

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN
SISTEMA TANQUE-PLATAFORMA DE LIXIVIACIÓN DE
3336m³ DE CAPACIDAD**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,
que presenta el bachiller:**

JOSÉ LUIS MÁLAGA ALARCO

ASESOR: Dr. Luis Cotaquispe Zevallos

Lima, Junio del 2014

Resumen:

Cierto grupo de servicios de ingeniería está desarrollando el proyecto minero Inmaculada, el cual consta de una planta concentradora de oro y plata. Este proyecto se encuentra en su etapa de ingeniería. Uno de los procesos de esta planta es la lixiviación, el cual se lleva a cabo en 7 tanques agitadores de 3336 m³ de capacidad, 15.9m de diámetro y 16.8 m de alto. Sobre cada uno de estos tanques se monta una plataforma en la cual se instalará un agitador. Este tipo de diseño tanque-plataforma presenta un riesgo estructural y requiere de una evaluación para asegurar su correcto desempeño.

En el presente trabajo se realizó la evaluación del diseño estructural de un sistema tanque-plataforma usado para un proceso de lixiviación; con la finalidad de garantizar que el conjunto cumpla con las solicitaciones requeridas, tanto en resistencia, servicio y bajo cargas dinámicas. La evaluación se realizó según la normativa aplicable y se empleó para el análisis el Método de los Elementos Finitos (MEF).

La primera parte de esta tesis incluyó condiciones de sitio e información técnica necesaria para la evaluación estructural. Se incluyó también el marco teórico que comprende la metodología ASD (Allowable Stress Design) empleada en el análisis del tanque, el método LRFD (Load and Resistance Factor of Design) utilizado para la evaluación de la plataforma, teoría de vibraciones e información sobre el Método de Elementos Finitos (MEF); y luego se describió un procedimiento general de simulación.

Para el análisis estático del conjunto, se elaboró un modelo conceptual y se modelaron las cargas a las cuales estarán sometidos el tanque y la plataforma. Luego se realizó una evaluación del tanque de acuerdo a la norma API 650; los resultados mostraron que se encontraron elementos sometidos a esfuerzos que superan en un 14% a los esfuerzos admisibles (136 MPa). Posteriormente se realizó una verificación de la plataforma de acuerdo a la AISC 360; en los resultados se observó que la carga no se distribuía uniformemente, ya que una de sus vigas principales soportaba 91% más de carga que la otra. Se realizó también un análisis modal del conjunto para determinar sus frecuencias naturales; y se observó que no presentaría problemas de resonancia. En consecuencia, el diseño original no cumplió los requerimientos de diseño.

Finalmente se realizaron modificaciones al diseño original en las cuales se redujo la concentración de esfuerzos en el tanque. Para la plataforma, se distribuyeron mejor las cargas; con ello se logró reducir el peso de la estructura, y se optimizó el diseño. El análisis modal mostró que el nuevo diseño tampoco entrará en resonancia. En conclusión, aplicando la metodología de diseño y la normativa vigente, el diseño final cumplió con los requerimientos del proyecto.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : EVALUACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN SISTEMA TANQUE-
PLATAFORMA DE LIXIVIACIÓN DE 3336 m³ DE CAPACIDAD

ÁREA : Diseño 254

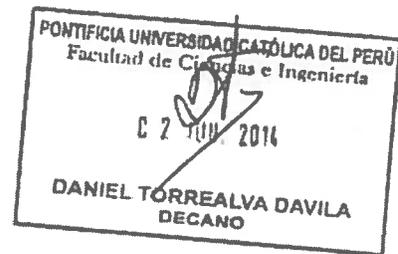
PROPUESTO POR : Dr. Luis Orlando Cotaquispe Zevallos

ASESOR : Dr. Luis Orlando Cotaquispe Zevallos

TESISTA : José Luis Málaga Alarco

CÓDIGO : 20084599

FECHA : 26 de Mayo de 2014



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Un grupo de servicios de ingeniería es el encargado de llevar a cabo el EPC (ingeniería, procura y construcción, por sus siglas en inglés) de la planta concentradora de oro y plata Inmaculada, en la región Ayacucho. Uno de los procesos realizados en la planta es la lixiviación, el cual es un proceso que logra separar el oro y plata de la pulpa mediante una reacción química. La lixiviación se lleva a cabo en un sistema de 7 tanques agitadores de 3336m³ de capacidad, 15.9 m de diámetro y 16.8m de alto cada uno. Los tanques van dispuestos en dos filas con una separación entre ellos de 1.4m; sobre cada tanque va montada una plataforma en la cual se instala un agitador. Esta plataforma transfiere las cargas hacia las paredes del tanque, comprometiendo así su integridad estructural.

