de manera adecuada para soportar el peso del sistema de agitación. Además, puede contar con barandas de seguridad y pasamanos para proteger al personal que trabaja en la zona.

Aparte del alcance descriptivo de la investigación, también se tiene el explicativo, y para poder explicar las causas y los fenómenos a suceder en el sistema, se necesita conocer las fuerzas involucradas en cada elemento. Para ello, se cuenta con la norma API 650 para el tanque agitador, la cual nos brinda requerimientos como la relación de dimensiones del tanque, como el espesor mínimo de la pared, requisitos de soldadura, y accesorios y componentes con los que se debe de tomar en cuenta.

La segunda normativa principal de la presente investigación es la norma AISC, para el diseño de estructura de acero, con el método LRFD. Esta norma nos presenta y define las combinaciones de cargas que se tienen que considerar y evaluar en la plataforma, principalmente las cargas vivas (personal en movimiento), cargas muertas (peso propio de la estructura y equipo) e inclusive el factor de seguridad.

2.4.Diagrama de flujo

El proceso del diseño que se va a tomar en este trabajo está presentado gráficamente en la **Figura 2.1**. La investigación inicia con la determinación y requerimientos tanto de diseño como funcionales, en donde se realiza la selección del sistema de tanque agitador a diseñar. Luego de tener el diseño ideal del sistema, se procede al diseño del tanque agitador, iniciando con la presentación de los requerimientos que establece la norma API 650, siguiendo con el análisis de estabilidad del tanque y las cargas en ella. Después de identificar las características del tanque, se procede a la selección de componentes de este y sus características que van a ser utilizadas en la siguiente fase. Como siguiente fase se procede a realizar el diseño de la plataforma que va a reposar sobre el tanque, y al igual que el tanque, se presentan los requerimientos de la norma, esta vez del AISC, y junto a las cargas de los componentes identificados anteriormente, se realiza el análisis de cargas y con ello se determina el perfil de viga a emplear para la plataforma. Como reflejo y respuesta de ello, se cuenta con la simulación tanto de la plataforma sola como del sistema en conjunto, mostrando si aparece algún error o falla por diseño o análisis de cargas. Finalmente, se concluye con las observaciones de las incongruencias encontradas en base al análisis de dos normativas distintas para el resultado final de un solo sistema.

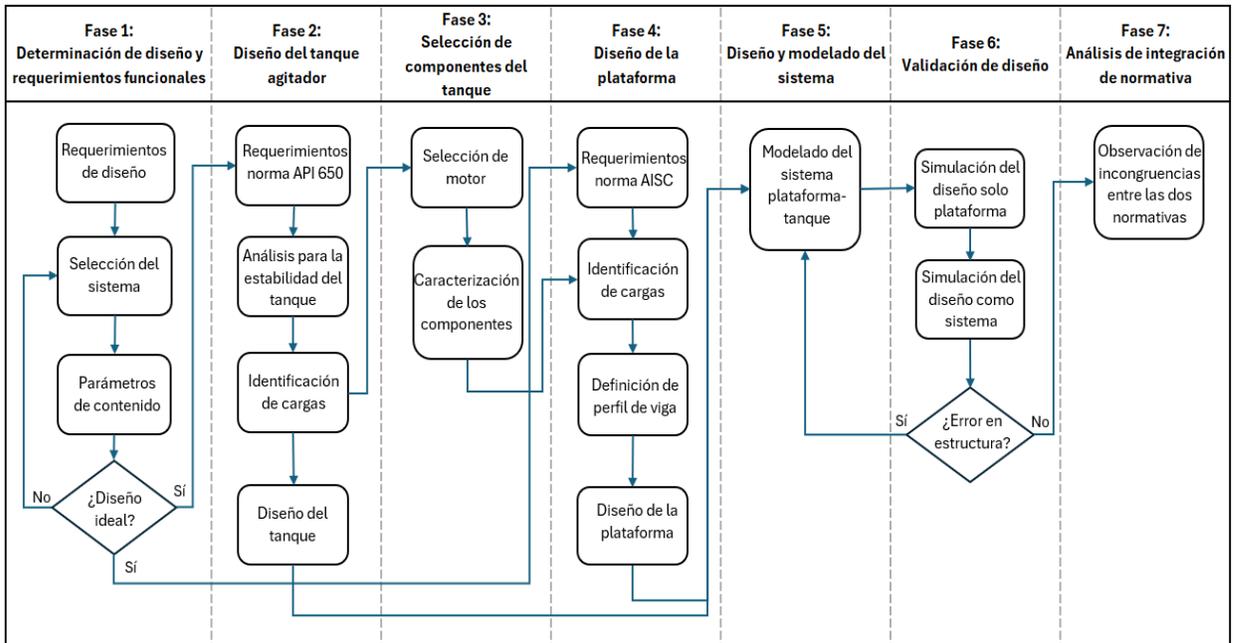


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la investigación

2.5. Fase 1: Determinación de diseño y requerimientos funcionales

Para la determinación de las dimensiones y requerimientos funcionales, se componen de tres etapas tal como se muestra en la siguiente figura. Se inicia con los requerimientos de diseño, presentando la matriz morfológica y de necesidades para poder realizar una selección óptima del sistema, culminando con la definición de los parámetros del contenido del tanque.

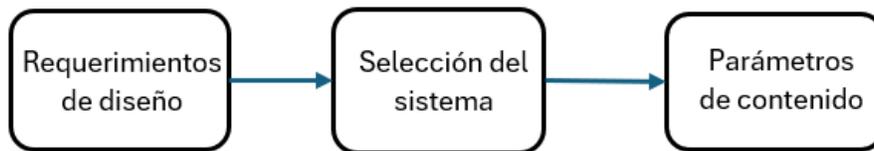


Figura 2.2. Proceso de determinación de diseño y requerimientos funcionales

2.5.1. Requerimientos de diseño

Para la determinación de las dimensiones se tienen ciertas consideraciones para todo el desarrollo del trabajo. Una de ellas es la capacidad del tanque que va a ser de 1000 metros

cúbicos. Dado que la capacidad del tanque está predefinida, en base a pruebas e investigaciones de trabajos externos [18], [49], el tanque va a necesitar de una potencia de 55 kW para el funcionamiento del agitador para un tanque de capacidad de este trabajo. Con la capacidad del tanque de 1 000 000 litros, se podrá realizar los cálculos dimensionales del tanque según la norma API 650.

- Capacidad de tanque de 1 000 000 litros.
- Tanque de mezclado
- Sistema de agitación con impulsor rotatorio
- Un solo eje de agitación
- Un solo impulsor montado sobre el único eje de agitación
- Material del agitador: acero inoxidable
- Motor eléctrico para impulsar el agitador
- Estructura metálica para montar el motor que impulsa el agitador
- Utilizar elementos normalizados
- Aplicar un diseño adoptivo [50]

Existen requerimientos importantes que se deben de tomar en cuenta al diseñar el tanque como las normas técnicas, pero también existen requisitos debido a la demanda. Según el tipo de fluido o mezcla que vaya a contener el tanque, tendrá una temperatura a la cual deberá de mantenerse o no, siendo un requisito según la demanda del cliente. Debido a ello, se ha realizado una matriz de necesidades mostrado en la **Tabla 16**, calificando su nivel de importancia si es requerido o deseado, y también si es propuesto por el cliente o ingeniería.

Concepto	R/D	Propone	Descripción
Función	R	C+I	Operación de mezclado
Dimensiones	R D	C I	Capacidad del tanque de mezclado de 100 m3 Un solo eje de agitación, un solo impulsor, agitador de entrada superior
Movimiento	D	I	Movimiento rotatorio del agitador
Energía	R	C+I	Motor eléctrico
Materiales	R D R	C+I I I	Estructura de soporte de motor acero ASTM A36 Recipiente de agitación Agitador de acero inoxidable
Fabricación y montaje	R	C+I	Montaje manual
Vida útil y mantenimiento	R	I	Acceso para área de mantenimiento
Seguridad y ergonomía	R D R	C+I C C+I	Altura del tanque asegurada por trabajo en altura Buen aspecto Alta confiabilidad

Tabla 16. Matriz de necesidades [28]

2.5.2. Matriz morfológica

Teniendo presente las necesidades y obligaciones del sistema, se generaron distintas ideas de posibles alternativas de solución del diseño del tanque de almacenamiento, combinando diferentes elementos como la forma del tanque, el tipo de plataforma de soporte, y tipo de plataforma de mantenimiento. Se presenta la matriz morfológica en la **Tabla 17**.

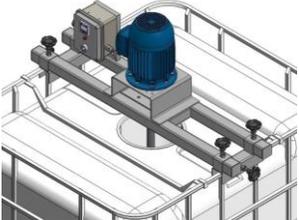
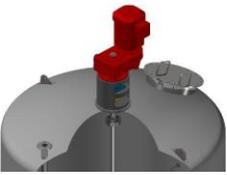
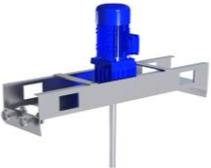
Función	Alternativas		
	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Almacenamiento	 Tanque cilíndrico ●●	 Tanque rectangular	 Tanque esférico ●
Soporte para tanque	 Patas soldadas ●	 Estructura sobrepuesta □	 Sin soporte, directo al piso ●
Plataforma de soporte	 Dos canales ●	 Con tapa □ ●	 Un canal

Tabla 17. Matriz morfológica [50]

Para poder seleccionar el mejor sistema de diseño mecánico se procederá a realizar un cálculo ponderado en base a los parámetros más relevantes los cuales son costo, eficiencia, dimensiones, manufactura y mantenimiento para las alternativas presentadas.

Importancia	0.30	0.15	0.15	0.20	0.20	1.00
Alternativas	Costo	Eficiencia	Dimensiones	Manufactura	Mantenimiento	Total
1 ●	4	5	4	4	5	4.3
2 □	4	4	3	3	4	3.7
3 ●	3	3	4	2	3	3

Tabla 18. Selección del sistema

Como resultado se obtuvo que la alternativa 1 constituida por un tanque de forma cilíndrica, sin soporte en la base con contacto directo al suelo, y con plataforma de soporte con dos canales es la mejor opción de diseño, el cual es el más común en un proceso de lixiviación de oro en la industria minera.

El conjunto de componentes del tanque de almacenamiento será por eje de transmisión, su material será de acero inoxidable, tendrá diseño de techo libre debido a la necesidad de inyectar oxígeno al mineral, fondo plano al tratarse de un tanque de gran medida para un fácil ensamblaje, el eje de transmisión tendrá una ubicación central y vertical.



Figura 2.3. Estructura del circuito de cianuración con tanque agitador. De [37]

2.5.3. Especificaciones de diseño

Así como se detalló en la sección de la norma API 650, hay consideraciones previas que se deben de tomar en cuenta, presentadas en la siguiente tabla, en base a referencias externas [18]. Como se va a tratar de un tanque agitador en base a la norma mencionada, se obtiene la propiedad del fluido:

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad del fluido	1450	kg/m ³
Viscosidad máxima	12	cP
Volumen efectivo de la unidad	1000	m ³

Tabla 19. Parámetros del contenido. De [18]

2.6. Fase 2: Diseño del tanque agitador

En esta fase del diseño del tanque agitador, consta de cuatro partes principales como se muestra en la siguiente figura. La primera parte se inicia presentando los requerimientos de la norma API 650 para el tanque agitador para el proceso de lixiviación de oro en el sector minero. La siguiente etapa consta del análisis de la estabilidad del tanque en base a la norma API 650, la cual indica las acciones que se debe de considerar para evitar que la estructura del tanque se volque. Posteriormente, se identifican las cargas que van a estar involucradas en el tanque. Por último, se realiza el diseño del tanque, obteniendo las dimensiones finales ideales en base a la normativa correspondiente. En todo este proceso se describen los parámetros y variables a considerar para el diseño óptimo de un tanque agitador en base a los requerimientos de la norma API 650.

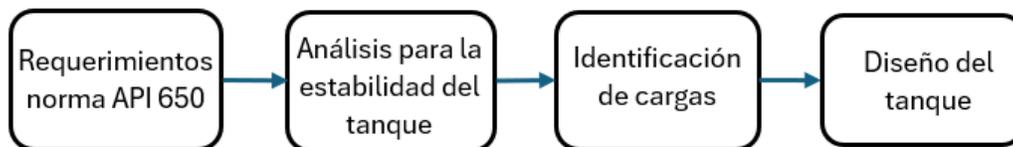


Figura 2.4. Proceso de diseño del tanque agitador

2.6.1. Requerimientos de la norma API 650

Previo a la descripción de los requerimientos de la normativa, al tener la capacidad del tanque definida, se procede a calcular inicialmente las dimensiones que tendría el tanque en función de su capacidad. Luego de ello se revisará si dicha dimensión es accesible debido al material disponible en el mercado.

Con la dimensión establecida, se procede a calcular el espesor mínimo requerido en base a la normativa, al igual que componentes que se solicitan como la virola o anillos del tanque. Cada componente de la estructura ya mencionada colabora de manera sigilosa en el reforzamiento de las paredes del tanque, lo que lo hace más resistente a las cargas involucradas.

2.6.1.1. Dimensionamiento del tanque agitador

El tanque tiene como volumen 1000 m^3 . Se puede obtener el valor del diámetro del tanque haciendo uso de la ecuación 3:

$$V = \frac{\pi \times D^2}{4} \times h = \frac{\pi \times D^3}{4} \quad (\text{Ec. 3})$$

Con la ecuación anterior se obtiene un primer diámetro del tanque, el cual debe ser evaluado en función a las dimensiones de las planchas de acero A36 disponibles en el mercado. Realizar variaciones y seleccionar la cantidad y modelo ideal de planchas a utilizar es lo siguiente que se debe de hacer, y con ello se debe de volver a calcular el diámetro del tanque con las medidas de las planchas. Cumpliendo con ello se obtendrá la dimensión final de la estructura del tanque, al igual que la altura del fluido, este último es importante ya que será considerado en otras ecuaciones más adelante.

2.6.2. Espesor de la pared del tanque

Obteniendo las dimensiones y material del tanque, se extrae de ellas el esfuerzo de fluencia y tracción del material. Con ambos valores se plasmarán en la ecuación 19 y 20 para obtener las variables con las que se iniciará el cálculo del espesor mínimo del tanque agitador.

Para calcular el espesor del tanque, existe un método llamado el método de un pie, la cual se representa en la ecuación 18 y 19. Para poder hacer uso de las ecuaciones se debe determinar un valor de tolerancia de corrosión, la cual se obtiene en la recopilación de información. Este cálculo es conocido como el cálculo hidrostático. La norma API 650 establece que el espesor debe tener un mínimo de 5 mm. Ese valor se compara con el obtenido, y junto a ello la disponibilidad del material en el mercado.

2.6.3. Virolas o anillos del tanque

Las virolas o anillos, así como se definió anteriormente, colaboran en la estabilidad de la pared del tanque. La norma API 650 ofrece modelos de perfil del elemento, y en función al modelo utilizado mayormente en este sector minero, se debe realizar la elección de un modelo al igual que las dimensiones de esta, la cantidad mínima que debe de contar el tanque, y la distancia entre cada virola. Cabe resaltar que la plataforma a diseñar reposará sobre el espesor del tanque sumado la virola, por ello es la importancia del modelo de virola y cantidad de esta.

2.6.4. Cargas del tanque: peso específico

Al obtener el cuerpo del elemento o tanque, se puede continuar con el diseño pasando al análisis de cargas del tanque. Tomando como guía la norma API 650, indica que el tanque agitador se ve afectado por fenómenos naturales, como ventiscas fuertes (acción eólica) y sismos o terremotos (acción sísmica). Estos fenómenos al accionar, causará efecto al cuerpo del tanque, y más que nada el peso mismo del tanque, por ello, antes de calcular las cargas,

se debe de obtener el peso específico del tanque. Después de ello se procede a calcular dichas cargas.

2.6.5. Análisis para la estabilidad del tanque: Acción sísmica

Después de haber obtenido el peso específico, se procede a calcular las variables que puedan afectar la estabilidad del tanque, iniciando con la acción sísmica. Esta acción debido a la zona del tanque se verá afectada en ciertos tiempos, y al ser posible el acontecimiento, se debe de prevenir y asegurar que la estructura del tanque y su dimensión pueda soportar dicha acción sísmica de la zona. Con ello se determinará si la estructura necesitará de anclaje al suelo o no.

La norma API 650 brinda variedad de ecuaciones, pero como ecuación principal es la 28, el cual va a brindar la variable que determina si el tanque necesita de anclaje en la estructura o no. Para obtener el valor de dicha variable, se deben de realizar cálculos previos como el cálculo de cargas sobre la pared del tanque (ecuación 29 y 30), las aceleraciones espectrales (ecuación 34 y 35), centro de acción para las fuerzas laterales efectivas (ecuación 36, 37 y 38), y por último la ecuación de momento sísmico, el cual interpreta el momento generado debido a la intensidad de un sismo en la base del tanque, el punto más crítico y con mayor torque de la estructura (ecuación 31).

Se debe agregar el cálculo para asegurarse si el tanque sufrirá de deslizamiento o no debido a la acción sísmica (ecuación 39, 40, 41 y 42), analizando el efecto que tendrá la estructura por el movimiento del fluido que contiene. La deducción se da en base a la comparativa brindada por la norma API 650 (ecuación 49).

2.6.6. Análisis para la estabilidad del tanque: Acción eólica

Después de realizar los pasos para verificar si la estructura del tanque requiere de anclaje al suelo o no por acción sísmica, se debe realizar la misma verificación bajo la acción eólica. Al igual que el anterior, basado en las indicaciones de la norma API 650.

El cálculo inicia con la obtención de la presión que ejerce sobre las paredes del tanque en función de la velocidad del viento (ecuación 39). Con dicho valor se obtiene también la fuerza que ejerce el viento en el área total de la pared del tanque (ecuación 41). En este cálculo habrá variables a despreciar debido a la estructura del tanque, como el momento vertical por la ausencia de viento, y de acción de presión interna por no aplicar en este caso.

El siguiente momento por calcular es el momento generado por el peso del tanque, para calcularlo, se debe de hallar la masa de la carcasa del tanque, y con ello se obtiene el momento generado (ecuación 46). No hay que olvidarse del momento generado por el movimiento del fluido en el interior del tanque, lo cual también va a influir en si la estructura se mantiene fija o tiende a volcarse (ecuación 47 y 48).

Luego de obtener las variables necesitadas, la norma API 650 brinda criterios comparativos en donde si una suma de los valores obtenidos es mayor o menor a un valor también determinado, se puede deducir si el tanque requiere de anclaje o no por las acción eólica de la zona (ecuación 41, 42 y 43).

2.7. Fase 3: Selección de componentes del tanque

En esta siguiente fase, después de tener establecido la estructura del tanque, se procede a la selección del motor y equipos que accionan el sistema. La selección de los componentes es importante debido a que el peso y carga que efectúe cada una, afectará en la evaluación del sistema cuando está sometido a las cargas, causando efecto en su estructura.

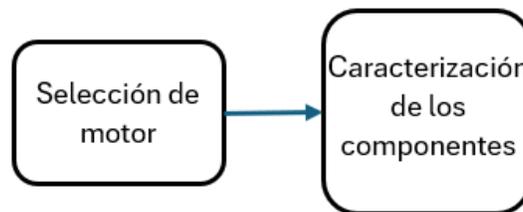


Figura 2.5. Proceso de selección de componentes del tanque

2.7.1. Selección de motor – reductor

Como se mencionó en el marco teórico, uno de los componentes principales del tanque agitador es el equipo que lo hace accionar. Por ello, es de suma importancia determinar el modelo de motor - reductor, equipo que va a reposar sobre la plataforma. En esta sección debe de considerarse tanto la velocidad angular como la potencia del equipo, ya que al ser un tanque agitador, es de suma importancia realizar una buena mezcla lixivante, sin ella el producto final no será óptimo.