El objetivo de este trabajo es realizar una evaluación estructural del conjunto tanque-plataforma, con la finalidad de asegurar un funcionamiento correcto y seguro que cumpla con los requerimientos de diseño. Se realizará una evaluación del conjunto por resistencia, servicio y se realizará un análisis dinámico. Para ello se deberán modelar las cargas (viva, muerta, vientos, sismos, etc.) y posteriormente se analizarán los efectos que generen estas sobre el conjunto. Para la evaluación estructural de la plataforma se utilizará el método Load and Resistance Factor of Design (LRFD), este método plantea combinaciones de carga límite que podría soportar la estructura. Para la evaluación del tanque se tomará como base la norma API 650: Welded tanks for oil storage. Debido a la complejidad de la estructura, se utilizará el método de los elementos finitos (MEF) para su evaluación. Esta evaluación se realizará utilizando el software ANSYS; se tomará en consideración el correcto mallado, modelamiento de cargas, geometría y condiciones de borde del sistema.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

EVALUACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN SISTEMA TANQUE-PLATAFORMA DE
LIXIVIACIÓN DE 3336 m³ DE CAPACIDAD

Introducción

1. Definiciones y marco teórico
2. Procedimiento general de simulación
3. Análisis estático del conjunto
4. Análisis dinámico del conjunto
5. Modificaciones a la estructura

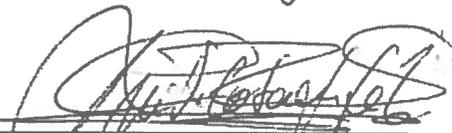
Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas



Dr. Luis Cotaquispe Zevallos

Asesor





Dedico este trabajo a mi familia, quienes me apoyaron todos estos años.
En especial a mi Madre que día a día se preocupaba por brindarme su apoyo.

A mi Padre, Andrea, Herbert, que depositaron su confianza en mí.
A mis abuelos, tíos y primos que siempre me alentaban a seguir adelante.

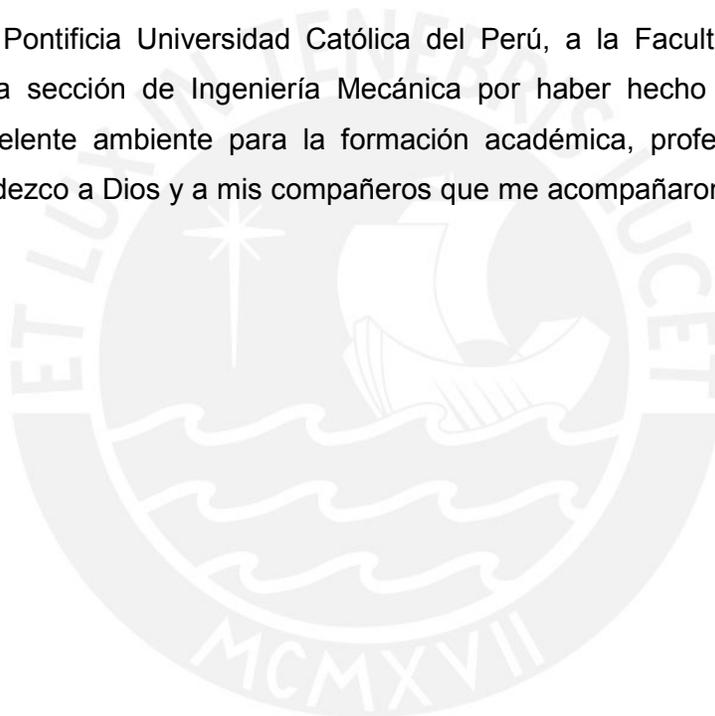
A Fiorella que me enseñó que jamás debo rendirme.

A mis compañeros de amanecidas de tesis, Preciosa y Platón.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que me acompañaron durante mi formación universitaria. Agradezco a mi familia por haberme formado en valores. Agradezco a los profesores de la sección de Ingeniería Mecánica por la formación académica brindada. Un agradecimiento especial al Dr. Luis Cotaquispe Zevallos por el apoyo y la asesoría brindada que permitieron conseguir este logro; esperando que siga manteniendo su estilo de enseñanza. Asimismo, agradezco al Ing. Adelmo Rodríguez, por su buena disposición para poder revisar este trabajo y por la asesoría brindada en el trabajo.

Agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Perú, a la Facultad de Ciencias e Ingeniería y a la sección de Ingeniería Mecánica por haber hecho de esta casa de estudios un excelente ambiente para la formación académica, profesional y humana. Finalmente agradezco a Dios y a mis compañeros que me acompañaron en esta etapa de la vida.



INDICE

| | |
|--|----------|
| Aprobación de formato de tesis | i |
| Resumen | iii |
| Índice de contenido | v |
| Introducción | 1 |
| Capítulo 1: Definiciones y marco teórico | 4 |
| 1.1. Sobre el proyecto | 4 |
| 1.1.1. Ubicación | 4 |
| 1.1.2. Condiciones geográficas | 4 |
| 1.1.3. Producción | 5 |
| 1.1.4. Sobre el área de lixiviación | 6 |
| 1.2. Conceptos fundamentales. | 7 |
| 1.2.1. Lixiviación | 7 |
| 1.2.2. Agitación | 7 |
| 1.2.3. Lixiviación en tanques agitadores | 9 |
| 1.3. Definición de cargas. | 11 |
| 1.3.1. Carga muerta | 11 |
| 1.3.2. Carga viva | 11 |
| 1.3.3. Carga viva en la plataforma | 11 |
| 1.3.4. Carga sísmica | 11 |
| 1.3.5. Carga de vientos | 13 |
| 1.3.6. Carga de nieve | 14 |
| 1.3.7. Cargas dinámicas | 14 |
| 1.4. Formas constructivas. | 14 |
| 1.4.1. Del tanque. | 14 |
| 1.4.2. De la plataforma. | 18 |
| 1.5. Método ASD aplicado al análisis del tanque | 19 |
| 1.5.1. Diseño | 20 |
| 1.5.2. Combinaciones de carga | 23 |
| 1.5.3. Diseño sísmico | 24 |
| 1.6. Método LRFD aplicado al análisis de la plataforma | 26 |
| 1.6.1. Definición | 26 |
| 1.6.2. Combinaciones de carga | 27 |
| 1.6.3. Factores de resistencia | 27 |
| 1.6.4. Uniones | 28 |
| 1.6.5. Propiedades de los elementos | 29 |
| 1.7. Vibraciones mecánicas. | 29 |
| 1.7.1. Definición | 29 |
| 1.7.2. Solución de sistemas de 1GDL | 30 |
| 1.7.3. Solución de problemas de n GDL | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 1.7.4. Análisis dinámico aplicado al conjunto | 33 |
| 1.8. Método de elementos finitos. | 34 |
| 1.8.1. Definiciones | 34 |
| 1.8.2. Fundamentos del MEF | 35 |
| 1.8.3. Etapas en la aplicación del MEF para el análisis estructural | 35 |
| Capítulo 2: Procedimiento general de simulación | 37 |
| 2.1. Definición del problema | 37 |
| 2.2. Modelo Geométrico | 37 |
| 2.2.1. Modelo simplificado | 38 |
| 2.3. Mallado | 40 |
| 2.3.1. Elementos BEAM | 40 |
| 2.3.2. Elementos Shell | 40 |
| 2.3.3. Conjunto mallado | 41 |
| 2.3.4. Calidad de malla | 41 |
| 2.4. Condiciones de borde | 43 |
| 2.5. Solución | 44 |
| 2.6. Post-procesamiento | 44 |
| 2.6.1. Análisis estático del tanque | 44 |
| 2.6.2. Análisis estático de los perfiles estructurales | 45 |
| 2.6.3. Análisis dinámico | 45 |
| 2.6.4. Contraste teórico de los resultados | 45 |
| Capítulo 3: Análisis estático del conjunto | 46 |
| 3.1. Modelo conceptual de la estructura | 46 |
| 3.1.1. Representación conceptual del tanque | 46 |
| 3.1.2. Representación conceptual de la plataforma | 48 |
| 3.2. Modelado de cargas | 51 |
| 3.2.1. Carga Muerta (D) | 51 |
| 3.2.2. Carga Viva (L) | 52 |
| 3.2.3. Carga viva en la plataforma (Lp) | 55 |
| 3.2.4. Carga de nieve (S) | 56 |
| 3.2.5. Carga de viento (W) | 56 |
| 3.2.6. Presión del fluido (F) | 57 |
| 3.2.7. Presión hidrostática de prueba (Ht) | 57 |
| 3.2.8. Carga sísmica (E) | 57 |
| 3.3. Análisis estático del tanque | 61 |
| 3.3.1. Caso 1: D+F+L+Lp | 61 |
| 3.3.2. Caso 2: D+W | 63 |
| 3.3.3. Caso 3: D+F+L+Lp+Ex | 64 |
| 3.3.4. Caso 4: D+F+L+Lp+Ez | 65 |
| 3.4. Análisis estático de la plataforma | 67 |
| 3.4.1. Caso 1: 1.4D | 68 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.2. Caso 2: 1.2D+1.6L+0.5Lp | 70 |
| 3.4.3. Caso 3: 1.2D+1.6Lp + L | 71 |
| 3.4.4. Caso 4: 1.2D+Ex+L | 73 |
| 3.4.5. Caso 5: 1.2D+Ez+L | 74 |
| 3.4.6. Caso 6: 0.9D+Ex | 75 |
| 3.4.7. Caso 7: D+Ez | 76 |
| 3.4.8. Desplazamientos y deflexiones | 77 |
| 3.4.9. Análisis de resultados | 78 |
| Capítulo 4: Análisis dinámico del conjunto | 80 |
| 4.1. Modelo dinámico del conjunto | 80 |
| 4.2. Frecuencias de excitación del sistema | 83 |
| 4.3. Análisis modal con el método de elementos finitos | 84 |
| 4.3.1. Primer modo de vibración (4.4338 Hz) | 84 |
| 4.3.2. Segundo modo de vibración (f=4.5159 Hz) | 84 |
| 4.3.3. Tercer modo de vibración (f=6.5101 Hz) | 85 |
| 4.3.4. Cuarto modo de vibración (f= 9.4209 Hz) | 85 |
| 4.3.5. Quinto modo de vibración (f= 9.4412 Hz) | 85 |
| 4.3.6. Sexto modo de vibración (f= 10.432Hz) | 86 |
| 4.4. Análisis de resultados | 86 |
| Capítulo 5: Modificaciones a la estructura | 87 |
| 5.1. Estructura modificada | 87 |
| 5.1.1. No conformidades observadas | 87 |
| 5.1.2. Estructura modificada | 87 |
| 5.2. Análisis estático del tanque | 88 |
| 5.2.1. Caso 1: D+F+L+Lp | 89 |
| 5.2.2. Caso 3: D+F+L+Ex | 90 |
| 5.3. Análisis estático de la plataforma | 91 |
| 5.3.1. Caso más crítico: 1.2D+1.6L+0.5Lp | 91 |
| 5.3.2. Desplazamientos | 93 |
| 5.4. Análisis modal del conjunto: | 93 |
| 5.4.1. Primer modo (f=4.1712Hz) | 93 |
| 5.4.2. Segundo modo (f=4.7932 Hz) | 94 |
| 5.4.3. Tercer modo (f=5.6155 Hz) | 94 |
| 5.5. Análisis de resultados | 95 |
| Conclusiones | 96 |
| Recomendaciones | 98 |
| Bibliografía | 99 |