2.7.2. Características de los componentes del tanque

El tanque va a necesitar de entradas hombre horizontal y vertical para futuras inspecciones sea para limpieza, revisión o mantenimiento, por ello es por lo que se necesitará de acceso al área con el uso de una escalera y plataforma. La plataforma, escalera y barandas deben de brindar seguridad al operador al acceder al tanque, por ello, al ser una zona de seguridad relacionado al tanque agitador, la norma API 650 es quien brinda los requerimientos de seguridad necesarios que debe de cumplir la plataforma, los cuales son los siguientes:

- Todos los componentes deben ser metálicos.
- Ancho mínimo del piso de 610 mm
- Todo el piso deberá ser de material antiderrapante.
- Altura de la baranda 1.067 mm
- Altura mínima del rodapié 76 mm
- Distancia máxima entre postes del barandal 1168 mm
- La estructura completa debe de soportar una carga viva concentrada 453 kg
- Pasamanos de la baranda en ambos lados
- Estructura del pasamanos deberá soportar una carga de 90 kg



Figura 2.6. Modelo de barandas y escalera sobre tanque. De [38]

Ante las exigencias de construcción por norma, se decide el utilizar como material para dichos productos el acero A36, el cual las dimensiones serán determinadas en función a la estructura del tanque, testeado y probado recopilando modelos de plataformas de tanques mineros. Para realizar un correcto dimensionamiento de las barandas de la plataforma, se debe de tomar en cuenta las normativas de seguridad en un entorno industrial, como la OSHA, el cual nos indica al igual que la norma API 650, estándares mínimos que deben de cumplir, este caso para la seguridad del trabajador.

Según la norma americana OSHA (Occupational Safety and Health Administration) [39] la altura de la baranda no puede ser menor a 39 pulgadas. La plataforma tendrá una longitud mínima equivalente al diámetro de la estructura del tanque, que son 11.46 metros. La separación de barandas verticales va a ser de 1.1 metros, con espesor de pared de 3.56 metros, y en cuanto a la tubería del pasamanos, se usará una tubería de 42.2 mm de diámetro [18]. Debido al utilizar una tubería de modelo Schedule. La tubería tiene un peso de 3.39 kg/m [40], y al tener una longitud de 62 metros en total, se puede estimar el peso de la baranda.

En cuanto a la plataforma, como el tanque no cuenta con techo, se hace uso de una plataforma metálica, una rejilla dentada de metal industrial, así no se limitará el espacio para la inyección de oxígeno al mineral, y también permite al operador moverse con tranquilidad sobre la plataforma. La distribución de las vigas para repartir las fuerzas estáticas y dinámicas deben estar distribuidas de un modo que se puedan instalar las grillas metálicas y también dejando espacio para la instalación del motorreductor.

2.8. Fase 4: Diseño de la plataforma

Esta fase trata del diseño de la plataforma el cual determinará tanto la composición de las vigas en la plataforma como el perfil ideal de viga que soporte las cargas a identificar. El cálculo va a ser realizado en base a la norma AISC a través del método LRFD.

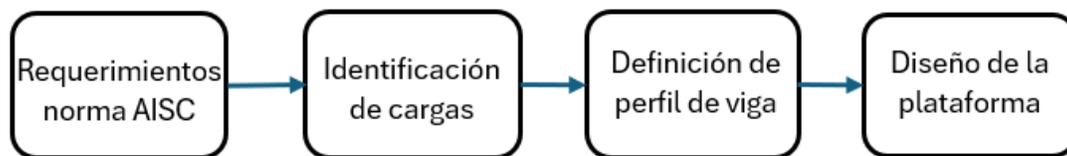


Figura 2.7. Proceso de diseño de plataforma

2.8.1. Requerimientos norma AISC

Para iniciar el diseño y cálculo de las cargas de la plataforma, primero se debe de establecer que el método a emplear para el diseño es el LRFD, y para trabajar con ello, las cargas que afectan a la plataforma deben ser de tipo distribuidas, al igual que debe de trabajarse en unidades americanas.

2.8.2. Identificación de cargas

Primeramente se debe comprender las cargas que compone el método LRFD, lo cual se presentó en el marco teórico. Segundo, se realizará un primer cálculo considerando solo la carga viva, no se considera la muerta porque aún no se tiene determinado el perfil de viga, y la estructura como tal cuenta como carga muerta. Tercero, al obtener la carga viva (ecuación

54), se debe calcular el momento en función al tipo de soporte que va a tener la plataforma (Anexo 1). Con ello se obtienen las variables, dando como resultado la variable de la ecuación de resistencia (ecuación 59).

Seguido a ello, se procede a seccionar el perfil de viga ideal con la inercia obtenida. Al buscar la menor deflexión posible, se debe utilizar un perfil mayor que supere el valor de inercia obtenida bajo la carga viva. Luego de seleccionar el perfil de viga ideal, se calcula el peso de esta por propiedad y se procede a realizar el mismo procedimiento de la carga viva, solo que considerando esta vez el peso de la viga como carga muerta. Al culminar el procedimiento se podrá determinar si el perfil es aceptado parcialmente o no. Esto solo sería el primer cálculo al ser un análisis por flexión.

El siguiente paso es realizar un análisis por deflexión, la cual va a partir de la deformación máxima permitida en base a la longitud de viga (ecuación 60). Para tener un perfil correcto, se debe de cumplir que la deflexión nominal debe ser mayor a la deflexión crítica (ecuación 62). Tomando el valor de inercia mayor del perfil de viga se obtiene la deformación máxima (ecuación 61), y si su valor es mayor al nominal, debe de seleccionarse otro perfil de viga hasta que cumpla con el requerimiento mencionado.

2.8.3. Selección de perfil de viga

Luego de haber realizado un análisis por flexión y deflexión, y que el perfil de viga cumpla con ambos análisis, se puede determinar que el perfil seleccionado es el correcto

2.9. Fase 5: Modelado y simulación del sistema

En esta fase del trabajo luego de tener el diseño del tanque y plataforma, se procede a modelar cada pieza y realizar el ensamble para la posterior simulación de ambas piezas juntas, como un solo sistema.

2.9.1. Modelado y simulación del diseño solo con plataforma

Luego de haber definido los componentes que van a generar carga sobre el sistema y plataforma, se obtuvieron sus cargas para diseñar el sistema. El software en el que se diseñó el sistema previo al análisis estático fue en SolidWorks. La plataforma diseñada de acceso operacional o de mantenimiento cumple con los requerimientos mínimos según la norma técnica A.010, condiciones generales de diseño del reglamento nacional de edificaciones.

En este trabajo no se consideró dentro del diseño la estructura de la escalera de acceso a la plataforma, ya que su influencia en las cargas no afectará directamente a la flexión crítica máxima de la viga, ni en la posible abolladura en el tanque. En el **Anexo 9** se puede observar el modelo diseñado de la plataforma.

Los componentes que van a generar carga sobre la viga se pueden dividir en dos tipos de cargas, las cuales son las cargas vivas y cargas muertas. Dichas cargas han sido presentadas en la fase anterior, las cuales se tienen que proyectar a una carga distribuida a lo largo de la viga, para que con ello se pueda trabajar con el método LRFD de la norma AISC.

Posterior a la identificación de cargas y selección de perfil de viga de plataforma, se debe realizar el diseño de la plataforma, apoyándose en el SolidWorks que facilita el trabajo.

2.9.2. Modelado y simulación del diseño del sistema plataforma-tanque

Al igual que la plataforma, se debe de modelar el tanque apoyándose en el software SolidWorks, solo que esta vez se debe de ensamblar el tanque junto a la plataforma. Teniendo el sistema ensamblado y con la ubicación determinada del centro de la plataforma para el agitador del tanque, se traslada al software de simulación estructural SimSolid, a simular esta vez las cargas de la plataforma sobre la estructura del tanque.

2.10. Fase 6: Validación del diseño

Como siguiente paso o fase, se cuenta con la validación del diseño, en el que posterior al modelado de los elementos, se deben considerar pasos para una correcta simulación de cargas tanto en el software SimSolid como en RFEM.

2.10.1. Simulación del diseño solo plataforma

Teniendo el diseño modelado se traslada el diseño al software SimSolid en la cual se realizará la simulación de las cargas sobre la plataforma y se podrá visualizar el efecto que tienen sobre el elemento. También se podrá observar si la deformación máxima calculada con la norma AISC cumple o no, convalidando con ello la efectividad de la normativa y teoría del procedimiento de diseño de la plataforma a través del método LRFD.

Dicha simulación será para observar cómo la plataforma y su carga afecta sobre la estructura diseñada. Lo importante a considerar previo a la simulación, es la unión o unificación que se debe definir entre ambas estructuras, se debe de verificar que todas las uniones y apoyos deben estar claramente definidos para evitar señales de errores en el software. En este trabajo se realizaron varias pruebas e intentos de simulación en cuanto a la definición de los puntos de apoyo. La base de la estructura del tanque se define como un apoyo fijo, mientras que el apoyo de la plataforma sobre el tanque debe ser tomado como apoyo simple o rodante, para permitir el movimiento del elemento tanto en el eje x como en el eje y.

2.10.2. Simulación del diseño como sistema plataforma - tanque

Aparte de la evaluación de cargas definidas con el método LRFD, también se tiene que evaluar una de las cargas definidas por la norma API 650. En este trabajo se toma la fuerza del viento o acción eólica que forma parte del análisis de la estabilidad del tanque. Para ello, se hace uso del software RFEM con el que se modela nuevamente el tanque agitador. Primero se debe definir la base de concreto en la que reposa el tanque agitador. Segundo se modela el diámetro del tanque, y como si fuese similar a un anillo, se extruye el perfil hasta la altura definida del tanque. A continuación, se deben definir los apoyos al igual que se hizo con el software anterior. Como paso final, se procede a insertar la carga del viento sobre una cara del tanque, con el valor que se haya obtenido en la acción eólica o momento de vuelco generado por el viento (M_w). Con el resultado de la simulación se podrá observar el comportamiento de la estructura bajo una ventisca fuerte y se podrá confirmar o no si la norma API 650 es efectiva o no.

2.11. Fase 7: Análisis de integración de normativa

Como última fase del proceso de estudio se realiza un análisis de las normas API 650 y AISC en busca de faltas o incongruencias de integración entre ambas normativas. Dichas faltas se pueden observar a través de todos los cálculos realizados tanto del tanque como plataforma, y al momento de modelar y simular cada elemento, se puede observar las faltas de definiciones o requerimientos que existen entre las dos normativas.

Por último, se realizará un listado de las incongruencias encontradas a lo largo del trabajo, con el fin de dar a conocer dónde se encuentra la falta de integración de ambas normativas para el diseño de un sistema plataforma - tanque para el sector minero, específicamente para el proceso de lixiviación de oro.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

Culminada la parte teórica en la definición de componentes, material, cargas a influir en el sistema, se obtuvo el diseño ideal de la plataforma y tanque en base a cálculos de la normativa de cada sistema. Con los pasos e indicaciones presentadas en el capítulo anterior, se procede a la presentación y análisis de los resultados de los cálculos obtenidos. Se inicia con el diseño de la estructura del tanque y análisis de estabilidad del tanque bajo la acción sísmica y eólica. Se continúa con el diseño de plataforma y selección de perfil de viga, junto al análisis de cargas a las que está sometida. Finalmente, se procede a trasladar el diseño al software y simulación para confirmar los resultados obtenidos en la teoría.

3.1. Diseño del tanque agitador

El tanque debe presentar las siguientes características solicitadas en base a la norma API 650:

- Considerar las condiciones meteorológicas de la zona.
- La pared del tanque debe ser resistente a la corrosión.
- Impulsor tipo paleta (óptimo para lixiviación de oro)
- Cumplir con la normativa en todos los componentes del equipo.
- Todos los materiales se encuentran disponibles en el mercado peruano.

Entre los dos materiales propuestos que son el AISI A36 y A532, en un breve análisis de resistencia mecánica y térmica, el primero tiene mayor resistencia, procediendo a los futuros cálculos a utilizar sus propiedades mecánicas para la fabricación del tanque con dicho material [16].

3.1.1. Dimensionamiento del tanque

Como se mencionó anteriormente, junto a la capacidad del tanque, se obtienen los valores de las dimensiones del tanque, obteniendo los siguientes parámetros.

$$V = \frac{\pi \times D^2}{4} \times h = \frac{\pi \times D^3}{4} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$1000 = \frac{\pi \times D^3}{4}$$

$$4000 = \pi \times D^3$$

$$1273.2395 = D^3$$

$$D = 10.8385 \text{ m}$$

Con el diámetro de 10.8 metros, se obtiene un perímetro de 34.0502 metros aproximadamente. Se sabe que el tanque tiene un perímetro de 34.05 metros, por lo que al conocer las medidas del material y para darle un buen uso, se escogerá cuatro planchas de 1500 x 3000 (mm) y cuatro planchas de 1500 x 6000 (mm), dando como resultado un nuevo perímetro de 36 metros. Con el nuevo perímetro se recalculó el diámetro, dando como resultado un valor de 11.46 metros.

Los tanques de almacenamiento se suelen categorizar en función de relación de diámetro y altura, siendo 4x4 metros o 6x6 metros, por ejemplo. En el caso del tanque de este trabajo, debido a que la suma del ancho de las planchas son exactamente 12 metros, la medida de este tanque será de 12x12 metros. La composición de las planchas metálicas se puede visualizar en el **Anexo 3**.

La norma API 650 indica que la relación óptima de diámetro/altura de un tanque es de 1:1, y con nuestros valores de 11.46 de diámetro y 12 m de altura, se cumple la relación con un valor de 0.955. Las dimensiones finales del tanque son:

Dimensiones finales del tanque	
Diámetro	11.46 m
Altura del fluido	9.69 m
Altura del tanque	12 m
Volumen efectivo	1000 m ³
Volumen real	1392.287 m ³

Tabla 20. Medidas finales del tanque

El material por utilizar para el tanque serán placas de acero A36, teniendo un esfuerzo de fluencia de 250 MPa, y esfuerzo de tracción de 400 a 550 MPa. Haciendo uso de la ecuación 19 y 20, los valores de esfuerzo de fluencia y tracción del acero, se obtiene $S_d = 160$ MPa y $S_t = 171$ MPa.

Para calcular el espesor del tanque, se suele utilizar el método de un pie, representado en la ecuación 18 y 19. El valor de tolerancia de corrosión utilizada en este trabajo será de 1.5 m, un valor mayormente utilizado en los circuitos de tanque para lixiviación de oro [18]. Reemplazando los valores en la fórmula se obtuvo el siguiente resultado:

$$t_d = \frac{4.9 \times 11.46 \times (9.696 - 0.3) \times 1.4}{160} + 1.5 \quad (\text{Ec. 18})$$

$$t_d = 4.797 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 \times 11.46 \times (9.696 - 0.3)}{171} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$t_t = 3.08 \text{ mm}$$

Luego de realizarse el cálculo hidrostático para averiguar el espesor mínimo que debe de tener el tanque, se podrá ver que a pesar de que el estándar indica que no puede ser menor a 5mm, no significa que deba de ser el indicado. El espesor mínimo para el tanque diseñado es de 4.8 mm, pero debido al estándar debe ser mayor a 5 mm. Comercialmente no se encuentra ese espesor mínimo en el mercado, por lo que se escogió el espesor de 6 mm [51].

El tanque agitador va a contar con ocho anillos por su altura de 12 metros y por el uso de planchas de 1500 mm de alto. Debido a la presión hidrostática, la virola o anillo de tanque que sufrirá mayor presión es el primer anillo cerca a la base. En el apartado anterior se realizó el análisis hidrostático, teniendo como resultado un valor menor al mínimo, por lo que se optó por el espesor de 6 mm.

Dichos anillos al ser un perfil estructural cuentan con norma de tener un perfil mínimo de 50x50x6 mm debido al diámetro del tanque a diseñar. Debido a la importancia de la inercia y rigidez que pueda aportar a la estructura del tanque, al tener un espesor de 6 mm de la pared, se optará por la sección de 75x75x6 mm.

$$H_l = 9.47 \times 6 + \sqrt{\left(\frac{6}{11.46}\right)^3} \times \left(\frac{75}{190}\right)^2 \quad (\text{Ec. 24})$$

$$H_l = 56.879 \text{ m}$$

Tomando la ecuación 24, reemplazando los valores obtenidos, se puede obtener la distancia mínima entre anillos atiesadores. Con este resultado, debido a las dimensiones del tanque a diseñar y a la velocidad del viento de donde sería el supuesto lugar de instalación, en tanque necesita de un anillo atiesador a partir de los 56.8 metros de altura. Como el tanque de este proyecto cuenta con 12 metros de altura final, no requiere del uso de anillos atiesadores a lo largo del cuerpo.

3.1.2. Peso específico del tanque

Culminada la definición de las dimensiones del tanque, se procede al análisis de cargas en ella. Primeramente se debe calcular el peso específico tomando las ecuaciones 1 y 2, se reemplazan los valores en ella, y se obtiene como resultado del peso específico del tanque.

$$Wp = 1450 \times \frac{\pi \times 11.46^2}{4} \times 12 \times 9.81$$

$$W_p = 1450202.615 \text{ N}$$

También se tiene los pesos efectivos W_i y W_c , los cuales son obtenidos a través de las ecuaciones 21 y 22.

$$W_i = \frac{\tanh(0.866 \times D/H)}{0.866 \times D/H} \times W_p; \text{ Si } D/H \geq 1.33 \quad (\text{Ec. 20})$$

$$W_i = \left[1 - 0.218 \frac{D}{H} \right] \times W_p; \text{ Si } D/H < 1.33 \quad (\text{Ec. 21})$$

$$W_i = 1148284.933 \text{ N}$$

$$W_c = 0.23 \frac{D}{H} \times \tanh\left(\frac{3.67 H}{D}\right) \times W_p \quad (\text{Ec. 22})$$

$$W_c = 419266.0813 \text{ N}$$

3.1.3. Análisis para la estabilidad del tanque: acción sísmica

Para iniciar con la obtención de los valores de la carga o acción sísmica, se procede a realizar el cálculo del periodo estructural de vibración, usando la ecuación 25.

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \times \frac{6.2 \times 12}{\sqrt{\frac{6}{11.46}}} \times \sqrt{\frac{1450}{200000}} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$T_i = 0.1958 \text{ s}$$

El periodo convectivo o de chapoteo se calcula utilizando la ecuación 26 y 27:

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 H}{D}\right)}} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$K_s = 0.5037$$

$$T_c = 1.8 K_S \sqrt{D} \quad (\text{Ec. 27})$$

$$T_c = 3.069 \text{ s}$$

- Ecuación anclaje al suelo

Recuperamos la ecuación 28, la cual nos va a brindar la variable que determinará si será necesario utilizar anclaje en la estructura o no.

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2 \times [w_t \times (1 - 0.4A_v) + w_a - 0.4w_{int}]} \quad (\text{Ec. 28})$$

- Cálculo de cargas sobre la pared del tanque

Ahora para calcular la resistencia de elevación o w_a , se toma la ecuación 29. Cuando la aceleración vertical no es especificada, puede ser tomado como valor cero, haciendo que el valor de gravedad específica no sea influido por la aceleración, manteniendo su valor inicial. En cuanto a la gravedad específica del fluido, equivale a 0.7. La altura del tanque equivale a 12 metros, el esfuerzo de fluencia del material del tanque equivale a 250 MPa, y el espesor de placas de fondo es igual a 6 mm. Con dichos valores, reemplazando en la ecuación, se obtiene un resultado de $w_a = 40830.75 \text{ N/m}$.

Luego la siguiente variable a calcular es de la ecuación 30. Obteniendo los valores correspondientes [18], se obtiene como valor de $w_t = 5880.94 \text{ N/m}$, y como el tanque que se está trabajando no cuenta con techo por necesidad de inyección de oxígeno durante la operación y almacenamiento, se puede obtener el w_s , que sería el peso total de la carcasa y accesorios, el cual tiene un valor de $w_{rs} = 306.4 \text{ N}$.

- Parámetros del movimiento del suelo

Los siguientes parámetros por calcular son los de máxima aceleración sísmica, los cuales tienen un valor de $S_s = 0.625$ y $S_I = 0.3125$. De igual manera, con la **Tabla 8**, se obtienen obtiene los valores de $F_a = 1.15$ y de $F_v = 1.5$.