Anexos

| | |
|---|-----|
| Anexo A: Cálculo de parámetros sísmicos para el tanque según API 650 | I |
| A.1. Grupo de uso sísmico | I |
| A.2. Parámetros de movimiento del terreno | I |
| A.3. Periodo estructural de vibración | III |
| A.4. Aceleraciones espectrales de diseño | IV |
| A.5. Masas impulsiva y convectiva | V |
| A.6. Determinación de esfuerzos admisibles | VI |
| Anexo B: Determinación de estados límites de resistencia | VII |
| B.1. Propiedades de la sección | VII |
| B.2. Estado límite de elementos sometidos a flexión | X |
| B.3. Estado límite de elementos sometidos a corte | XIV |
| B.4. Estado límite de elementos bajo esfuerzos combinados | XV |
| B.5. Estado límite para las uniones atornilladas | XV |
| Anexo C: Especificaciones técnicas del agitador | |
| Anexo D: Planos del diseño preliminar | |
| Anexo E: Planos del diseño modificado | |

Introducción

La minería es un proceso de extracción y selección de materiales de la corteza terrestre. Es una actividad económica primaria la cual extrae minerales para obtener un beneficio económico. En el Perú, la minería representa más del 50% de las exportaciones del país; esta genera no solo bienes, sino también trabajo, regalías como canon minero y proyectos de desarrollo social orientados a generar valor agregado en las comunidades aledañas. Es debido a ello que actualmente es la principal actividad económica del Perú.

Como proceso productivo, la minería se divide en etapas. La etapa extractiva extrae mineral de la corteza, se utilizan explosivos y equipos de remoción de tierras; luego el material es transportado a una planta concentradora, sea por fajas transportadoras, camiones u otro medio de transporte. Dentro de la planta, el material pasará por distintas etapas siendo la primera la trituración o chancado, seguida por la molienda. A continuación seguirán etapas de separación gravimétrica y luego etapas de separación por medios químicos o electro químicos, una vez obtenido el metal puro este se fundirá para obtener lingotes del mineral o compuesto de los minerales para ser refinados.

En la minería aurífera uno de los procesos químicos comúnmente utilizados es la cianuración o lixiviación. Este proceso separa el oro y la plata, que se encuentra en estado sólido formando parte de la pulpa, mediante una reacción química para obtener una solución acuosa que contenga estos minerales. Esta solución, luego de ser espesada pasará a un proceso mundialmente aplicado conocido como Merrill-Crowe.

El proceso de lixiviación se realiza para bajas leyes de oro y plata en pilas de mineral (fig. I.1.a) donde se agregan químicos en la superficie mediante aspersores y se recolecta la solución rica en la parte inferior. Para leyes mayores se realiza en sistemas de tanques agitadores (fig. I.1.b) los cuales de manera continua llevan a cabo la reacción química y en etapas posteriores se separa la solución acuosa que contiene los metales preciosos.

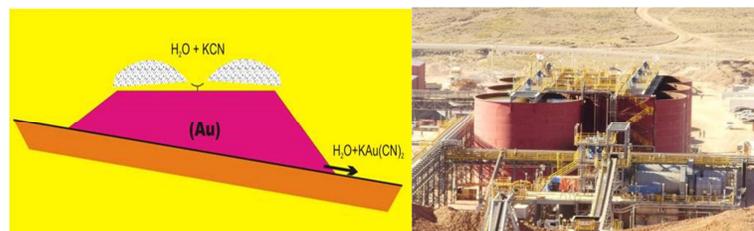


Figura I.1. a) Esquema de lixiviación en pilas, **b)** Lixiviación en tanques agitadores

Para la lixiviación en tanques agitadores, se emplean tanques soldados de acero diseñados mediante la norma API 650: Welded tanks for Oil Storage [API, 2010]. Se requiere de un agitador que mueva la mezcla a fin de mantener en suspensión las partículas de la pulpa y acelerar la velocidad de la reacción. Este equipo es instalado en una plataforma ubicada encima del tanque. Dependiendo del diseño esta plataforma podrá estar montada sobre el tanque o ser parte de una estructura independiente.

El proyecto minero Inmaculada comprende el diseño y construcción de una planta concentradora de oro y plata. Esta planta tendrá un área de lixiviación formada por 7 tanques agitadores de igual capacidad; los cuales se comunicarán entre ellos mediante canaletas de alimentación y descarga, y consecuentemente se requiere una pendiente para poder transportar la pulpa. Debido a ello los tanques no podrán estar muy separados, ya que esto significaría un mayor desnivel en el terreno para tener la misma pendiente en los canales. En esta ocasión, debido al poco espacio entre tanques se optó por montar cada plataforma, y su agitador, sobre un tanque como un solo conjunto.