- **Cálculo de aceleraciones espectrales**

Para continuar con el cálculo, ahora se necesita obtener las variables de las aceleraciones espectrales de diseño, de las cuales se pueden recuperar de la ecuación 34 y 35.

$$A_i = 2.5 \times 1 \times 1.15 \times 0.25 \left(\frac{1.25}{3.5} \right) \quad (\text{Ec. 34})$$

$$A_i = 0.2567 g$$

$$A_c = 2.5 \times 1.5 \times 1 \times 1.15 \times 0.25 \times \left(\frac{0.6522 \times 4}{3.06915^2} \right) \left(\frac{1.25}{2} \right) \quad (\text{Ec. 35})$$

$$A_c = 0.1866g$$

- **Centro de acción para las fuerzas laterales efectivas**

Las ecuaciones para hallar las variables mencionadas son la ecuación 36, 37 y 38.

$$X_i = 0.375 H ; \text{ Si } D/H \geq 1.33 \quad (\text{Ec. 36})$$

$$X_i = \left[0.5 - 0.094 \frac{D}{H} \right] \times H ; \text{ Si } D/H < 1.33 \quad (\text{Ec. 37})$$

$$X_i = 4.92276 m$$

$$X_c = \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67 H}{D} \times \sinh\left(\frac{3.67 H}{D}\right)} \right] \times H \quad (\text{Ec. 38})$$

$$X_c = 9.00841 m$$

Finalmente, se puede reemplazar todos los valores obtenidos en la ecuación de momento sísmico en la base del tanque.

$$= \sqrt{\frac{M_{rw}}{[0.257 \times (4.9 \times 1148285 + 0)]^2 + [0.187 \times (9.008 \times 419266)]^2}} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$M_{rw} = 1613155.15068 \text{ N.m}$$

Con este resultado final, se obtiene el factor del ratio de anclaje J, el cual va a determinar si el tanque requiere de anclaje o no para la acción sísmica, tomando la ecuación 28.

$$J = \frac{1613155.15}{11.46^2 \times [5880.94 \times (1 - 0) + 40830.75 - 0]} \quad (\text{Ec. 28})$$

$$J = 0.26295$$

Después de haber obtenido todas las variables necesarias para calcular y tener como resultado el valor del ratio de anclaje, finalmente se puede declarar que el tanque de 11.46 metros de diámetro y de 9.7 metros de altura del fluido, no requiere anclaje mecánico bajo la acción sísmica en la región de la Libertad.

Para finalizar el análisis de estabilidad del tanque, se debe asegurar si el tanque sufrirá de deslizamiento o no. Tomando la ecuación del 39 al 42, se reemplazan con los valores obtenidos anteriormente. El valor de A_i se obtuvo un valor de 0.2567 g de la ecuación 34, A_c se obtuvo un valor de 0.1866 g de la ecuación 40, y así sucesivamente. El valor de W_i es equivalente a 1148284.933 N, obtenido de la ecuación 21, W_c equivale a 419266.0813 N de la ecuación 22. W_r es despreciable por ser el valor del pecho del techo. El peso de la pared o carcasa W_s tiene un valor de 20348.8 kg, lo que equivale a 199621.728 N. Y por último el peso del piso o disco del tanque W_f , al tener 12 metros de diámetro con una densidad de 7.8 kg/m³ al tratarse de acero A36, tiene un peso de 7.057 kg, lo que equivale a 69.232 N.

Teniendo todos los valores definidos, se pasa a reemplazar en las tres ecuaciones presentadas anteriormente, obteniendo el resultado siguiente.

$$V_i = 0.2567 \times (199621.728 + 0 + 69.232 + 1148284.933) \quad (\text{Ec. 51})$$

$$V_i = 346025.4117 \text{ N}$$

$$V_c = 0.1866 \times 419266.0813 \quad (\text{Ec. 52})$$

$$V_c = 78235.05077 \text{ N}$$

$$V = \sqrt{346025.4117^2 + 78235.05077^2} \quad (\text{Ec. 50})$$

$$V = 354759.5083 \text{ N}$$

$$V_s = 0.4 \times (W_s + W_r + W_f + W_p)(1 - 0.4A_v) = 659957.43 \text{ N} \quad (\text{Ec. 51})$$

$$\begin{aligned} V_s &> V \\ 659957.43 \text{ N} &> 354759.5083 \text{ N} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 49})$$

Como se puede observar en los cálculos, el valor de la fuerza resistente al deslizamiento es mayor a la fuerza cortante total, por lo que se puede deducir que el tanque es estable bajo el movimiento del sismo, sin llegar a producirse deslizamiento.

3.1.4. Análisis para la estabilidad del tanque: acción eólica

Luego de verificar que la estructura del tanque bajo la acción sísmica requiere o no de un anclaje al suelo para mitigar los movimientos, se procede a realizar la misma verificación bajo la acción eólica o fuertes vientos de la zona. Este procedimiento se basa en las indicaciones de la normativa API 650.

El primer valor por calcular es la presión que se ejerce sobre las paredes del tanque en función de la velocidad del viento, el cual se determina con la ecuación 39:

$$P = 0.86 \times \left(\frac{V}{190}\right)^2 = 0.134 \text{ kPa} \quad (\text{Ec. 39})$$

Dicha presión es ejercida en cierta área de la estructura del tanque, área que se obtiene multiplicando el diámetro del tanque por su altura, obteniendo el área total de la pared del tanque.

$$A_p = D \times H = 11.46 \times 12 = 137.52 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 40})$$

Teniendo el área y la presión ejercida sobre el tanque, se obtiene como resultado la fuerza que es ejercida sobre la estructura, el cual es la siguiente:

$$F_p = P \times A_p = 0.134 \times 137.52 = 18.42768 \text{ kN} \quad (\text{Ec. 41})$$

Como se aclaró antes, el momento vertical se desprecia ($M_{wr} = 0$) por ser inexistente ante la ausencia de techo. La ecuación pasa a ser la siguiente:

$$M_w = M_{ws}$$

$$M_w = F_t (H/2) = 18.428 \times 6 = 110.566 \text{ kN.m}$$

Al igual que el momento vertical se desprecia por la ausencia de techo, también se desprecia el momento por acción de presión interna, ya que tampoco aplica en este caso.

El siguiente momento por calcular es el momento generado por el peso del tanque, para calcularlo, se debe de hallar la masa de la carcasa del tanque, el cual tiene un valor de 20348.8 kg (Anexo 1) [52]. Con el peso de la carcasa calculado, se puede expresar el momento generado con la ecuación 46.

$$M_{DL} = m_s \times g(D/2) = 20348.8 \times 9.81 \times 5.73 = 1143.833 \text{ kN.m} \quad (\text{Ec. 46})$$

El momento faltante es el momento generado por el peso del líquido se calcula de la ecuación 47 y 48, tomando el menor valor

$$w_{L1} = 70 \times 3.2 \sqrt{250 \times 0.7 \times 9.6962} = 9227.16 \text{ N/m}$$

$$w_{L2} = 70.4 \times 9.6962 \times 11.46 = 7822.74 \text{ N/m}$$

Para calcular el momento por la acción del fluido, aparte del peso de fluido equivalente, se necesita hallar la fuerza en el perímetro de la pared.

$$2p = \pi D$$

$$w_a = w_L \times 2p = 7822.74 \times 36 = 281.618 \text{ kN.m}$$

$$M_F = w_a(D/2) = 281.618 \times 5.73 = 1613.67 \text{ kN.m}$$

Luego de obtener todas las variables, se vuelve a los requisitos presentados en las ecuaciones 42, 43 y 44 para verificar si cumple o no, y si necesita anclaje o no.

- a. Viento + Presión interna vs Peso del tanque

$$0.6 \times 110.566 + 0 < (1143.833/1.5) + 0 \quad (\text{Ec. 42})$$

$$66.34 < 762.56$$

- b. Viento + Presión interna vs Peso del tanque + Fluido

$$110.566 + 0.4 \times 0 < (1143.833 + 1613.67)/2 + 0 \quad (\text{Ec. 43})$$

$$110.566 < 1378.75$$

- c. Viento (horizontal) + Presión interna vs Peso del tanque

$$110.566 + 0.4 \times 0 < (1143.833/1.5) + 0 \quad (\text{Ec. 44})$$

$$110.566 < 762.56$$

Como se puede observar en los tres resultados de los tres criterios expuestos por la norma API 650, se deduce que el tanque a diseñar en este trabajo no requiere de pernos de anclaje tanto por las acciones sísmicas ni por las fuerzas de viento.

3.2. Selección de componentes del tanque

En base a fuentes externas, si un tanque con capacidad de 3 mil metros cúbicos tiene una velocidad de eje normal de 20 rpm y crítica de 30 rpm, tiene un motor de 6 polos con 1190 rpm de velocidad, con una potencia de transmisión nominal de 180 kW, y de diseño de 112 kW [49]. Y un tanque que cuenta con cien metros cúbicos de capacidad, cuenta con un agitador de velocidad de 40 rpm y potencia de motor de 4 kW [18]. Los valores se pueden ver plasmados en la siguiente tabla.

Capacidad (m3)	Velocidad (rpm)	Potencia (kW)
3000	1190	180
1000	X = 400	55
100	43.2	4

Tabla 21. Parámetros del motorreductor. De [53]

Como se puede observar, al contar con bibliografía externa, tomando el volumen de capacidad del tanque agitador de este trabajo, se puede asumir que la potencia aproximada del motor que se necesita para realizar la mezcla de la lixiviación de oro es de 55 kW.

Consultando los productos de proveedores de motorreductores [53] debido al tamaño del equipo, la brida no puede ser en posición vertical, lo cual pudo haber resultado más práctico la operatividad y mantenimiento del motorreductor. Por lo tanto, se escogió para este trabajo un motorreductor de la marca WEG, modelo W22 carcasa de hierro gris - IE3, siendo el valor del peso del equipo de 400 kg.



Figura 3.1. Motor eléctrico W22 WEG. De [54]

Los valores de los componentes, tanto del motor, como agitador y los pesos de estos, se pueden visualizar en la siguiente tabla. Cabe resaltar que los valores son aproximados debido a la limitación de la investigación, con un pequeño margen de variación. Por ello se tomó el estado o elemento más crítico para la validación final del diseño al simular las cargas del sistema.

Parámetro	Valor	Unidad
AGITADOR		
Tipo	Axial	-
Diámetro de impeler	3438	mm
Relación diámetro/tanque	0.3	-
MOTORREDUCTOR		
Potencia	55	kW
Peso	~400	kg
PESOS		
Eje con impeler	3469.78	kg
Transmisión y motor	400	kg
Total	3869.78	kg

Tabla 22. Parámetros generales de los componentes

3.3. Diseño de la plataforma

Luego de haber definido los componentes que van a generar carga sobre el sistema y plataforma, se obtuvieron sus cargas para diseñar el sistema. El software en el que se diseñó el sistema previo al análisis estático fue en SolidWorks. La plataforma diseñada de acceso operacional o de mantenimiento cumple con los requerimientos mínimos según la norma técnica A.010, condiciones generales de diseño del reglamento nacional de edificaciones.

En este trabajo no se consideró dentro del diseño la estructura de la escalera de acceso a la plataforma, ya que su influencia en las cargas no afectará directamente a la flexión crítica

máxima de la viga, ni en la posible abolladura en el tanque. En el **Anexo 9** se puede observar el modelo diseñado de la plataforma.

Los componentes que van a generar carga sobre la viga se pueden dividir en dos tipos de cargas, las cuales son las cargas vivas y cargas muertas. Haciendo un listado de ellos junto al valor de peso de cada uno, se presentan en la **Tabla 23**.

Tipo de carga	Componente	Peso
Carga viva	Pasamanos	419.3 kg
	Rodapié	53.31 kg
	Grilla metálica	966 kg
Carga muerta	Eje con impeler	3469.78 kg
	Transmisión y motor	400 kg

Tabla 23. Valores de los componentes de la carga viva y muerta

Posterior a ello, se proyectaron los pesos a una carga de manera distribuida a lo largo de la viga de 11.5 metros, y para poder trabajar con la norma AISC, se trabajó con unidades americanas, obteniendo los valores de carga distribuida presentado en la **Tabla 24**.

Tipo de carga	Carga distribuida
Carga muerta	Peso de la viga
Carga viva	0.3102863901 kips/ft

Tabla 24. Valores de las cargas distribuidas

3.3.1. Método LRFD - Análisis por flexión

Pasando las cargas graficadas en la **Figura 1.24**, se tiene como fuerza distribuida total de 0.31 kips/ft. Se inicia el cálculo con la ecuación de carga viva. Usando la ecuación 54, se obtiene la primera carga LRFD.

$$W = 0.496 \text{ kips/ft}$$

Luego, se procede a utilizar la ecuación 55.

$$M_{ul} = \frac{(0.496 \text{ kips/ft}) \times (37.7 \text{ ft})^2}{8}$$

$$M_{ul} = 88.34 \text{ kips.ft}$$

Teniendo las variables definidas, utilizando la ecuación de resistencia para momento y teniendo los valores del momento máximo y nominal, se puede desarrollar la ecuación 59.

$$Z_{x1} = \frac{(88.3 \text{ kips.ft}) \times (12)}{(0.9 \times 36.6 \text{ ksi})}$$

$$Z_{x1} = 32.1 \text{ in}^3$$

Ahora se procede a la selección del perfil de la viga en función a la carga viva. Para la selección del perfil de la viga, se va a acudir a la plantilla de Excel AISC, la cual brinda dimensiones y propiedades de perfiles de acero AISC [44]. Teniendo en cuenta el valor obtenido de $Z_{x1} = 32.1 \text{ in}^3$, seleccionando del perfil de viga tipo W por el esfuerzo de fluencia y tipo de acero con el que se está trabajando, el menor perfil que puede cumplir con el factor de resistencia es el perfil W10x30, con un valor de $Z_x = 36.6 \text{ in}^3$. Al querer la menor deflexión posible, se utiliza un perfil mayor, siendo de W10x39. Las características del perfil de viga W10x39 son las siguientes:

$$\text{Perfil} = \text{W10x39} \quad ; \quad Z_{x2} = 46.8 \text{ in}^3 \quad ; \quad I_{x2} = 209 \text{ in}^4$$

Conociendo el perfil de la viga, el segundo número de su nomenclatura es el peso según la longitud de ella. Se vuelve a analizar si el perfil seleccionado es el adecuado.

$$\text{Peso} = 39 \text{ lb/ft} = 39 \times 10^{-3} \text{ kips/ft}$$

$$W = 1.2D + 1.6L \quad (\text{Ec. 54})$$

$$W = 1.2 \times (0.039 \text{ kips/ft}) + 1.6 \times (0.31028 \text{ kips/ft})$$

$$W = 0.54326 \text{ kips/ft}$$

Ahora se procede al cálculo del momento máximo.

$$M_{\text{máx}} = M_{u2} = \frac{W \times L^2}{8} \quad (\text{Ec. 55})$$

$$M_{u2} = \frac{(0.5432 \text{ kips/ft}) \times (37.729 \text{ ft})^2}{8}$$

$$M_{u2} = 96.67 \text{ kips. ft}$$

Ahora se procede a comparar con la resistencia de diseño.

$$M_{u2} \leq \phi \times M_{n2} \quad (\text{Ec. 57})$$

$$M_{u2} \leq \phi \times F_y \times Z_{x2} \quad (\text{Ec. 58})$$

$$Z_{x2} = \frac{M_{u2}}{(\phi \times F_y)} \quad (\text{Ec. 59})$$

$$Z_{x2} = \frac{(96.67 \text{ kips. ft}) \times (12)}{(0.9 \times 36.6 \text{ ksi})}$$

$$Z_{x2} = 35.125 \text{ in}^3$$

$$Z_{W10x39} = 46.8 \text{ in}^3 \geq Z_{x2} = 35.125 \text{ in}^3$$

ACEPTADO PARCIALMENTE

Comparando el factor de resistencia obtenido se puede observar que es menor que el factor de resistencia del perfil, por lo que el perfil es aceptado parcialmente.

3.3.2. Método LRFD - Análisis por deflexión

La deformación máxima permitida para una longitud de viga de 11.5 metros es la siguiente.

$$\Delta_{un} = \frac{L}{720} = \frac{(37.7 \text{ ft}) \times (12)}{720} = 0.629 \text{ in} \quad (\text{Ec. 60})$$

Extrayendo los valores del perfil de viga y utilizando la ecuación 51, el valor de inercia mayor, que sería en el eje x al ser el más crítico, se obtiene el siguiente resultado.

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{5 \times (0.31 \text{ kips/ft} / 12) \times (37.7 \text{ ft} \times 12)^4}{384 \times (29000 \text{ lb/in}^2) \times (209 \text{ in}^4)} \quad (\text{Ec. 61})$$

$$\Delta_{m\acute{a}x} = 2.33 \text{ in}$$

$$\Delta_{un} = 0.62 \text{ in}$$

Para que se cumpla el análisis de deflexión y que el perfil escogido sea el ideal para el objetivo del proyecto, la deflexión nominal debe ser mayor a la deflexión crítica.

$$\Delta_{un} \geq \Delta_{m\acute{a}x} \quad (\text{Ec. 62})$$

Al no cumplir con la deformación, en la **Tabla 25** se pueden observar los valores de inercia según los perfiles respectivos de viga mayores al perfil con el que se hizo el reciente cálculo.

Perfil	$I_x (in^4)$	$\Delta_{m\acute{a}x}(in)$
W10x49	272	1.794
W10x54	303	1.61
W10x112	716	0.681
W12x87	740	0.659
W12x96	833	0.586
W14x74	795	0.613

Tabla 25. Valores de inercia y deflexión según el perfil de viga. De [44]

Realizando las iteraciones correspondientes en la ecuación de deflexión máxima, el perfil que encaja con los requerimientos de una deflexión mínima y casi imperceptible es el perfil W14x74.

$$\Delta_{un} = 0.62 \geq \Delta_{m\acute{a}x} 0.613 \quad (\text{Ec. } 62)$$

Se debe aclarar que, a pesar de tener el perfil de viga W12x96 con menor deflexión de todos los perfiles presentados. Como se mencionó párrafos arriba, el segundo numeral en el perfil representa el peso de la viga, mientras mayor sea el peso de la viga, será menos conveniente para el sistema. Por lo tanto, se escogió el perfil de viga W14x74.

3.3.3. Selección del perfil de viga

El factor de resistencia es uno de los dos valores que determinarán si la viga seleccionada es la correcta o no. El otro factor determinante es la deflexión de la viga, y al ser la plataforma de corta longitud, se desea la menor deflexión posible. Así como se presenta en la **Tabla 25**, al obtener la máxima deflexión permitida $\Delta_{un} = 0.629 in$, se puede observar que a pesar de que el perfil de viga W10x39 cumple con la resistencia bajo cargas de flexión, no cumple con la deflexión. Por ello, en base de la ecuación de deflexión, la variable a cambiar será la inercia, valores que se muestran en la misma tabla.

Por lo tanto, el perfil ideal según el cálculo y análisis por el método LRFD, es la viga de perfil W14x74. Medidas respectivas en la **Tabla 26**.

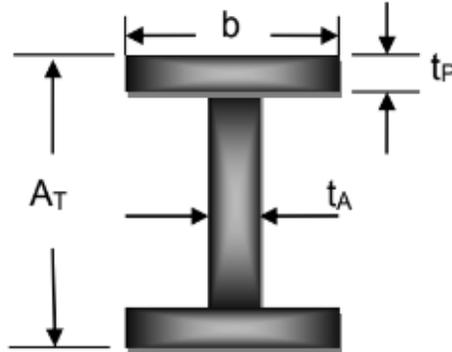


Figura 3.2. Dimensiones de una viga. De [18]

Sección de la viga	Dimensiones (in)	Dimensiones (mm)
Peralte (A_T)	14.2	360.68
Patín (b)	10.01	254.254
Espesor del alma (t_A)	0.45	11.43
Espesor del patín (t_P)	0.785	19.939

Tabla 26. Valores del perfil de viga W14x74. De [44]

Luego de obtener el perfil de viga óptimo con las cargas muertas sobre ella, con una mínima deflexión, se procederá a realizar el diseño de la estructura metálica de acero A36 en el software SolidWorks.

3.4. Modelado y simulación del sistema

Teniendo las dimensiones del perfil y longitud de viga, se realizó el diseño de la plataforma de viga (**Anexo 10**).

3.4.1. Simulación de la plataforma y sistema en SimSolid

Ahora se procede a exportar el diseño realizado en SolidWorks al software SimSolid. En dicho software se realizó la simulación, observando los resultados y efectos de la carga sobre el sistema diseñado, convalidando con ello la efectividad de la normativa y teoría al tener que diseñar un sistema plataforma-tanque.

Antes de iniciar la simulación, se debe de establecer las condiciones de contorno como los puntos de apoyo. Para tener una simulación bastante cercana a la realidad, en vez de definir como apoyo los extremos de la viga de la plataforma, agregando un pequeño bloque que representaría el borde de apoyo del tanque agitador (**Anexo 18**). Dicho bloque se consideró como inamovible para las pruebas de cargas, ya que después de repetitivas pruebas cambiando el estilo de apoyo en la plataforma, el estado y deformación más crítico es cuando ambos puntos son fijos.

Para confirmar la funcionalidad del perfil seleccionado en el ítem anterior, se realizó un análisis con el perfil de viga preseleccionado en los cálculos del método LRFD (W10x39), un perfil de viga al azar tomado de la **Tabla 25** (W10x112), y el perfil de viga final seleccionado (W14x74). El análisis se realizó diseñando el mismo modelo de plataforma y exportando el diseño al software SimSolid, donde se aplicó la carga de -0.31029 kips en el eje Y representando a la carga viva de la plataforma. El resultado obtenido gráficamente se encuentra en el **Anexo 12, 13 y 14**. Como se puede observar en la **Figura 3.3**, la plataforma diseñada con el primer perfil obtenido (W10x39) se seleccionó sin realizar un análisis de deformación, y a consecuencia de ello, la deformación de la plataforma es gradualmente mayor a los otros dos perfiles seleccionados. En el caso del segundo perfil (W10x112), se observa una menor deformación inclusive menor al perfil final seleccionado, pero debido a la composición de la viga, esta conlleva a una mayor carga muerta por el mayor peso de la viga comparado al W14x74, por lo que se descarta también. Con esto se puede concluir que el perfil seleccionado es el correcto.

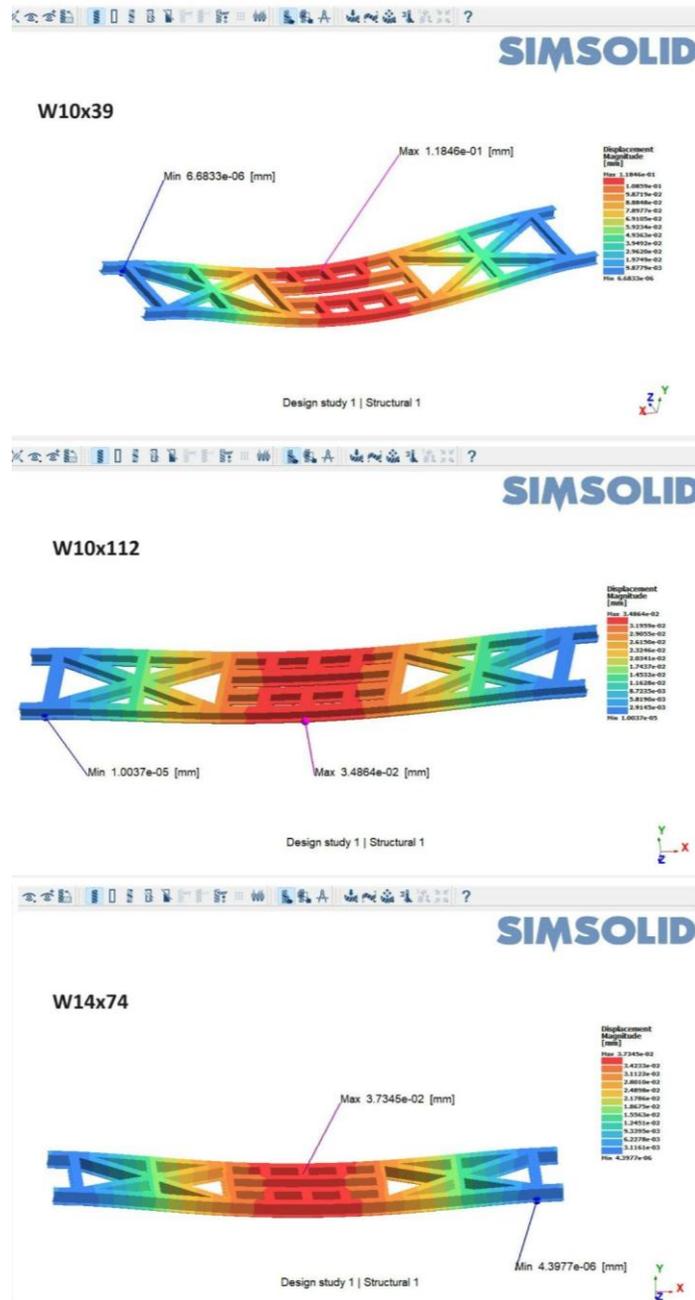


Figura 3.3. Diseño de estudio estructural de los tres perfiles de viga en SimSolid

En la **Figura 3.4** se puede observar el resultado de la simulación de la plataforma con el perfil de viga W14x74, en donde la deflexión máxima es mucho menor a la deflexión permitida de 0.63 in o 16 mm aproximadamente. A pesar de que en la figura parezca tener la estructura una mayor deformación de flexión, se debe al factor de deformación del software,

el cual permite una mejor visualización del elemento. Los valores de deflexión mínima (color azul) y máxima (color rojo) se pueden visualizar en la misma figura, siendo el mínimo un valor de $4.3977e-06$ en el apoyo de la plataforma, y la mayor deformación en el centro de esta, con un valor de $3.7345e-02$, ambos en milímetros.

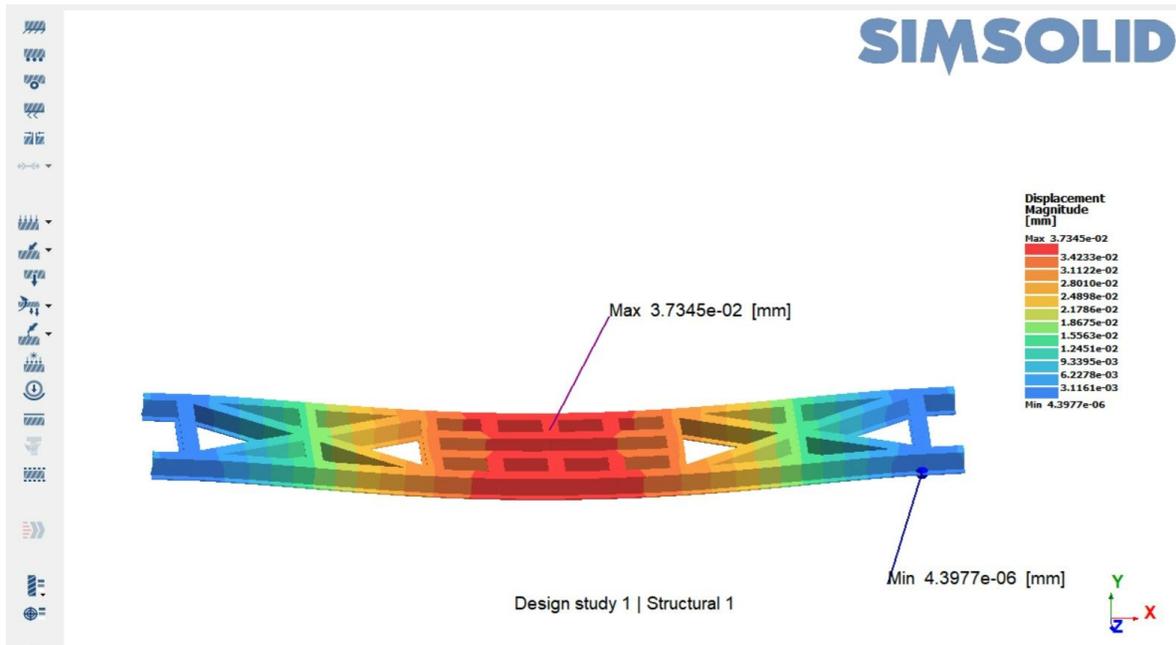


Figura 3.4. Diseño de estudio estructural en SimSolid

Luego de haber realizado la simulación de la plataforma como único elemento, se procede a realizar el mismo análisis como todo un sistema, incluyendo la estructura del tanque para observar cómo la plataforma y su carga afecta la estructura diseñada.

El sistema conformado por plataforma y tanque fue diseñado en SolidWorks y exportado al SimSolid para realizar la simulación como un solo sistema. Lo importante a considerar previo a la simulación, es la consideración de unión entre ambas estructuras, se debe de verificar que todas las uniones y apoyos deben de estar claramente definidos, combinados como ensamble y soldados.

Como se explicó anteriormente, para la definición de apoyo de la plataforma, se diseñaron pequeños bloques que se asemejan al punto de apoyo del borde del tanque. Dichos bloques se reposaron sobre el borde del tanque, probando todo tipo de apoyo, tanto fijo como

simple. En el caso de que el apoyo de la plataforma sobre el tanque se define como fijo en ambos extremos, sucede que la plataforma recibe toda la carga, sufriendo deformación en el perfil de la viga y no transmite mayor fuerza al tanque. Luego de pruebas repetitivas, la base de la estructura del tanque se define como un apoyo fijo, mientras que el apoyo de la plataforma sobre el tanque es tomado como apoyo simple, permitiendo movimientos tanto en el eje x como en el eje y, lo cual se asemeja más a la realidad.

Como se puede observar en la **Figura 3.5**, luego de haber definido la base del tanque como punto fijo, y la estructura de la plataforma sobrepuesta sobre la estructura como apoyo simple, se puede observar que las fuerzas o cargas efectuadas sobre la plataforma afectan tanto el punto de contacto de la viga y el tanque, como los lados del tanque. La deformación máxima del sistema ocurre en el extremo de la plataforma del tanque, con un valor de 5.5363×10^{-6} mm, consecutivo a ello, se puede observar que las paredes del tanque también sufren cierta deformación en cuatro lados distintos, perdiendo la forma circular del tanque agitador, siendo una posible señal de afectación de la vida útil del sistema. En cuanto a la deformación mínima del sistema sucede en la estructura del tanque.

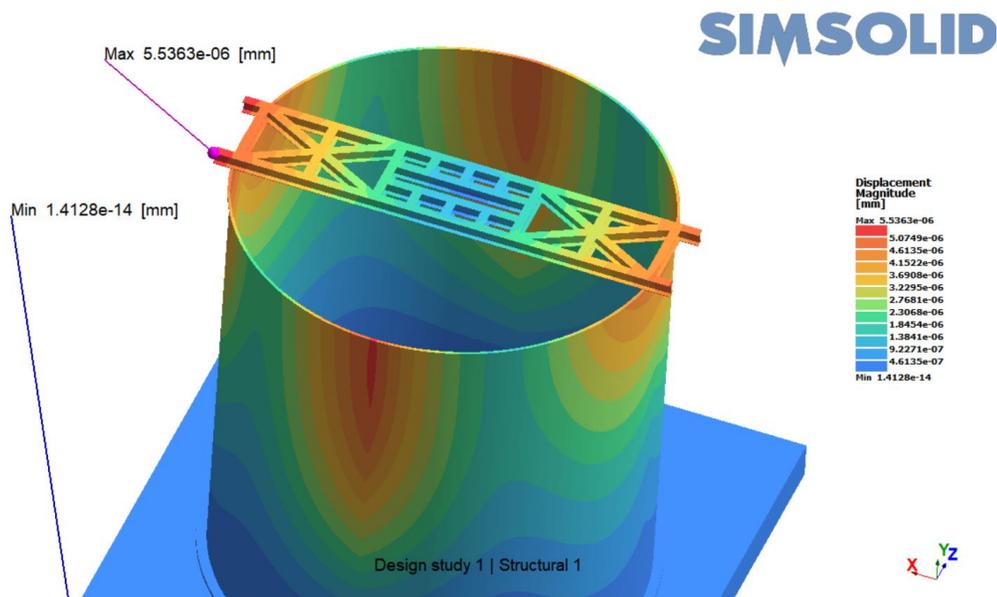


Figura 3.5. Estudio estructural del sistema en SimSolid

Una primera conclusión en base al primer resultado es que la mayor parte de la carga efectuada llega a afectar a la plataforma que reposa con apoyos simples sobre el tanque, mientras que una parte de esta carga se refleja en cuatro lados del cuerpo del tanque.

Como propuesta de solución o variante del apoyo de la plataforma sobre el tanque, existen tres variantes encontradas en diversos trabajos de investigación similares [18][49]. En una de las propuestas se menciona el colocar una plancha del mismo material del cuerpo del tanque, donde reposará la plataforma previamente diseñada encima de ella (**Anexo 15**). Como segunda propuesta observada en los trabajos fue el colocar una columna o viga soporte a la altura de cada punto de apoyo de la plataforma, reforzando así la pared del tanque en el punto de unión de los dos elementos (**Anexo 16**). Y como tercera propuesta, similar a la segunda, se colocan columnas o vigas en la zona exterior de la pared del tanque con el objetivo de distribuir las cargas y reforzar la pared del tanque, solo que en diferencia del anterior, en esta se colocó alrededor de toda la pared del tanque agitador (**Anexo 17**).

Cada propuesta mencionada fue diseñada y simulada al igual que la propuesta principal del presente trabajo. Entre las propuestas mencionadas, se puede observar en la **Figura 3.6** la diferencia que hay en la escala de colores como resultado de desplazamiento de deformación en el sistema. En la primera propuesta se puede observar que el resultado es bastante similar al diseño principal. En la segunda propuesta con dos columnas en cada lado del tanque, varía mínimamente a los otros dos diseños, mientras que en la tercera propuesta, con columnas alrededor del cuerpo del tanque, se puede observar que la carga se distribuye en la carcasa del tanque, resultando con menor deformación que en las otras dos propuestas. Con ello se pudo comparar la efectividad de cada propuesta encontrada en los trabajos externos, verificando que la tercera propuesta es la más factible en cuanto a deformación de estructura, aunque también implicaría mayor costo y uso de material para el diseño y construcción.

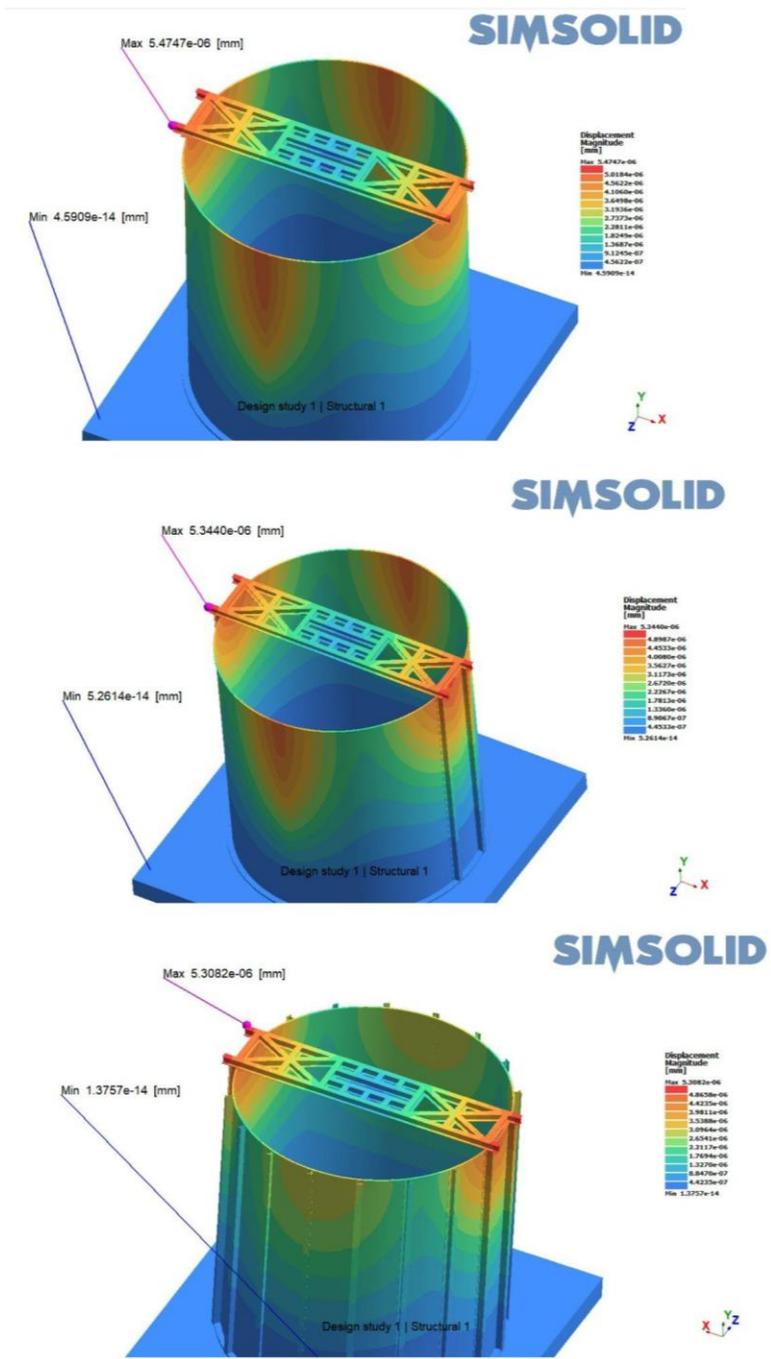


Figura 3.6. Estudio estructural de las tres propuestas en SimSolid

3.4.2. Simulación del sistema en RFEM

Ahora se procede a realizar el diseño en el software RFEM 6. Conociendo en teoría la funcionalidad del programa RFEM, se podrá con ello convalidar y reafirmar el diseño elaborado en base a la teoría de la norma API 650, aplicando la fuerza o acción eólica a la estructura del tanque agitador.

Primero se debe definir la base de concreto en la que reposa el tanque agitador, con que sea un diámetro mayor al del tanque, entre 13 a 15 m se consideró en este trabajo. Segundo se modela el diámetro del tanque con valor de 11.46 m, con este croquis se equidista la circunferencia a una distancia de 6 mm, valor del espesor del tanque. Teniendo el perfil del tanque, se extruye la silueta 12m, valor de la altura del tanque. Tercero, se definen los apoyos al igual que se hizo con el software anterior. El concreto de base del tanque se define como apoyo fijo por estar fijo en la tierra. La base del tanque es un apoyo simple ya que en base al procedimiento calculado, el tanque no requiere de anclajes al suelo.

Como paso final, se procede a insertar la carga del viento sobre una cara del tanque, con el valor del momento de vuelco generado por el viento ($M_w = 110.556 \text{ kN.m}$). En la **Figura 3.5** se puede observar el diseño del tanque plasmado en el software RFEM, reposando sobre una base de concreto. Teniendo los apoyos definidos se agrega la carga del viento sobre una cara del tanque, y se realiza la simulación del programa.

Se observa que en caso de una ventisca fuerte, el tanque no sufrirá de mayor deformación, teniendo como resultado confirmación del cálculo de diseño de la norma API 650, el tanque no requiere de anclaje al piso.

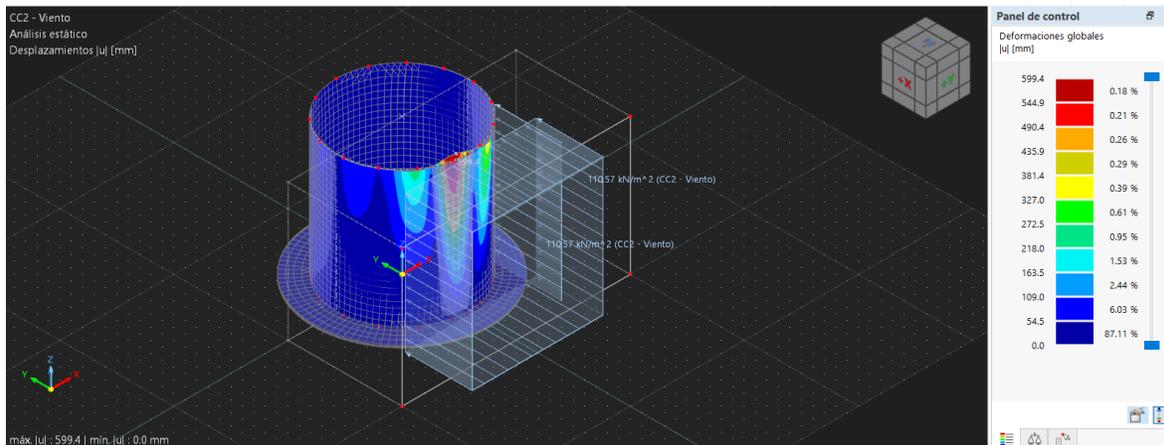


Figura 3.7. Estudio estructural del sistema en RFEM

Luego de haber calculado y simulado la carga de viento sobre la estructura del tanque, se puede confirmar que el diseño realizado utilizando la norma API 650 fue correcto. Cabe destacar que el software RFEM, al ser un programa de análisis de cargas, cuenta con la opción de diseñar estructuras como edificaciones. Para este trabajo, al igual que el SimSolid, se intentó realizar el análisis del sistema como uno solo, pero debido a que el software para análisis de tanques considera el elemento como superficie, y la plataforma como un elemento estructural sólido (brinda opciones de definir perfil y normativas), la simulación y análisis de ambos elementos como uno solo no resultó viable.

3.5. Análisis de integración de normativa

La combinación de estas dos normativas en un solo sistema da lugar a incongruencias en la fusión de los elementos. Estas son las siguientes:

- Falta de recomendación o soporte definido entre plataforma y tanque.
- Inexistencia de definición de una longitud mínima de viga de plataforma al sobrepasar el diámetro del tanque.
- Falta de definición de un espesor mínimo de la estructura del tanque recomendable para el soporte de la viga.