Este tipo de diseño requiere una evaluación estructural, debido a que por su naturaleza presenta un riesgo técnico, ya que el conjunto no solo estará sometido a cargas estáticas, sino también a cargas dinámicas. Este tipo de cargas no están consideradas en los estándares de la norma mencionada; la cual recomienda realizar evaluaciones especiales para casos particulares como las cargas concentradas ocasionadas por la plataforma [API, 2010]. De presentarse una falla estructural; esto detendrá la producción de la planta la cual, según las leyes de cabeza nominales de 3.4 g/t de oro y 120g/t, equivale a 544 gramos de oro y 19200 gramos de plata por hora. Debido a la importancia de cada sistema tanque-plataforma en el área de lixiviación, se justifica económicamente y técnicamente realizar un análisis estructural del conjunto.

El objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo son los siguientes:

Objetivo general

- Realizar una evaluación del diseño estructural del conjunto tanque-plataforma, aplicando conceptos de ingeniería, según la normativa vigente y empleando para el cálculo el método de los elementos finitos (MEF); con la finalidad de garantizar un funcionamiento seguro.

Objetivos específicos

- Recopilar información técnica sobre el proyecto y establecer el marco teórico para realizar la evaluación estructural; este debe comprender: conceptos fundamentales, metodologías de diseño aplicadas al tanque y a la plataforma, teoría de vibraciones e información sobre el método de los elementos finitos.
- Establecer una metodología para llevar a cabo la simulación. Esta metodología debe comprender: definición del problema, modelado de la geometría, mallado, definición de condiciones de borde, solución y manejo de resultados.
- Definir el modelo conceptual y el modelo geométrico en base a las consideraciones asumidas y al alcance propuesto.
- Definir las cargas aplicadas al conjunto, para ello se tomará en cuenta la información técnica y la normativa vigente.
- Realizar la evaluación estática del conjunto tanque-plataforma. Para realizar las verificaciones correspondientes se tomará la norma API 650 [API, 2010] para evaluar el tanque y la norma AISC 360 [AISC, 2010] para el análisis de la plataforma.
- Realizar un análisis dinámico del sistema para verificar que no falle debido a cargas dinámicas.
- Comprobar de manera analítica que los resultados obtenidos por el MEF son confiables y válidos, garantizando que el error se encuentre dentro de márgenes admisibles.
- Realizar modificaciones al diseño original de presentarse no conformidades en las evaluaciones.

El primer capítulo de esta tesis resume información técnica necesaria y también el marco teórico requerido. El segundo capítulo describe el procedimiento general de simulación y sus respectivas etapas. El tercer capítulo desarrolla la evaluación estática del conjunto; se desarrolla el modelo conceptual, se modelan las cargas y se realizan las verificaciones según la normativa aplicable. En el cuarto capítulo se desarrolla el análisis modal del conjunto para garantizar que no se presenten condiciones de resonancia. Debido a que se presentaron no conformidades en la evaluación, en el último capítulo se realizan modificaciones al diseño original y se verifica que se cumplan todos los requerimientos de diseño.

Capítulo 1: Definiciones y marco teórico

1.1. Sobre el proyecto

En el Perú actualmente se llevan desarrollando diversos proyectos para el sector minero, unos en su etapa de otros y otros en su etapa de construcción. Uno de estos proyectos es el proyecto minero Inmaculada, el cual se encuentra actualmente en el cierre de su etapa de ingeniería. El proyecto consta de una mina subterránea y de una planta de concentradora de oro y plata; y adicionalmente edificios complementarios tales como oficinas administrativas, almacenes, instalaciones de mantenimiento, etc.

1.1.1. Ubicación

El proyecto se ubica en el distrito de Oyolo en las provincias de Parinacochas y Paucar del Sara Sara, en la Región de Ayacucho. El proyecto se encuentra aproximadamente a 160 km de la provincia de Huamanga y a 210 km de la provincia de Cusco. Los parámetros de ubicación de área se muestran a continuación (tabla 1.1). La figura 1.1 muestra un mapa de la ubicación del sitio.

Tabla 1.1 Ubicación del proyecto

| Datos de ubicación del terreno | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Departamento | Ayacucho |
| Capital regional | Huamanga |
| Provincia | Parinacochas/Paucar del Sara Sara |
| Latitud | 14° 57' 27'' Sur |
| Longitud | 73° 14' 42'' Oeste |
| Elevación del área (m s.n.m.) | 3900-4800 |

1.1.2. Condiciones geográficas.

Los datos climatológicos han sido tomados del Informe de campo del Estudio Hidrológico – Hidrogeológico para el proyecto minero. Para la ubicación del proyecto se muestran a continuación en la tabla 1.2 las siguientes condiciones geográficas las cuales deberán ser tomadas en cuenta, de ser necesario, como condiciones de diseño en la evaluación estructural.



Figura 1.1 Ubicación del proyecto (X)

Tabla 1.2 Condiciones geográficas

| Condiciones geográficas de sitio | | |
|----------------------------------|----------|-------|
| Parámetro | Unidades | Valor |
| Presión atmosférica | kPa | 55 |
| Temperatura mínima | °C | -9 |
| Temperatura máxima | °C | 22 |
| Rango de temperatura promedio | °C | 1.7-5 |
| Precipitación promedio | mm/año | 932 |
| Precipitación máxima | mm/mes | 216 |
| Precipitación máxima 24 horas | mm/día | 60 |
| Velocidad máxima del viento | km/h | 65 |
| Velocidad de diseño del viento | km/h | 75 |
| Factor sísmico | g | 0.4 |
| Carga de nieve | kPa | 0.4 |

1.1.3. Producción

El producto de la planta concentradora son las barras Doré, las cuales son una aleación semi-pura de plata y oro. La planta de procesamiento comprende las áreas de chancado, molienda, lixiviación, decantación en contra corriente (CCD), Merrill-Crowe y planta doré. Así como instalaciones de almacenamiento de reactivos, combustibles y servicios de planta. La planta de procesamiento está diseñada para tratar 1'279,661 toneladas de mineral por año funcionando en promedio 20 horas al día los 365 días del

año, lo que equivale a una producción de aproximadamente 200t/h. Bajo estas condiciones se definió que la vida de diseño de la planta es de 7 años.