- Estos problemas han sido identificados y estudiados en otros trabajos [18] [49], que brindan recomendaciones precisas para el diseño de empresas mineras con capacidades específicas.

Las incongruencias presentadas pueden ocasionar fallas en el diseño y la estructura al ser sometidos a cargas, como abollamiento de la estructura del tanque o el aplastamiento del alma de la viga de la plataforma. Con lo expuesto y todo el análisis realizado a lo largo del trabajo, se puede concluir que las incongruencias presentadas al inicio del trabajo se confirma su existencia ante la reacción y consecuencias de la unión de ambos cuerpos o estructuras en un solo sistema.

CONCLUSIONES

Luego de presentar el procedimiento y resultados del cálculo y análisis, junto al conocimiento adquirido tanto en la carrera como a lo largo del proceso de realizar este trabajo, se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

1. Luego de analizar el proceso de lixiviación de oro, con enfoque en el uso de tanques agitadores en la industria minera peruana, se ha podido descubrir que este proceso se encuentra en desarrollo a nivel industrial, y por lo tanto en el diseño de ingeniería. Al ser una nueva propuesta de proyecto, es importante profundizar el sector para ampliar las posibilidades de mejora de dicho proceso en la etapa de ingeniería.
2. En este estudio se realizó la caracterización de los tanques agitadores que forman parte del proceso de lixiviación de oro en el sector minero, lo cual permitió conocer el diseño, los requerimientos funcionales y los componentes que accionan el tanque agitador. Con ello, se pudo comparar con los diseños de tanques agitadores existentes tanto en el sector como en la norma API 650, logrando definir y seleccionar la composición del tanque agitador adecuado, permitiendo continuar con los cálculos.
3. Se investigó la norma API 650 la cual es relevante para el diseño del tanque agitador, identificando los requerimientos que brinda la norma, al igual que el análisis necesario para asegurar la estabilidad del tanque junto a la identificación de cargas. Con ello, se pudo observar que la localización del tanque influye debido a la acción sísmica y eólica que puede afectar a la estructura, aplicando dichos requerimientos en el cálculo del diseño de la estructura del tanque.

4. Para el cálculo del espesor de la pared del tanque, se utilizó la norma API 650. En dicho estándar, el espesor se calculó en función a las cargas a las que está sometida el tanque en la superficie como en la presión hidrostática. Sin embargo, la norma no especifica directamente un método de cálculo de espesor por carga de sismo, especialmente el Perú debido a que se encuentra fuera de la zona en la que se puede aplicar las ecuaciones determinadas por la norma API 650. Por ello, se recomienda seguir las normas y procedimientos de diseño sísmico establecidos por el código de construcción aplicable en la región, la norma técnica E-030.

5. Se investigó la norma AISC la cual es relevante para el diseño de la plataforma que reposa sobre el tanque y carga con los equipos que accionan el tanque agitador, lo cual permitió identificar las cargas involucradas en la plataforma. Comprendiendo los requisitos de la norma se aplicó al cálculo y diseño de la plataforma para realizar la selección ideal de perfil de viga con la que se diseña la plataforma.

6. En base a los resultados obtenidos mediante el cálculo LRFD y requisitos previos para el diseño del tanque en base a investigaciones externas, comparando distintos perfiles de viga que conformarían la plataforma, el perfil de viga W14 x 74 cumple con los requisitos de resistencia de carga de flexión, deformación, y cumple sus normas estructurales respectivas, API 650.

7. Se evaluó la seguridad operativa y estructural de la unión entre la estructura del tanque agitador y la plataforma de mantenimiento, teniendo en cuenta los componentes y la carga estática involucrada. Llegando a la conclusión que, la definición de los apoyos en la unión del sistema influye en gran escala debido a los resultados de las cargas y fatiga de los elementos, tanto la deformación del alma de la plataforma, como abollamiento en la estructura del tanque.

- 8.** Se realizó la validación de diseño con el uso de herramientas avanzadas de análisis estructural, como SimSolid y RFEM, lo cual permitió conocer la viabilidad y seguridad del sistema completo cumpliendo con las normas respectivas. Con ello, se pudo comparar la efectividad de cada software, al igual que la importancia de definición de apoyos entre plataforma y tanque. Resaltar el cuidado que debe de darse al modelar el sistema y definir las condiciones de apoyo o borde. Se debe definir una posible flexibilidad en el movimiento de ejes, ya que, si no es así, se alejaría de una simulación cercana a la realidad.

- 9.** Al usar el software SimSolid, no hubo necesidad de definir y seleccionar el tamaño del elemento infinito, comparado a los otros programas de simulación de elementos que usan el MEF y enmallado. Lo cual optimizó la obtención de resultados, reduciendo el esfuerzo computacional.

- 10.** Como resultado de la simulación del SimSolid, se puede visualizar la interacción existente de la plataforma con el tanque. Para la unión de los elementos debe de definirse correctamente los apoyos, tal cual hechos en el presente trabajo, sino se obtendrá un posible error en el programa. En la simulación se puede observar un abollamiento ligero en la estructura del tanque, pero donde hay mayor afectación debido a las cargas, es en la plataforma. Por lo cual, se recomienda enfocarse en el diseño de la plataforma para evitar que el alma de la viga se abolle, distribuyendo las cargas.

- 11.** Se pudo presenciar que al intentar simular el sistema plataforma-tanque en el software RFEM, el programa no permitió realizar los cálculos debido a problemas de generación de malla. En el programa RFEM, los tanques son diseñados como superficie pero no como sólido, y al diseñar una plataforma con vigas sobre el tanque, surge un error de diseño en el programa. Por lo cual, el programa con la versión a la fecha no permite realizar la simulación de la unión de plataforma y tanque.

- 12.** Como recomendación de mejoras específicas en el diseño de los tanques agitadores se diseñaron propuestas de sistema como el añadir columnas verticales bajo la plataforma de mantenimiento reaccionando como soporte aparte de los anillos atiesadores. Realizando la simulación en SimSolid, se evita la menor deformación posible tanto en la plataforma como en la estructura del tanque. Lo cual implica un mayor costo adquisitivo.

- 13.** Debido al alcance del trabajo, no se consideraron las placas deflectoras en el modelo del tanque, solo la teoría. Sin ellas, se generará un flujo rotacional dentro del tanque debido a la fuerza centrífuga que actúa sobre el mineral, lo cual va a generar grandes esfuerzos sobre el eje del agitador, apoyos, rodamientos y soldaduras. No obstante, se recomienda para futuros trabajos realizar un estudio de ellas a nivel del fluido lixivante.

- 14.** En cuanto al diseño y sus normas respectivas, se deben de tomar en cuenta las cargas modeladas y que cumplan con ellas. Es importante definir si la carga llega a ser despreciable o no para evitar el esfuerzo computacional, sin afectar el resultado final de un modelo correcto. Dichas definiciones de cargas deben ser confirmadas a través de cálculos analíticos, del cual debe mostrar un bajo error relativo.

- 15.** Como conclusión, después de haber generado la investigación, se puede afirmar que existe la posibilidad de mejorar el proceso de diseño de ingeniería para el diseño del tanque en el proceso de lixiviación de oro, buscando la complementación de las normas que podrían facilitar una mejora etapa de diseño, cubriendo las incongruencias que se presentan en el proceso de diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Intranox, “Tanques de mezcla y agitación en acero inoxidable”, Tanques de mezcla. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.intranox.com/tanques-de-almacenamiento/tanques-de-mezcla>
- [2] Anglo American Peru, “Minería, una actividad que aporta significativamente a la economía peruana”. Consultado: el 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://peru.angloamerican.com/moquegua/impulso-minero/mineria-una-actividad-que-aporta-significativamente-a-la-economia-peruana.aspx>
- [3] Grupo Banco Mundial, “Diagnóstico del Sector Minero - Perú”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/country/peru/publication/diagnostico-del-sector-minero-peru>
- [4] Ministerio de Energía y Minas, “MINERÍA PERUANA: MOTOR QUE IMPULSA EL CRECIMIENTO”, 2023.
- [5] K. D. Rondo-Jalca, A. N. Santos-Gonzales, I. C. Villalobos-Segura, J. A. Vega-Gonzalez, M. A. Cotrina-Teatino, y H. R. Portilla-Rodríguez, “Main gold mining companies using cyanidation leaching processes in Peru”, en *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2023. doi: 10.18687/laccei2023.1.1.250.
- [6] SGS Peru, “Lixiviación con cianuro”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sgs.com/es-pe/service-groups/lixiviacion-con-cianuro>
- [7] M. J. Logsdon, K. Hagelstein, y C. I. Terry Mudder, “El Manejo del cianuro en la extracción de oro”, *International Council on Metals and the Environment*, p. 15, 2001, Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/leonardoarboleda2/proceso-de-cianuracion>
- [8] M. Schwarz, “Como funciona el proceso de lixiviación para la obtención de oro”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=6VBg9I9vwFM>
- [9] J. Marrufo, “Optimización de la Recuperación del oro en el proceso de lixiviación en pilas (Heap leaching)”, 2019.

- [10] G. Calderón Vizcarra y R. Garro Rosas, “Monitoreo de flujos de solución en las pilas de lixiviación de cobre”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://revistamineria.com.pe/actualidad/monitoreo-de-flujos-de-solucion-en-las-pilas-de-lixivacion-de-cobre>
- [11] 911 Metallurgist, “Merrill-Crowe En El Proceso De Lixiviacion De Oro Y Plata”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/merrill-crowe-en-el-proceso-de-lixivacion-de-oro-y-plata/>
- [12] I. Broggi, “LIXIVIACIÓN - Fundamentos y aplicaciones”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/lixivacion-en-pilas/>
- [13] Dynakrom, “Proceso Merrill Crowe”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dynakrom.com/nitrato-de-plomo/merrill-crowe>
- [14] Ingeniería de Minas, “Método Merrill Crowe [Para Recuperar los Valores de Oro y Plata]”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=yz7_2pxH-HY
- [15] ULMA Forged Solutions, “Acero al carbono: qué es, tipos | ULMA Forged Solutions”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ulmaforge.com/noticia/acero-al-carbono-tipos-aplicaciones/>
- [16] Leeco STEEL, “Acero A36 vs. A572: comparación de grado”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.leecosteel.com/es/news/post/astm-a36-vs-astm-a572-grade-comparison/>
- [17] H. Rolón-Ortiz, C. Acevedo-Peñaloza, y Y. Villamizar-González, “Análisis térmico, modelamiento matemático y simulación de un reactor de agitación discontinuo para volumen específico”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, núm. 1, pp. 39–48, ene. 2019, doi: 10.18273/revuin.v18n1-2019003.
- [18] J. M. Cervantes Garcés, “Diseño de un tanque agitador de 160 m³ de capacidad para lixiviación de oro”, 2018.
- [19] 911 Metallurgist, “Diseño de Plantas de Lixiviación”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/diseño-de-plantas-de-lixivacion/>
- [20] C. Nina Ochoa, “Diseño de tanques según API 650”, 2015.

- [21] Saga Fluid, “Agitadores para tanques mezcladores: ¿Cómo funcionan?” Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sagafluid.com/agitadores-industriales-tanques-mezcladores/>
- [22] Scala Learning, “Transformaciones de esfuerzo-deformación”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://gc.scalahed.com/recursos/files/r145r/w1451w/U6liga7.htm>
- [23] J. Ramírez-Muñoz, D. García-Cortés, J. A. Colín-Luna, y C. R. Tapia-Medina, “Efecto de la Evolución del Vórtice sobre los Parámetros Hidrodinámicos de un Sistema de Dispersión Mecánica de Pigmentos”, *Informacion Tecnologica*, vol. 27, núm. 4, pp. 145–154, 2016, doi: 10.4067/S0718-07642016000400016.
- [24] M. Heras Neri, “Diseño de Tanque de Agitación”, 2017.
- [25] D. F. Martinez Monsalve, “Diseño y construcción de un biorreactor tipo Fed-Batch para fines experimentales”, 2019.
- [26] PROQUISUR, “Agitador de Propela Digital Reversible BDC2010 -”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.productosquimicosdelsur.com.mx/caframo-lab-solutions/agitador-digital-reversible-bdc2010/>
- [27] V. Castillo Uribe, “Diseño y cálculo de un agitador de fluidos”, 2013.
- [28] P. F. Erazo Soria y R. J. Vizuet Benítez, “Diseño y construcción de una mezcladora industrial para la elaboración de vino de frutas con capacidad de 2000 litros”, 2011.
- [29] American Petroleum Institute, “API 650 - Welded Tanks for Oil Storage”, 2020.
- [30] Fluidmix, “Agitadores Industriales”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.agitadoresfluidmix.com/agitadores-industriales/>
- [31] J. I. Navarro Ospino, A. Castrillon Velasquez, y A. D. Ardila Montoya, “Optimización de un sistema agitador tipo vertical de paletas planas inclinadas para mezcla de abono orgánico aplicado en el sector agroindustrial”, 2015.
- [32] D. Vi, “Agitación - Configuración típica de un sistema de agitación motor, velocidad 1750 rpm reductor”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/17304511/>
- [33] Grupo Casa Lima, “Minas de Oro en Perú: ¿Dónde se produce más oro en Perú?” Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en:

- <https://grupocasalima.com/blog/mineria/minas-de-oro-en-peru-donde-se-produce-mas-oro-en-peru/>
- [34] AHMSA, “Manual de diseño para la construcción con acero AISC - Especificaciones para edificios de acero”, 2013.
- [35] G. Yazici, “Housner’s Mechanical Analogue Model for Liquid Storage Tanks with Rigid Walls”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Housners-Mechanical-Analogue-Model-for-Liquid-Storage-Tanks-with-Rigid-Walls-Subjected_fig1_311675488
- [36] C. y S.-P. Ministerio de Vivienda, “Norma E-030 Diseño Sismorresistente”, 2016.
- [37] Buenaventura, “CIRCUITO DE CIANURACION INTENSIVA”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=kgVPO2WLR3k>
- [38] Grupo Acura, “Mejorando la eficiencia en la mezcla industrial: Agitadores para tanques industriales”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://grupoacura.com/es/blog/agitadores-industriales/>
- [39] O. Osha, “Sistemas de barandales, sistemas de barandales para escaleras y pasamanos en lugares de trabajo de la industria en general”.
- [40] Yohersa, “Tubo SCH 40 y SCH 80”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.yohersa.com/tubo-sch>
- [41] ASME, “American Society Of Mechanical Engineers - ASME”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.asme.org/about-asme>
- [42] L. A. Burgos Muñoz y K. A. Catota Robles, “Algoritmo para diseño de estructuras de acero bajo la norma AISC”, 2021.
- [43] American Institute of Steel Construction, “AISC Steel Construction Manual 14th edition ANSI AISC 360 10 Specifications for Structural Steel Building”, vol. 14, 2011.
- [44] “AISC 13.0 Properties Viewer - Excel”. 2015.
- [45] Altair SimSolid, “Análisis estructural para repeticiones de diseño rápidas”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.altair.com.es/simsolid/>

- [46] K.-J. Bathe y E. L. Wilson\$, “FINITE ELEMENT FORMULATIONS FOR LARGE DEFORMATION DYNAMIC ANALYSIS”, 1975.
- [47] “RFEM 6 | Software de análisis MEF | Dlubal Software”. Consultado: el 18 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dlubal.com/es/productos/rfem-software-del-mef/que-es-rfem>
- [48] Dlubal Software, “Software de análisis de estructuras RFEM por el método de los elementos finitos”. Consultado: el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dlubal.com/es/productos/rfem-5/que-es-rfem>
- [49] J. L. Málaga Alarco, “Evaluación del diseño estructural de un sistema tanque-plataforma de lixiviación de 3336 m³ de capacidad”, 2014.
- [50] L. E. Ricaurte Freire, “Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes”, 2016.
- [51] K. Pilco García, “Espesores Planchas Acero”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/482685072/ESPESORES-PLANCHAS-ACERO>
- [52] Fiorella Representaciones S.A.C., “Planchas de acero ASTM A36, ASTM A6 laminada en caliente LAC”, 2013.
- [53] WEG, “WEG - Selección de Motores Eléctricos”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp
- [54] WEG, “W22 High Efficiency 75 HP 6P 444/5T 3F 220/380/440 V 50 Hz IC411 - TEFC - Con pies”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.weg.net/catalog/weg/AR/es/Motores-El%C3%A9ctricos/Motores-IEC-de-Baja-Tensi%C3%B3n/Severe-Duty/TEFC/W22-%28Hierro-Gris%29/W22-High-Efficiency-75-HP-6P-444-5T-3F-220-380-440-V-50-Hz-IC411---TEFC---Con-pies/p/14233757>
- [55] R., Sampieri, et al., Metodología de la investigación (5ta. ed.), México: Mc Graw Hill, 2010.

ANEXOS

ANEXO 1: Ecuaciones de una viga simplemente apoyada

Table 3-23
Shears, Moments and Deflections

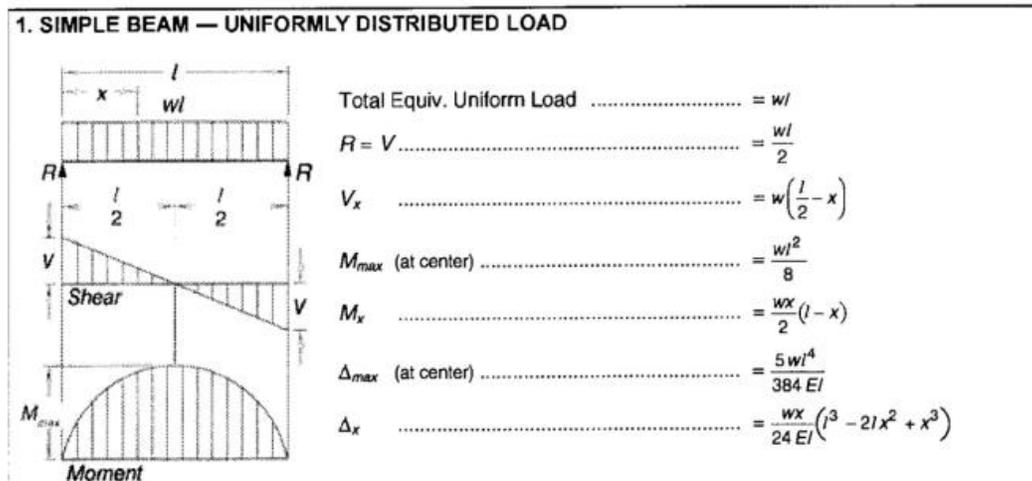


Figura A.1 Tabla de Momento máximo en el centro para el cálculo de diseño de la plataforma con el Método LRFD (pg. 3-213). De [43]

ANEXO 2: Cálculo de dimensiones del tanque

$$\begin{array}{l} \text{Perímetro} = 34,05 \text{ m} \rightarrow \cancel{34,8 \text{ m}} \rightarrow 36 \text{ m} \\ \text{Diámetro} = 10,84 \text{ m} \rightarrow \cancel{10,84 \text{ m}} \rightarrow 11,46 \text{ m} \end{array}$$

$$P = 2\pi r = \pi \times d$$

$$\text{Altura: } 1500 \times 2400 \times 7$$

$$\frac{1500 \times 6000 \times 3}{}$$

$$15 \text{ m Altura}$$

$$34,8 \text{ m Perímetro}$$

☞ Testing:

$$6 \times 3 + 2,4 \times 9 = 39,6$$

$$6 \times 3 + 2,4 \times 6 = 32,4$$

↳ Planchas de 2400 mm no es efectivo

$$\text{Altura: } 1500 \times 3000 \times 4$$

$$\frac{1500 \times 6000 \times 4}{}$$

$$\times 8 \text{ p} = 12 \text{ m Altura}$$

$$36 \text{ m Perímetro}$$

$$\text{Volumen} = \pi \times r^2 \times h \rightarrow r = 5,729 \text{ m}$$

$$\text{Volumen con placas} = 1237,589 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen necesario} = 1000 \text{ m}^3$$

$$\rightarrow \text{Restando 25\% de "seguridad"} = 928,2 \text{ m}^3 < 1000$$

$$\times 9 \text{ placas} = 13,5 \text{ m altura} = 139,2874 \text{ m}^3$$

$$-25\% = 1044,216 \text{ m}^3 > 1000 \text{ m}^3$$

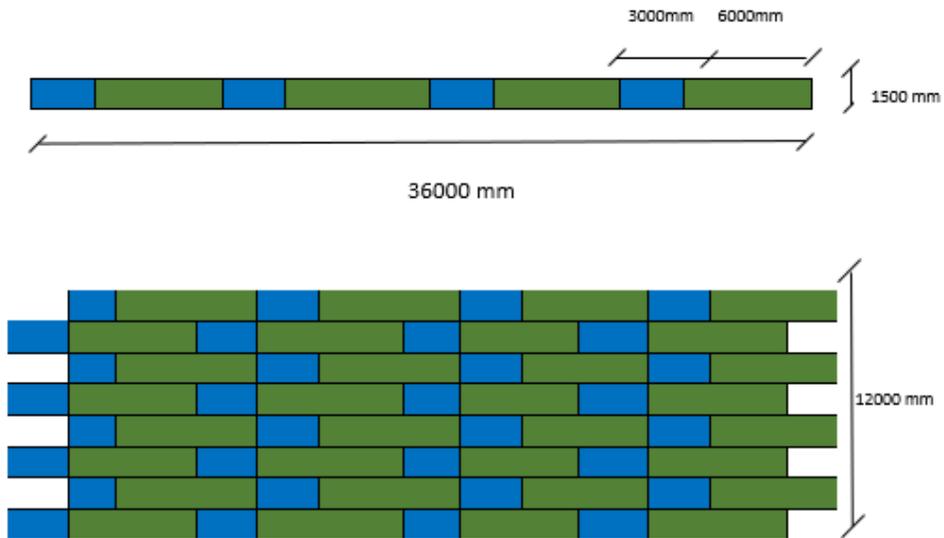
Figura A.2 Procedimiento para la selección de placas con sus dimensiones.