1.1.4. Sobre el área de lixiviación

El área de lixiviación dentro de la planta estará conformada por 7 tanques agitadores de 3336m³ de capacidad cada uno. La figura 1.2 muestra el arreglo que tendrán los tanques en esta área y dentro de la planta concentradora. La tabla 1.3 muestra características del sistema. Como se observa en la figura, sobre los tanques va montada una plataforma la cual soporta al agitador, el cual va instalado en la estructura. Es importante mencionar que cada conjunto tanque-plataforma es independiente uno de otro, de manera que no se transmiten cargas ente ellos.

Tabla 1.3 Características del área de lixiviación

| Área de lixiviación | | |
|-------------------------------------|----------------|---|
| Parámetro | Unid | Cantidad / Característica |
| Numero de tanques | | 7 |
| Capacidad de tanques | m ³ | 3336 |
| Diámetro de los tanques | m | 15.9 |
| Altura de los tanques | m | 16.8 |
| Material de los tanques | | ASTM A36 M |
| Tiempo de residencia de lixiviación | h | 96 |
| Tiempo de residencia por tanque | h | 13.7 |
| Tipo de recipiente | | Atmosférico, agitado, inyección de O ₂ |
| Transferencia entre etapas | | En cascada |
| Porcentaje de sólidos en pulpa | % | 50 |
| Gravedad específica de pulpa | | 1.44 |
| Concentración de cianuro | ppm | 1500 |
| Tipo de agitador | | Flujo axial |
| Velocidad del agitador | rpm | 20 |
| Potencia del equipo | HP | 150 |

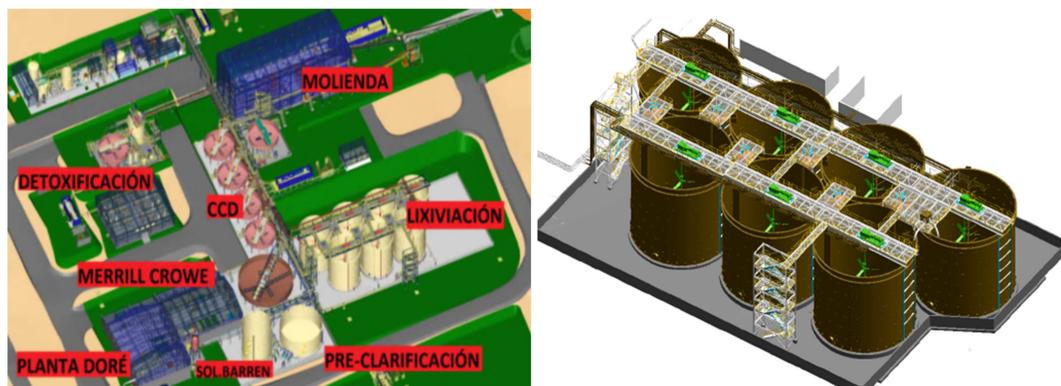
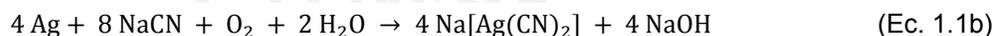


Figura 1.2 Vista 3D de la planta concentradora (izq.) y área de lixiviación (der.)

1.2. Conceptos fundamentales

1.2.1. Lixiviación

En la minería aurífera la lixiviación es un proceso químico de separación del oro y la plata de una pulpa. La pulpa ingresa con el oro y la plata mezclado con material del subsuelo en suspensión; se agregan cianuro de sodio y oxígeno para reaccionar con los sólidos en suspensión, de esta manera se obtiene una solución acuosa de oro y plata. La reacción química aceptada para este proceso es la ecuación de Elsner (Ec. 1.1a y b):



Estas son las reacciones químicas para el oro y la plata respectivamente. Como se aprecia se debe agregar Cianuro de sodio y oxígeno para llevar a cabo la reacción. Algunos factores importantes en la reacción son:

- **Efecto del oxígeno:** Su presencia acelera la velocidad de la reacción.
- **Tamaño de partícula:** A menor tamaño mayor área superficial. Por ello las partículas en suspensión salen del área de molienda con un diámetro de 50 μm .
- **Temperatura:** A mayor temperatura mayor velocidad de reacción. Sin embargo el cianuro tiende a evaporarse. Por ello se trabajará a temperatura ambiente.

1.2.2. Agitación

Se denomina agitación al movimiento inducido en un fluido. Los agitadores son muy utilizados en las industrias química, minera, alimentaria, entre otras [MYT, 2013]. Dependiendo de los objetivos de la etapa de procesos, los fluidos se agitan con diversos fines como: suspensión de partículas sólidas, realizar reacciones químicas, mezclar líquidos miscibles, etc.

El fluido se agita por lo general en tanques cilíndricos, con el eje del agitador en posición vertical. El fluido será movido por un impulsor, también conocido como *impeller*. Existen distintos tipos de *impeller*, que se clasifican básicamente en 2 grupos:

- **Impulsor de flujo radial:** El flujo es impulsado en un plano perpendicular al eje del *impeller* en dirección radial (fig. 1.5). Los impulsores comúnmente utilizados son de paletas sin inclinación, los cuales son sencillos de construir (fig. 1.3). Se requieren deflectores en el tanque para direccionar el flujo. La velocidad de operación es baja.



Figura 1.3 Agitador de palas rectas

- **Impulsor de flujo axial:** El flujo es impulsado axialmente de manera paralela al eje del *impeller* (fig. 1.5). Los impulsores comúnmente utilizados son los de hélice o de paletas inclinadas (fig. 1.4). No son necesarios deflectores en las paredes del tanque, sin embargo estos ayudan a evitar la vorticidad del flujo. Para impulsores de hélice, la velocidad de operación es moderada; para paletas inclinadas es baja.



Figura 1.4 Impulsor de paletas inclinadas (izq.) y hélice (der.)

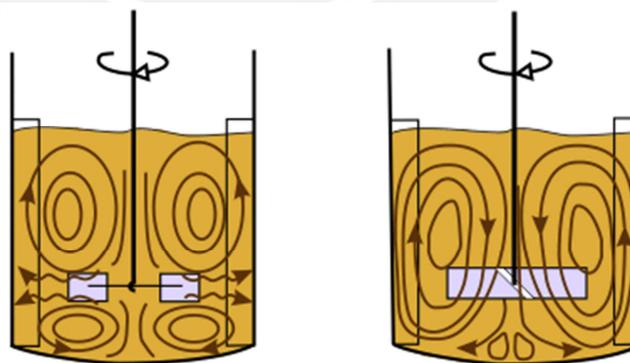


Figura 1.5 Diferencias entre patrón de flujo radial (izq.) y axial (der.)

Para este proyecto se empleará un agitador de paletas inclinadas de flujo axial. El tipo de agitador influirá directamente en la carga que soportará la plataforma. En este caso debido a las cargas del agitador se tratará de una carga axial.

1.2.3. Lixiviación en tanques agitadores

En relación a lo mencionado anteriormente se establecieron las características del tanque de lixiviación. La tabla 1.4 muestra las características de un equipo del fabricante SPX-LIGHTNIN. La tabla 1.5 muestra características del tanque, el cual requiere boquillas de alimentación para el ingreso de la pulpa, cal, oxígeno, cianuro de sodio y de descarga para salida de la solución, y drenaje del tanque.

Tabla 1.4 Características del agitador

| Características del agitador | | |
|---|-----------------------------|---------------|
| Parámetro | Valor/Característica | Unidad |
| Impeler | | |
| Tipo | Axial | |
| Número por agitador | 2 | |
| Número de paletas/impeler | 3 | |
| Diámetro de impeler | 4826 | mm |
| Relación diámetro/tanque | 0.3 | |
| Velocidad del impeler | 300 | m/min |
| Dirección de bombeo agitador | Hacia abajo | |
| Parámetros mecánicos operacionales | | |
| Potencia instalada | 112 | kW |
| Potencia demandada | 88 | kW |
| Velocidad del eje (normal) | 20 | rpm |
| Velocidad del eje (crítica) | 30.7 | rpm |
| Motor | | |
| Polos | 6 | |
| Velocidad | 1190 | Rpm |
| Transmisión | | |
| Ratio | 58.88 | |
| Potencia nominal | 180 | kW |
| Potencia de diseño | 112 | kW |
| Torque nominal | 53405 | N-m |
| Recomendaciones distribuidor | | |
| Numero de deflectores | 3 | |
| Ancho deflectores | 1321 | mm |
| Longitud del deflector | 16789 | mm |
| Distancia de la pared | 445 | mm |
| Pesos | | |
| Eje con impellers | 6905 | kg |
| Transmisión y motor sin lubricación | 6879 | kg |
| Total | 13784 | kg |
| Cargas de diseño en soporte | | |
| Vertical | 217963 | N |
| Flector | 98410 | N-m |
| Torque | 84852 | N-m |