ANEXO 3: Composición de planchas de acero

COMPOSICIÓN DE PLANCHAS

Plancha 1500 x 300 mm x 4 unidades

Plancha 1500 x 6,000 mm x 4 unidades



DISEÑO FINAL

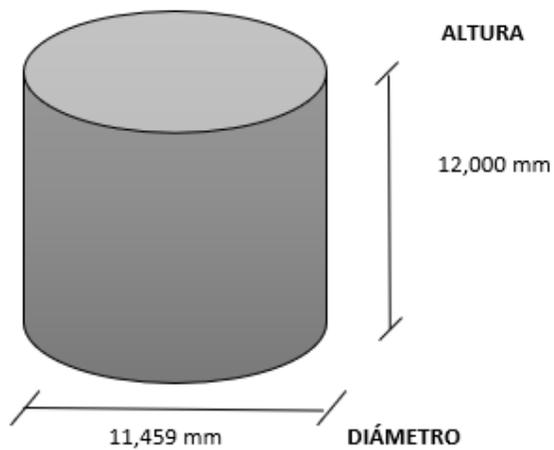


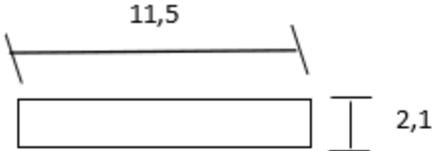
Figura A.3 Cálculo de cómo se van a distribuir las planchas seleccionadas para el cuerpo del tanque.

ANEXO 4: Propiedades del motor eléctrico WEG

HOJA DE DATOS						
Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula						
Cliente : _____						
Línea del producto : W22 High Efficiency Trifásico				Código del producto : 14233757		
Carcasa	: 444/5T			Tiempo de rotor bloqueado	: 57s (frío) 32s (caliente)	
Potencia	: 75 HP (55 kW)			Elevación de temperatura	: 80 K	
Polos	: 6			Régimen de servicio	: Cont.(S1)	
Frecuencia	: 50 Hz			Temperatura ambiente	: -20°C hasta +40°C	
Tensión nominal	: 220/380/440 V			Altitud	: 1000 m	
Corriente nominal	: 187/108/93.3 A			Grado de protección	: IP55	
Corriente de arranque	: 1119/648/560 A			Método de refrigeración	: IC411 - TEFC	
Ip/In	: 6.0x(Cód. G)			Forma constructiva	: F-1	
Corriente en vacío	: 63.9/37.0/32.0 A			Sentido de giro ¹	: Ambos	
Rotación nominal	: 985 rpm			Nivel de ruido ²	: 65.0 dB(A)	
Resbalamiento	: 1.50 %			Método de Arranque	: Partida directa	
Torque nominal	: 55.3 kgfm			Masa aproximada ³	: 715 kg	
Torque de arranque	: 190 %					
Torque máximo	: 240 %					
Clase de aislamiento	: F					
Factor de servicio	: 1.15					
Momento de inercia (J)	: 2.81 kgm ²					
Categoría	: B					
Potencia	50%	75%	100%	Fuerzas en la fundación		
Rendimiento (%)	93.0	93.6	93.6	Tracción máxima : 802 kgf		
Cos Φ	0.71	0.79	0.83	Compresión máxima : 1518 kgf		
Pérdidas en puntos de funcionamiento estándar (velocidad; par), en porcentaje de la potencia nominal						
P1 (0,9;1,0)	P2 (0,5;1,0)	P3 (0,25;1,0)	P4 (0,9;0,5)	P5 (0,5;0,5)	P6 (0,5;0,25)	P7 (0,25;0,25)
6.5	5.2	4.8	3.2	2.0	1.3	0.9
<u>Delantero</u>			<u>Trasero</u>			
Tipo de cojinete	: NU-319 C3		: 6316 C3			
Sello	: WSeal		: WSeal			
Intervalo de lubricación	: 12000 h		: 18000 h			
Cantidad de lubricante	: 45 g		: 34 g			
Tipo de lubricante	: Mobil Polyrex EM					

Figura A.4 Hoja de datos del motor seleccionado. De [53]

ANEXO 5: Dimensionamiento de barandas y pasamanos



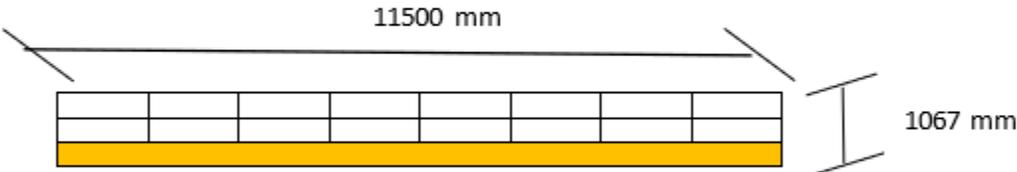
Área = 24,15 m²

Densidad del Tramex = 40 Kg/m²

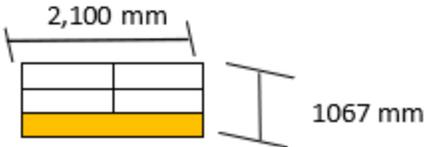
Peso total del Tramex en toda la plataforma = 966 Kg

Contabilidad de tubos para la baranda de la plataforma:

Diámetro = 42,2 mm



- 2 tubos de longitud de 11,5 m
 - 11 tubos de longitud de 1,067 m
 - 1 plancha de 11,5 m
- } x 2 (ambas caras)



- 2 tubos de longitud de 2,1 m
- 3 tubos de longitud de 1,067
- 1 plancha de 2,1m

Figura A.4 Cálculo de composición de tubos y rodapiés en la plataforma para determinar la carga efectuada.

Total de planchas y tuberías

➤ **Planchas:**

2 planchas de 11,5 m de largo
1 plancha de 2,1 m de largo
Espesor de pared de 3,56 mm * Norma
Altura rodapié de 76 mm * Norma
Acero A36

$$\text{Densidad} = 7,850 \text{ Kg} / \text{m}^3 \quad / \quad t = 0,00356 \text{ m}$$

↳ **Peso total**

$$1) \begin{array}{|c|} \hline \text{X 2} \\ \hline 11,5 \\ \hline \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0,076 \quad 11,5 \times 0,076 \times t = 24,424804 \text{ Kg}$$

(x 2 unid) = **48,849608 Kg**

$$2) \begin{array}{|c|} \hline \text{X 1} \\ \hline 2,1 \\ \hline \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0,076 \quad 2,1 \times 0,076 \times t = 4,4601816 \text{ Kg}$$

Total rodapié = 53,3097896 Kg

➤ **Tuberías:** Schedule 40 de 42,2 mm (5,61 Kg / m)

$$\begin{array}{rcl} 11,5 \text{ m} \times 4 & = & 46 \text{ m} \\ 1,067 \text{ m} \times 11 \times 2 + 1 & = & 24,541 \text{ m} \\ 2,1 \text{ m} \times 2 & = & 4,2 \text{ m} \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 74,741 \text{ m}$$

Peso total pasamanos = 419,29701 Kg

Figura A.5 Cálculo de peso de barandas y rodapiés.

ANEXO 6: Cálculo de perfil de viga

➤ **Laminado caliente en acero A36** ($F_y = 36,6945 \text{ Ksi}$)

↳ Pesos carga específica (Kg → N)

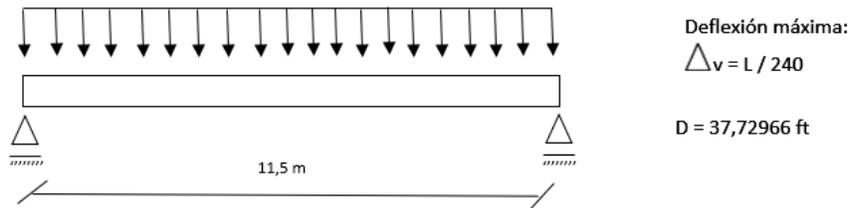
$$(3469,78 + 400) \times 9,81 = 37962,5418\text{N} \rightarrow F_1 = 8,5343 \text{ Kips}$$

Eje con Impellers Motor

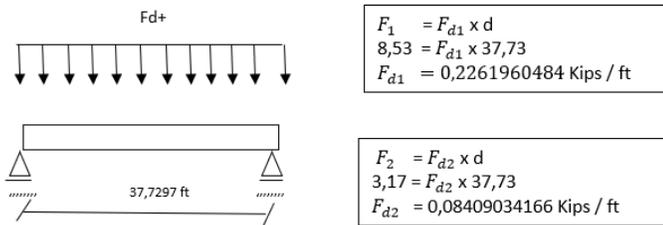
↳ Pesos carga distribuida (Kg → N)

$$(419,3 + 53,31 + 966) \times 9,81 = 14112,7641\text{N} \rightarrow F_2 = 3,1727 \text{ Kips}$$

Plataforma Rodapié Cilindro



➤ **SOLUCIÓN MÉTODO LRFD**



$$F_{dT} = F_{d1} + F_{d2}$$

$$F_{dT} = 0,3102863901 \text{ Kips / ft}$$

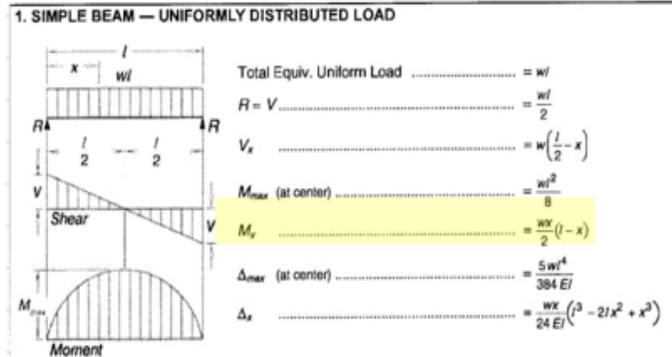
$$W_{u1} = 1,2 (D) + 1,6 (L)$$

$$= 1,2 (0) + 1,6 (F_{dT}) = 0,4964582241 \text{ Kips / ft}$$

➔ Mu : Manual AISC Sección 3, pg 192
(pg 404) Tabla 3 -23

Figura A.6 Cálculo de las cargas muertas sobre la plataforma como carga distribuida, siendo introducción al análisis por flexión con el método LRFD.

Table 3-23
Shears, Moments and Deflections



$$M_{m\acute{a}x} = M_{u1} = \frac{WL^2}{8} = \frac{(0,496 \text{ kips/ft})(37,7\text{ft})^2}{8} = \frac{706,7}{8}$$

$$M_{u1} = 88,34022592 \text{ kips} \times \text{ft}$$

MÉTODO LRFD: $R_u \leq \phi \times R_n$

$(\phi_b = 0,9)$

Momento nominal = Momento plástico = $F_y \times Z_x$

$F_y \rightarrow$ (Esfuerzo de fluencia)

$Z_x \rightarrow$ (Factor de resistencia en elementos de flexión)

$$M_{u1} \leq \phi_b \times M_{n1}$$

$$M_{u1} \leq \phi_b \times F_y \times Z_{x1}$$

(Tablas inch) $Z_{x1} = \frac{Mu1}{(\phi_b \times F_y)} = \frac{(88,3 \text{ kips} \times \text{ft}) \times (12)}{(0,9) \times (36,6 \text{ ksi})}$

$$Z_{x1} = 32,09935219 \text{ in}^3$$

Figura A.7 Cálculo del momento máximo en el centro de la viga. Análisis por flexión con el método LRFD.

☞ Dimensiones y propiedades de perfiles de acero AISC (Plantilla excel)

$$Z_{x1} = 32 \text{ in}^3 \rightarrow \text{Spam (longitud)} = 11,5 \approx 37,7 \text{ ft}$$

$$\text{Perfil W} \rightarrow \text{menor} = \text{W10 x 30} (Z_x = 36,6 \text{ in}^3)$$

Se desea la menor deflexión posible = **W 10 x 39**

$$Z_x = 46,8 \text{ in} \quad I_x = 209 \text{ in}^4$$

$$\text{W10 x 39} \rightarrow \text{Peso}$$

Ahora calcular considerando el peso de la viga

$$\text{Peso} = 39 \text{ lb/f} \rightarrow 39 \times 10^{-3} \text{ kips/f}$$

$$\begin{aligned} W_{u2} &= 1,2 (D) + 1,6 (L) \\ &= 1,2 (0,039 \text{ kips/f}) + 1,6 (0,31028 \text{ kips/f}) \\ &= 0,5432582242 \text{ kips / ft} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{u2} &= \frac{W_{u2} \times L^2}{8} = \frac{(0,5432 \text{ kips/ft}) \times (37,729 \text{ ft})^2}{8} \\ &= 96,66786031 \text{ kips / ft} \end{aligned}$$

$$M_{u2} = \phi_b \times M_{n2} = \phi_b \times F_y \times Z_{x1}$$

$$\begin{aligned} Z_{x2} &= \frac{M_{u2}}{(\phi_b \times F_y)} = \frac{(96,67 \text{ kips/ft}) (12) (\text{in})}{(0,9) (36 \text{ ksi})} \end{aligned}$$

$$Z_{x2} = 35,12528592 \text{ in}^3$$

$$Z_{x(\text{W10x39})} = 46,8 \text{ in} > Z_{x2} \quad \checkmark \text{Aceptado}$$

Figura A.8 Cálculo de inercia y selección del primer perfil de viga ideal en función al análisis por flexión.

Deformación máxima permitida:

$$\Delta_{un} = \frac{L}{720} = \frac{37,7 \text{ ft} \times 12 \text{ (in)}}{720} = 0,6288276667 \text{ in}$$

↳ Elemento pequeño

→ Tabla 3 – 23, diseño de elementos a flexión (pg. 404)

$$\Delta_{max} = \frac{5WL^4}{384EI}$$

(at center)

→ Excel AISC, W – Shapes, Dimensions

W10 X 39 → $A = 11,5 \text{ in}^2$

Axis X-X → $I_x = 209 \text{ in}^4$ (momento de inercia mayor)
 $I_y = 45 \text{ in}^4$

El eje X es el eje fuerte y el que se va a usar para encontrar la deflexión.

$$\Delta_{max1} = \frac{5WA L^4}{384EI} = \frac{(5) \left(\frac{0,31 \text{ k/ft}}{12} \right) (37,7 \text{ ft} \times 12)^4}{384 (29000 \text{ lb/in}^2) (209 \text{ in}^4)} =$$

$$\Delta_{max1} = 2,33 \text{ in} \leq \Delta_{un} = 0.62 \text{ in} \quad \times \text{ NO ACEPTADO}$$

(2,334170238)

Módulo de elasticidad (E)

$$\text{(Young)} = 199,948 \text{ MPa} = 29000 \text{ lb/in}^2$$

Figura A.9 Cálculo de deformación máxima de la viga, demostrando que la primera elección de perfil de viga por flexión no era el indicado. Análisis por deflexión con el método LRFD.

ANEXO 7: Propiedades del perfil de viga W14x74

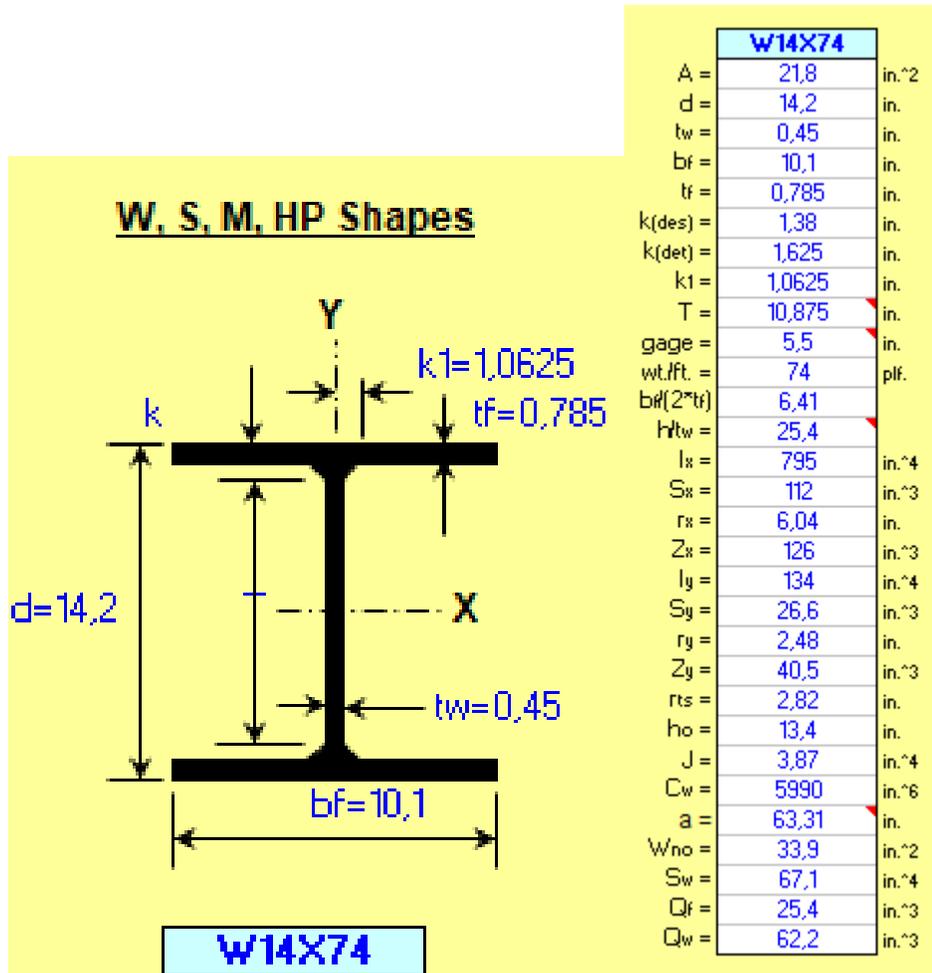


Figura A.10 Dimensiones del perfil de viga seleccionado luego del cálculo por flexión y deflexión con el método LRFD. De [44]

ANEXO 8: Diseño de perfil de viga y plataforma

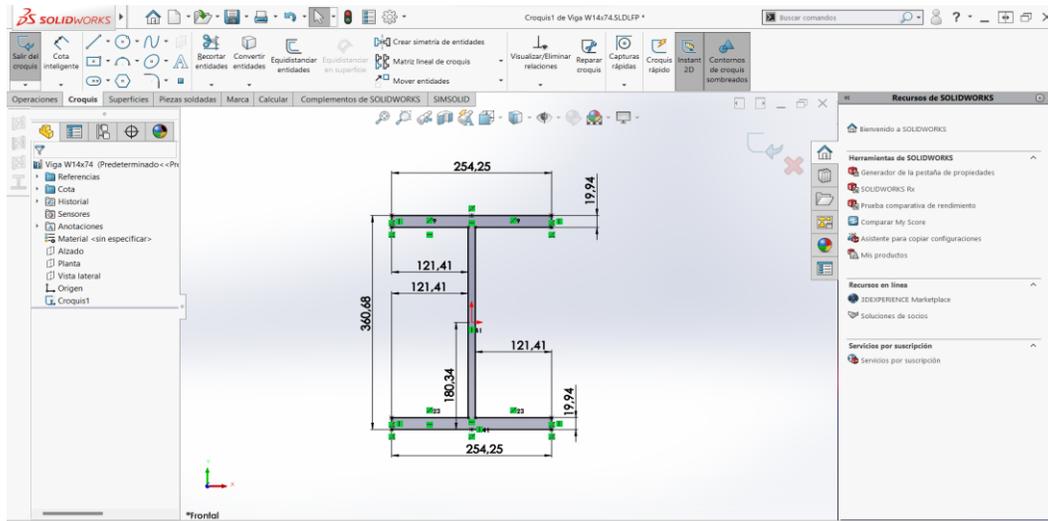


Figura A.11 Dimensiones del perfil de viga seleccionado luego del cálculo por flexión y deflexión con el método LRFD.

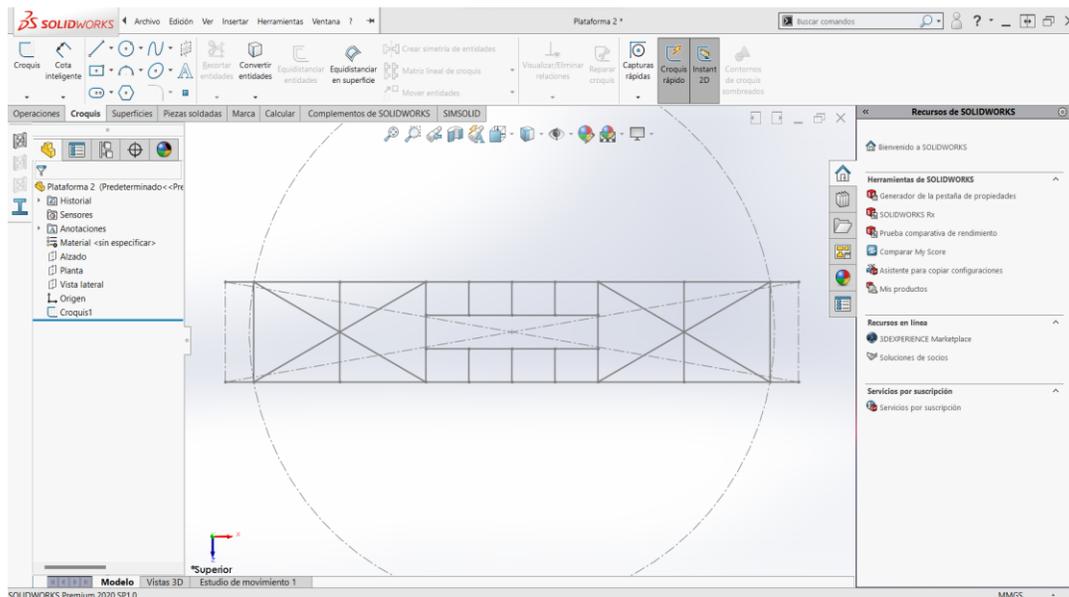


Figura A.12 Vista de planta de distribución de vigas para distribuir la carga en la plataforma.

ANEXO 9: Composición de la plataforma

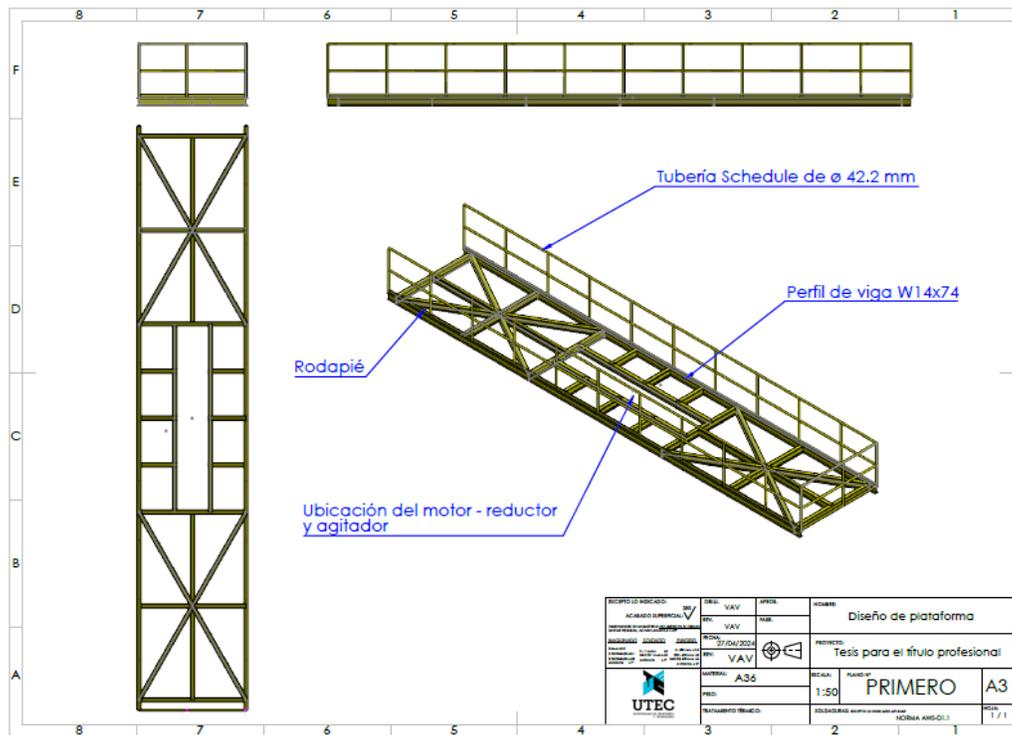


Figura A.13 Presentación de composición de elementos de la plataforma en SolidWorks

ANEXO 10: Diseño de plataforma

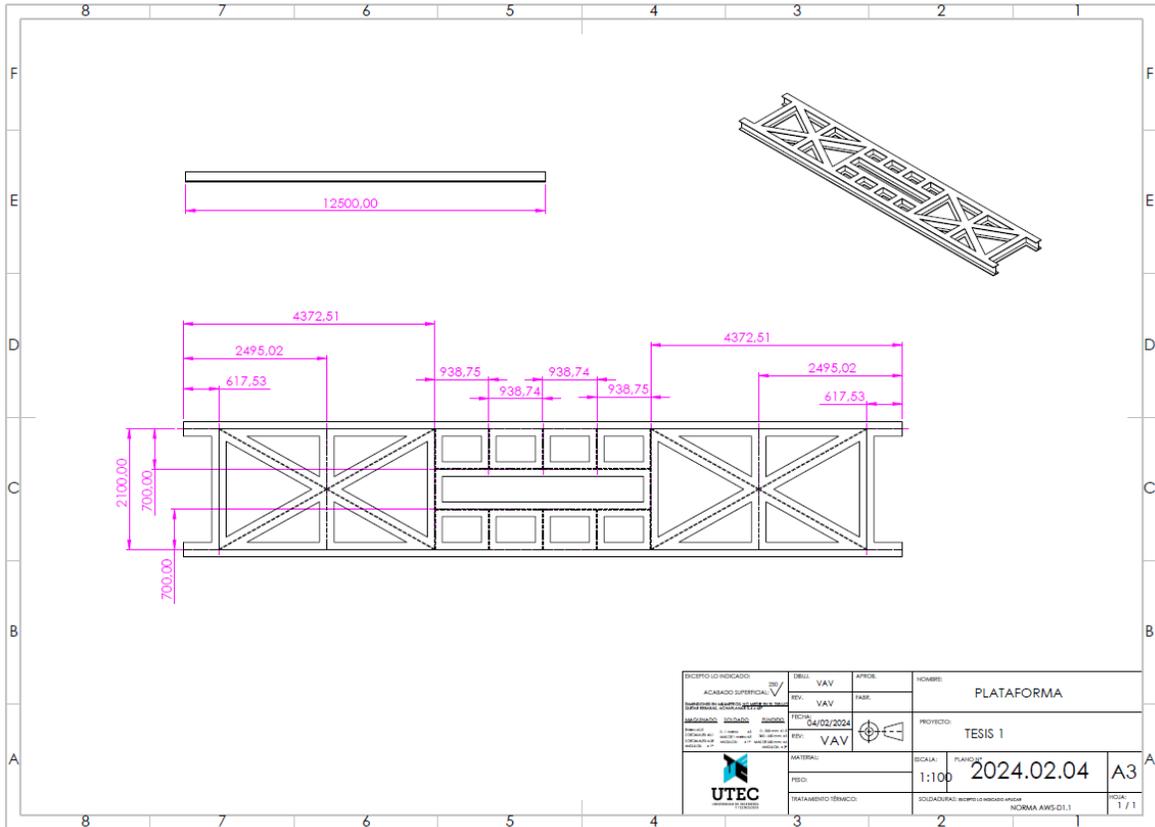


Figura A.14 Diseño estructural de la plataforma en SolidWorks

ANEXO 11: Modelado del sistema plataforma - tanque

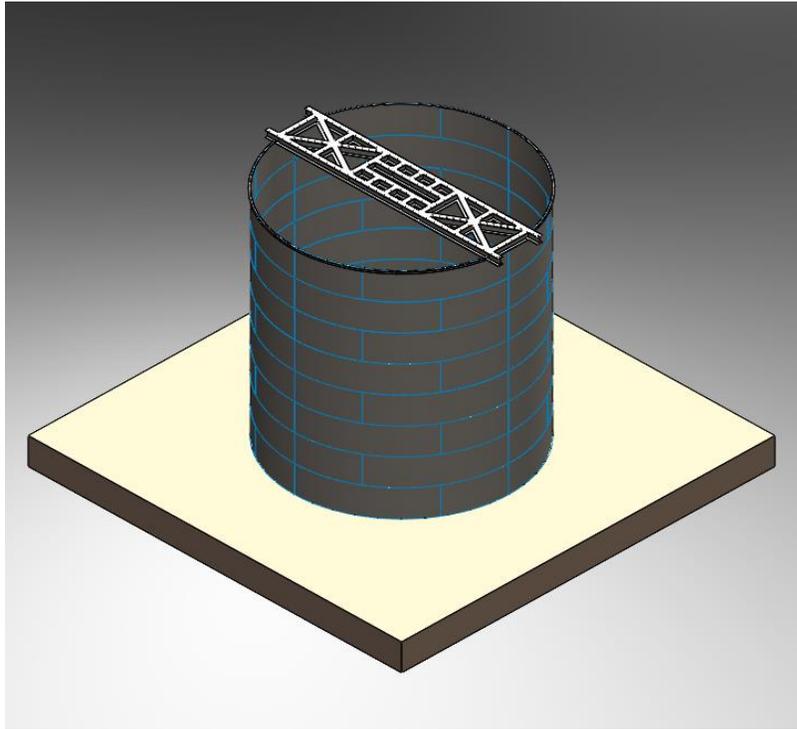


Figura A.15 Presentación de la composición y modelo estructural del tanque y plataforma

ANEXO 12: Análisis de perfil de viga W10x39

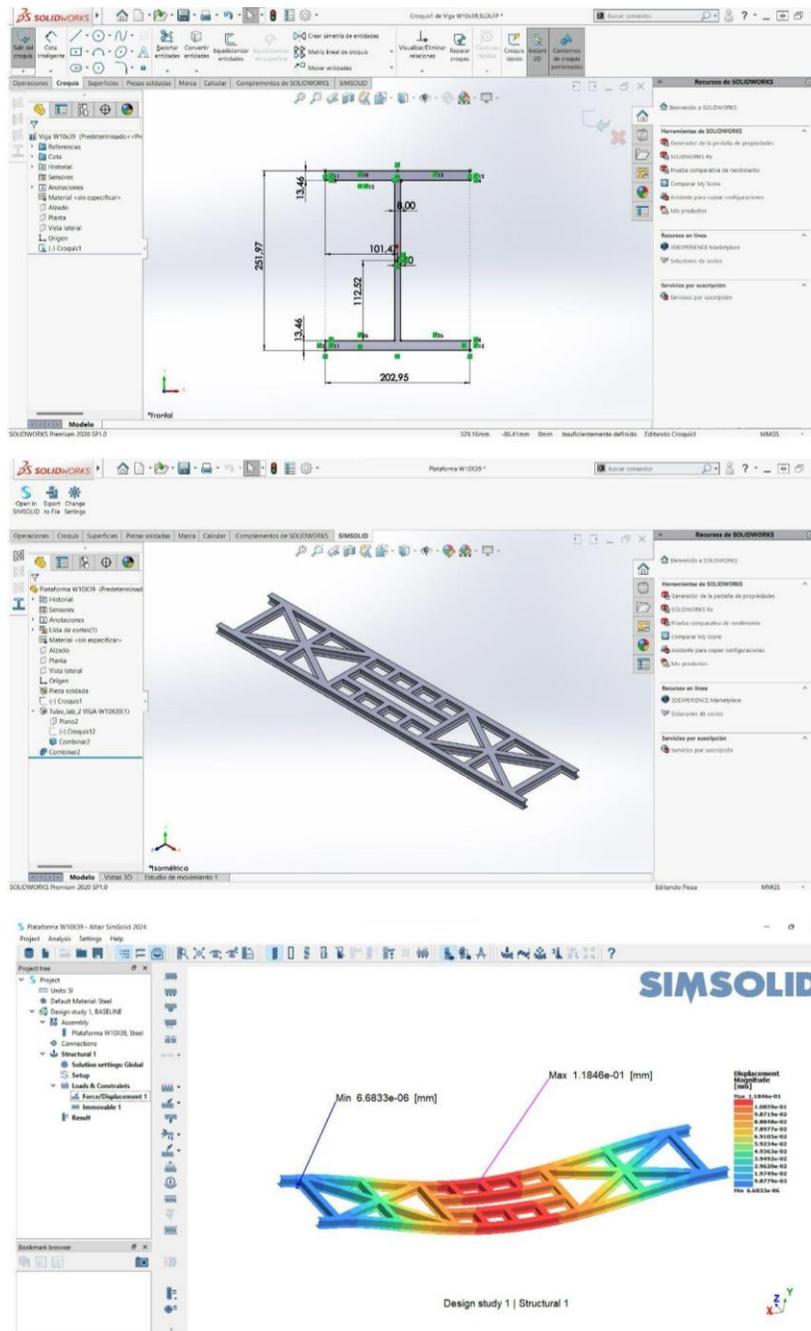


Figura A.16 Diseño de perfil de viga W10x39 en el software SolidWorks. Diseño de plataforma con distribución de vigas igual al de los otros perfiles, se exportó al software SimSolid y se realizó la simulación bajo la carga viva. Se obtiene como resultado una deformación mínima en el extremo de la plataforma con un valor de $6.68e-06$ mm y una máxima de $1.18e-01$ mm en el centro de la plataforma.

ANEXO 13: Análisis de perfil de viga W10x112

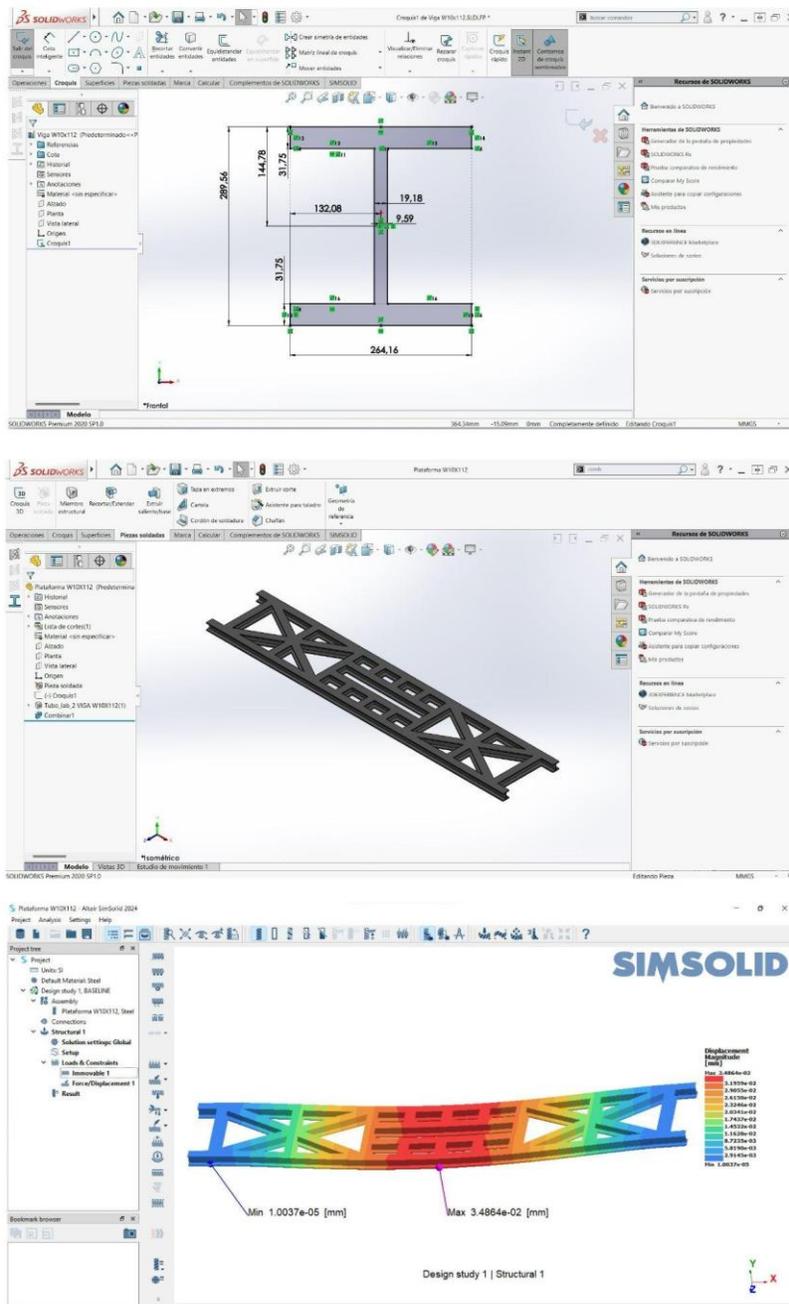


Figura A.17 Diseño de perfil de viga W10x112 en el software SolidWorks. Diseño de plataforma con distribución de vigas igual al de los otros perfiles, se exportó al software SimSOLID y se realizó la simulación bajo la carga viva. Se obtiene como resultado una deformación mínima en el extremo de la plataforma con un valor de 1.0037×10^{-5} mm y una máxima de 3.49×10^{-2} mm en el centro de la plataforma.

ANEXO 14: Análisis de perfil de viga W14x74

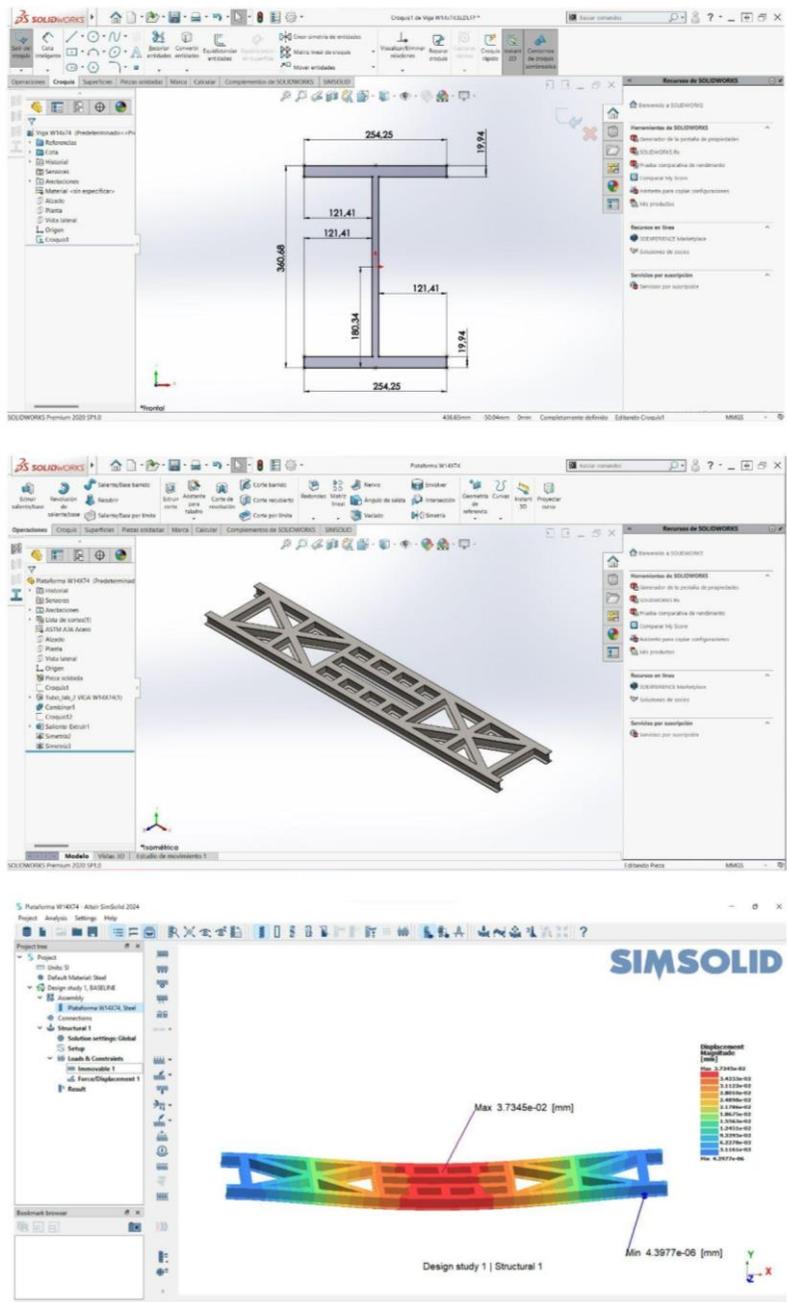


Figura A.18 Diseño de perfil de viga W10x12 en el software SolidWorks. Diseño de plataforma con distribución de vigas igual al de los otros perfiles, se exportó al software SimSolid y se realizó la simulación bajo la carga viva. Se obtiene como resultado una deformación mínima en el extremo de la plataforma con un valor de $1.0037e-05$ mm y una máxima de $3.49e-02$ mm en el centro de la plataforma.

ANEXO 15: Análisis de primera propuesta de diseño con planchas en SimSolid

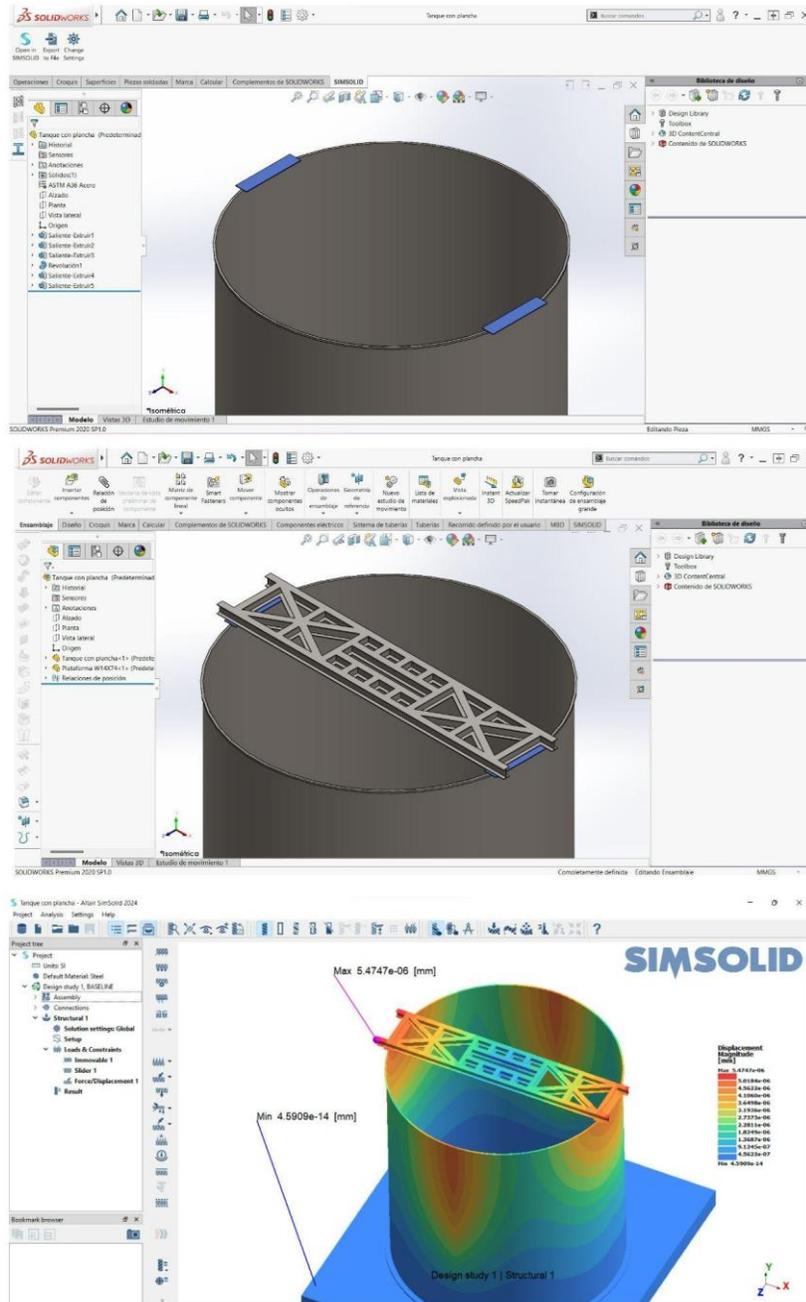


Figura A.19 Diseño de planchas de soporte en el software SolidWorks. Diseño de plataforma y tanque con la plancha como adicional al diseño principal, se exportó al software SimSolid y se realizó la simulación bajo la carga viva. Se obtiene como resultado una deformación mínima en la base del tanque con un valor de $4.5909e-14$ mm y una máxima de $5.4747e-06$ mm en el extremo de la plataforma.

ANEXO 16: Análisis de segunda propuesta de diseño con columnas en SimSolid

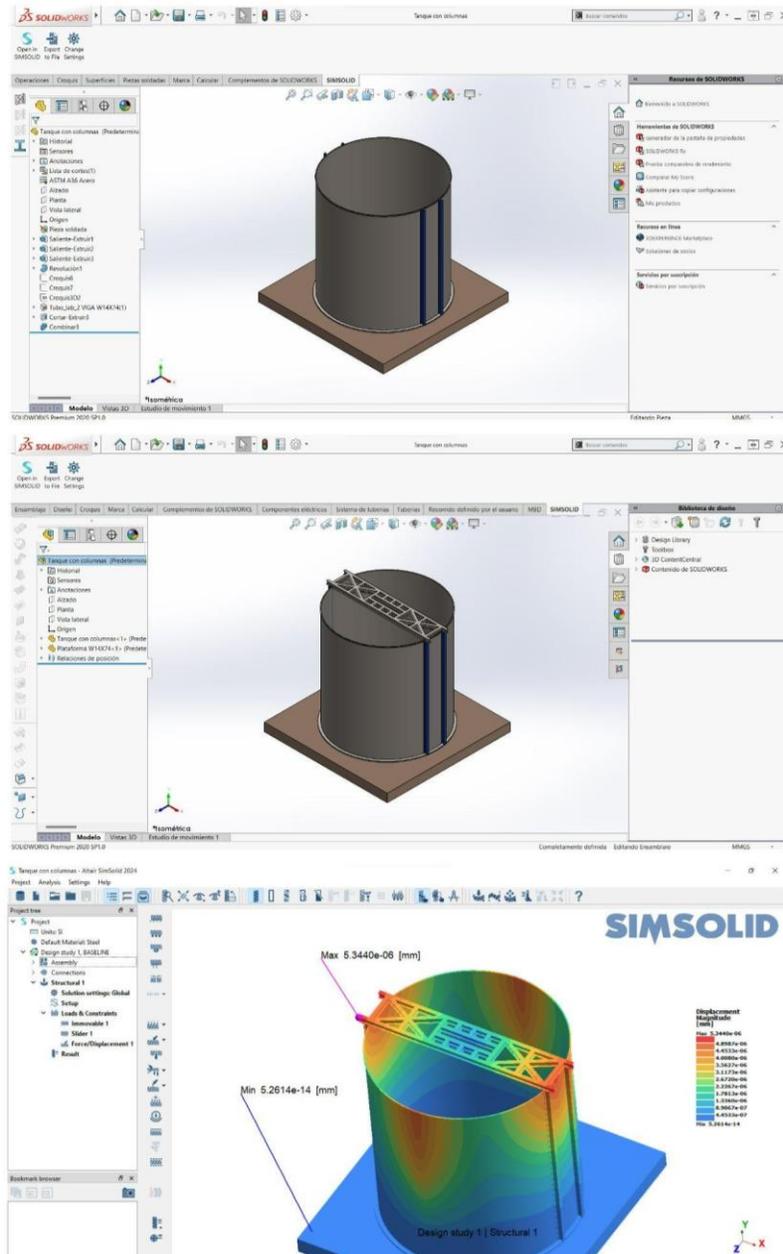


Figura A.20 Diseño de columnas de soporte con el mismo perfil de viga que la plataforma en el software SolidWorks. Diseño de plataforma y tanque con las columnas, se exportó al software SimSolid y se realizó la simulación bajo la carga viva. Se obtiene como resultado una deformación mínima en la base del tanque con un valor de 5.2614×10^{-14} mm y una máxima de 5.344×10^{-6} mm en el extremo de la plataforma.

ANEXO 17: Análisis de tercera propuesta de diseño con refuerzos en SimSolid

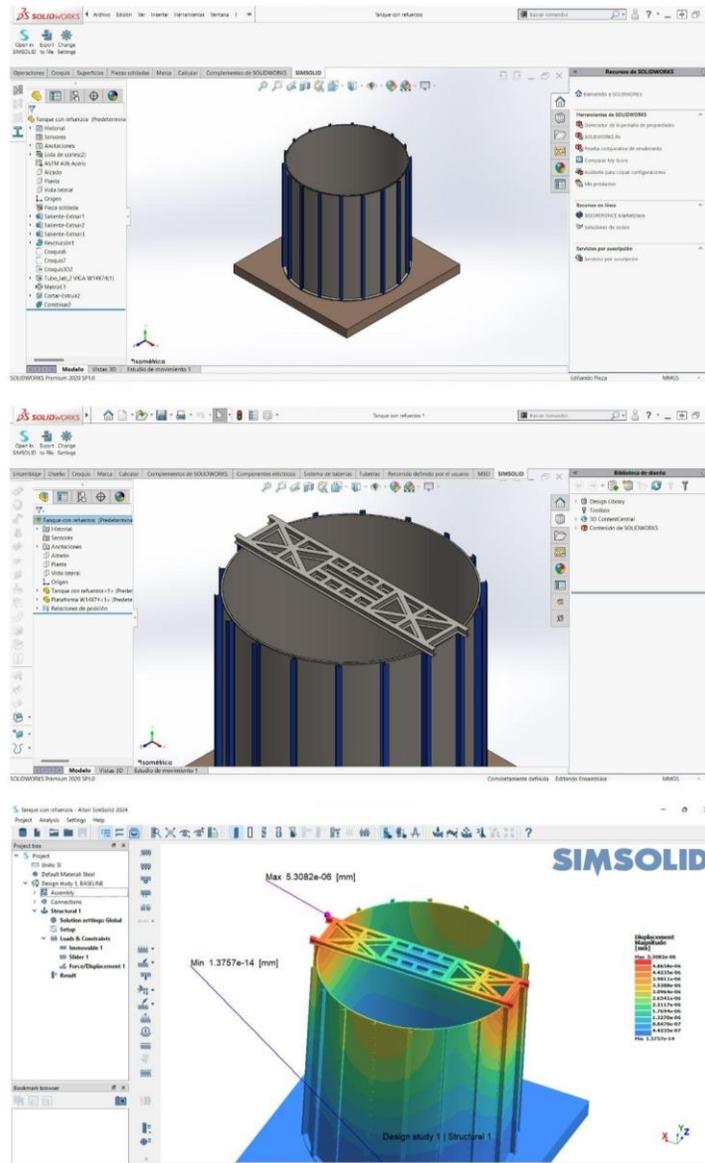


Figura A.21 Diseño de columnas de soporte con el mismo perfil de viga que la plataforma hasta ocupar toda la pared del tanque en el software SolidWorks. Diseño de plataforma y tanque con las columnas, se exportó al software SimSolid y se realizó la simulación bajo la carga viva. Se obtiene como resultado una deformación mínima en la base del tanque con un valor de 1.3757×10^{-14} mm y una máxima de 5.3082×10^{-6} mm en el extremo de la plataforma.

ANEXO 18: Análisis de plataforma con perfil de viga W14x74 en SimSolid

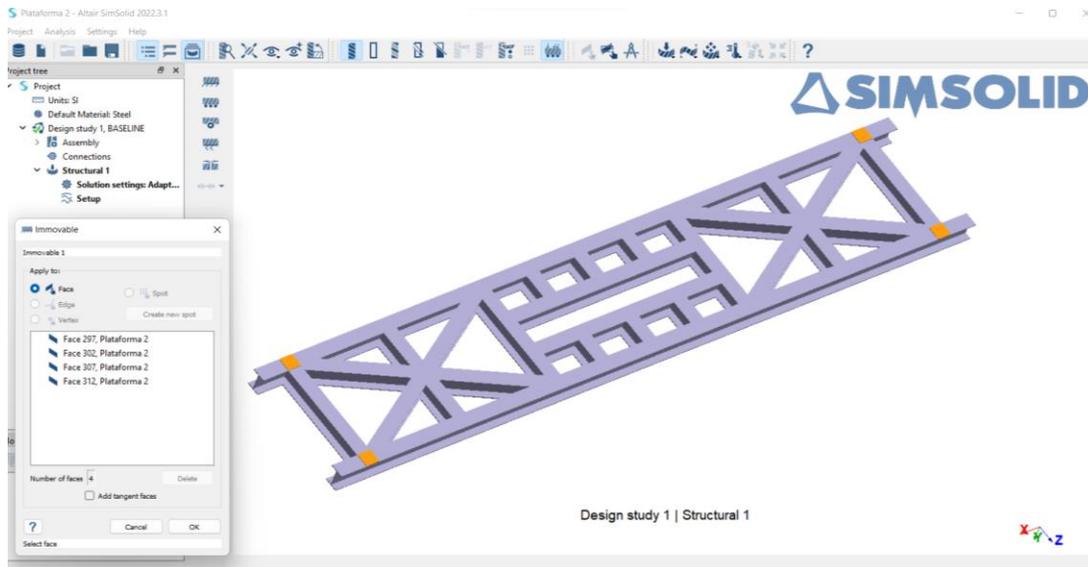


Figura A.22 Definición de tipo de apoyo para la simulación de cargas en la plataforma. Se muestra los pequeños bloques que simulan el espacio donde estaría reposando la plataforma sobre el tanque.

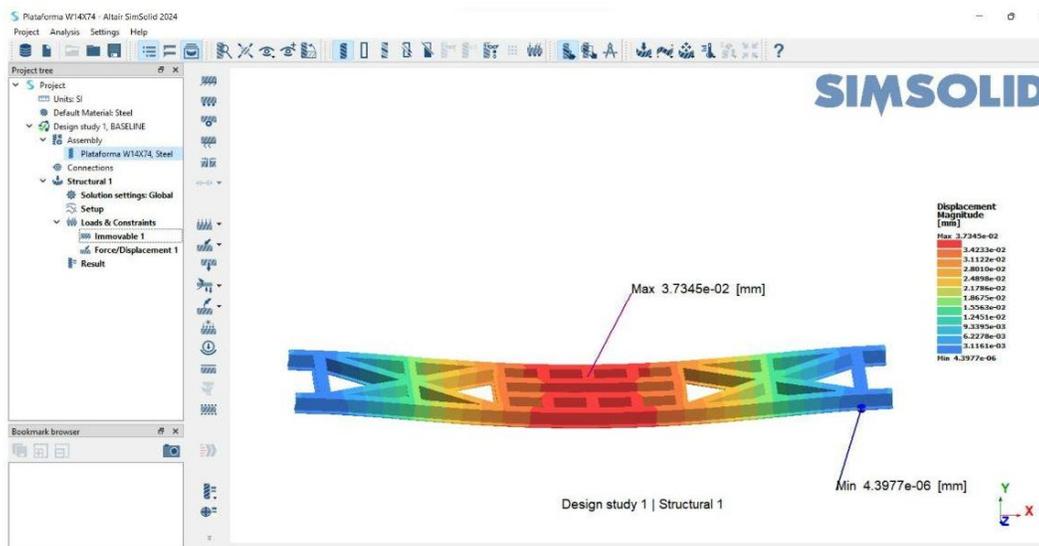


Figura A.23 Resultado de simulación de cargas sobre la plataforma, con un valor de desplazamiento máximo de 3.7345e-02 mm en el centro del elemento simulado.

ANEXO 19: Análisis de sistema plataforma - tanque en SimSolid

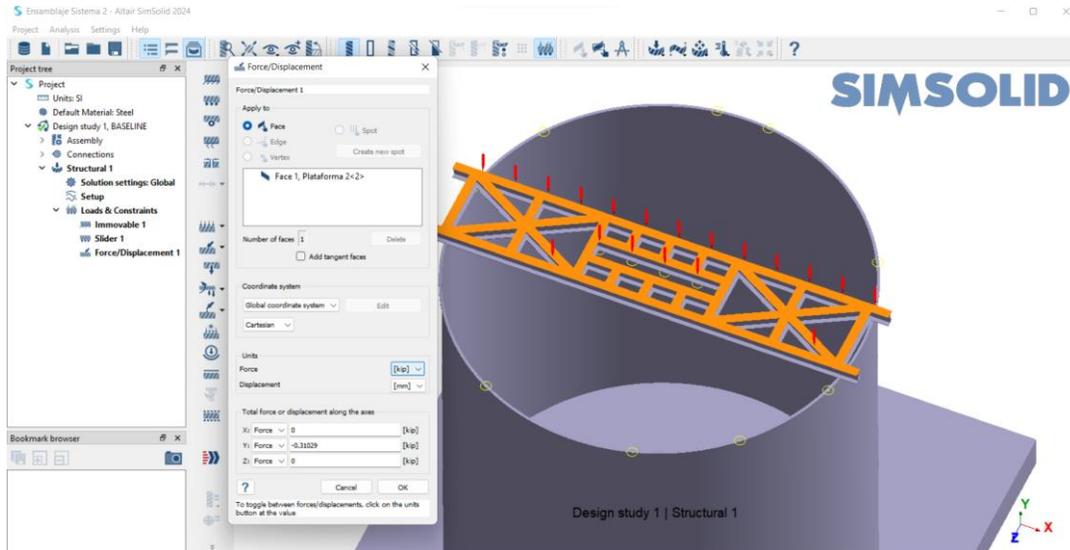


Figura A.24 Definición de apoyos en el sistema plataforma - tanque. La base como apoyo fijo, y el reposo de la plataforma como uno simple con movimiento en X y Y. Toda la plataforma está bajo una carga de -0.31029 kips en el eje Y, considerado como carga viva.

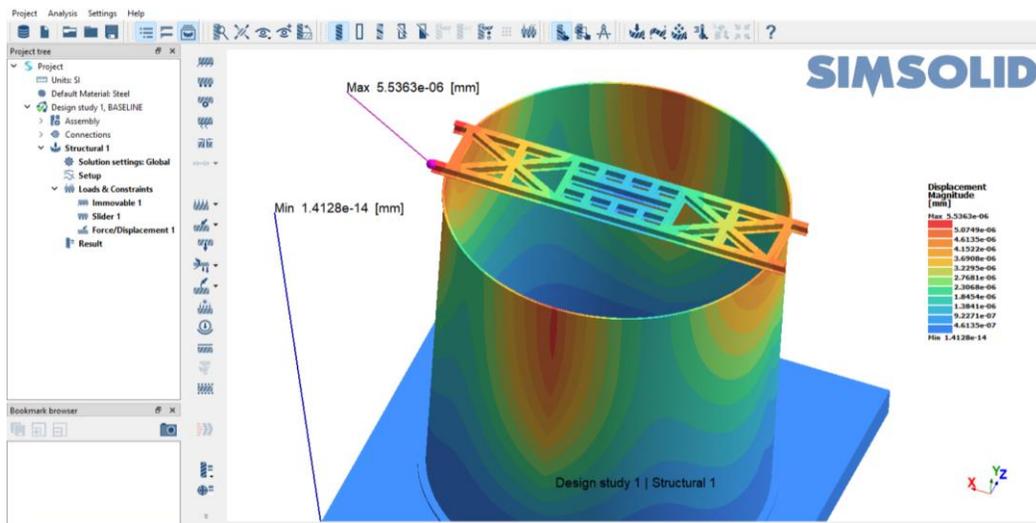


Figura A.25 Resultado de desplazamiento máximo y mínimo de la plataforma y tanque en función a las cargas establecidas.