Tabla 1.5 Características del tanque

| Características del tanque | | |
|---|--|----------------|
| Parámetro | Valor / Característica | Unidad |
| General | | |
| Descripción | Tanques de lixiviación | |
| Cantidad | 7 | Und. |
| Estándar de referencia | API 650 11va. Ed | |
| Datos para diseño | | |
| Tipo | Cilíndrico vertical | |
| Volumen | 3336 | m ³ |
| Diámetro interno | 15.9 | m |
| Altura | 16.8 | m |
| Diseño del fondo | Pendiente mínima de 1% del centro a la periferia | |
| Eficiencia de soldadura | 85 | % |
| Corrosión admisible fondo | 1.5 | mm |
| Corrosión admisible casco | 1.5 | mm |
| Gravedad específica del fluido | 1.44 | |
| Velocidad del viento (diseño) | 75 | km/h |
| Materiales | | |
| Material del casco | ASTM A36 | |
| Material del fondo | ASTM A36 | |
| Material de refuerzo | ASTM A36 | |
| Manholes | ASTM A105 | |
| Cuellos de boquillas | ASTM A105 | |
| Bridas de boquillas | ASTM A105 | |
| Bridas ciegas | ASTM A105 | |
| Silletas de anclaje | ASTM A36 | |
| Pernos de anclaje | ASTM A307 | |
| Espárragos | ASTM A193 B7 | |
| Tuercas | ASTM A194 2H | |
| Tuberías | ASTM A53 Gr B | |
| Electrodos | E60XX-E70XX | |
| Otros | | |
| Cantidad de deflectores | 3 | Und. |
| Protección catódica | Si | |
| Conexiones puesta a tierra | 4 | Und. |
| Boquillas | | |
| Clase | 150 | |
| Tipo brida | Slip-On | |
| SCH | 80 | |
| N1, Manhole. Cantidad/Diámetro | 1/914 | Und./mm |
| N2, Drenaje. Cantidad/Diámetro | 1/150 | Und./mm |
| N3, Rociador. Cantidad/Diámetro | 1/150 | Und./mm |
| N4, Descarga. Cantidad/Ancho x Alto | 1/800x800 | Und./mm x mm |
| N5, Alimentación. Cantidad/Ancho x Alto | 1/800x800 | Und./mm x mm |
| Accesorios | | |
| Plataforma con barandas | Si aplica | |
| Drenaje | Si aplica | |
| Canaletas de conexión | Si aplica | |
| Ingreso de Aire | Si aplica | |
| Soporte de tubería interior | Si aplica | |

1.3. Definición de cargas

1.3.1. Carga muerta (D)

Es una carga gravitacional, que apunta hacia el suelo [Barton, 2003]. Se define como el peso de todos los componentes que se encuentran de manera permanente en la estructura, o unidos a ella como boquillas, equipos, conductos de alimentación, tuberías, etc. Se completa la carga muerta una vez terminada la construcción. Para el caso a estudiar se tratará entonces del peso total de la estructura y el equipo agitador.

1.3.2. Carga viva (L)

Es aquella carga que actúa sobre la estructura cuando esta entra en servicio. Esta varía en posición durante la vida útil de la estructura. Se trata por ejemplo de personas, equipos, condiciones de servicio, etc. Las normas técnicas como la Norma Técnica de Edificaciones [MVCS, 2006] establece valores para estos tipos de cargas. Basándose en la norma API 650 [API, 2010] y para el caso de estudio entran en esta definición las siguientes cargas:

- **Carga de prueba hidrostática (H_t):** La carga debido al llenado del tanque con agua hasta su altura de diseño para las pruebas.
- **Fluido almacenado (F):** La carga debido al llenado del tanque con el fluido de diseño, en este caso la pulpa.
- **Cargas de diseño debido al funcionamiento del agitador (L):** Son las cargas mostradas en la tabla 1.4. Se modelarán estas cargas como estáticas.

1.3.3. Carga viva en la plataforma (L_p)

De acuerdo a las especificaciones del proyecto la plataforma deberá soportar una carga distribuida de 500kg/m^2 .

1.3.4. Carga sísmica (E)

Es un tipo de carga dinámica de vibración aleatoria. Pese a su naturaleza dinámica es posible modelar esta carga tomando sus valores máximos aplicando un modelo estático equivalente. En el Perú y otros países se utilizan acelerogramas para tomar registro de los movimientos sísmicos. Tomando amplitud, frecuencia y factor de

amortiguamiento se construye una envolvente que abarca en una sola gráfica todos los sismos existentes históricamente. Esta es la labor realizada por los institutos sismológicos de cada región y de esta manera se obtiene el Espectro de aceleraciones Promedio [Barton, 2003], [MVCS, 2006]. La expresión matemática para el espectro de aceleraciones se muestra en la Ec. 1.2:

$$S_a = \frac{Z \cdot U \cdot S \cdot C_s}{R_d} \cdot g \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Dónde:

- **g** es la aceleración de la gravedad.
- **Z** es el parámetro denominado Factor Zona. Depende de la zona sísmica en donde se ubica la planta (tabla 1.6). La figura 1.6 muestra el mapa sísmico del Perú.
- **U** es el factor de importancia de la estructura.
- **S** es el factor suelo.
- **C_s** se denomina al factor de amplificación sísmica. Relaciona el periodo del terreno y el de la estructura.
- **R_d** es el coeficiente de reducción de la fuerza sísmica y se define de acuerdo al tipo de elementos utilizados en la construcción.

Para el tanque se calculará según lo estipulado en el apéndice E de la norma API 650. Para la plataforma se aplicará la norma técnica E0.30: Diseño sísmo resistente. El modelado de esta carga se explicará más adelante



Figura 1.6 Zonas sísmicas en el Perú [MVCS, 2006]

Tabla 1.6 Factores de zona [MVCS, 2006]

| Zona | Z |
|------|------|
| 3 | 0.4 |
| 2 | 0.3 |
| 1 | 0.15 |

1.3.5. Carga de vientos (W)

Las estructuras están sometidas a la acción del viento, a mayor altura de la estructura mayor será el efecto de esta carga. Otro parámetro influyente es la velocidad. Se considera que el viento no ocurre de manera simultánea al evento sísmico. Sin embargo se debe calcular su magnitud para considerar si es significativa, ya que puede afectar la estabilidad al vuelco. La figura 1.7 muestra el mapa de Isotacas del Perú, el cual fue tomado de la NTE E0.20 [MVCS, 2006]. Para el caso del tanque se aplica la carga de diseño según la norma [API, 2010].

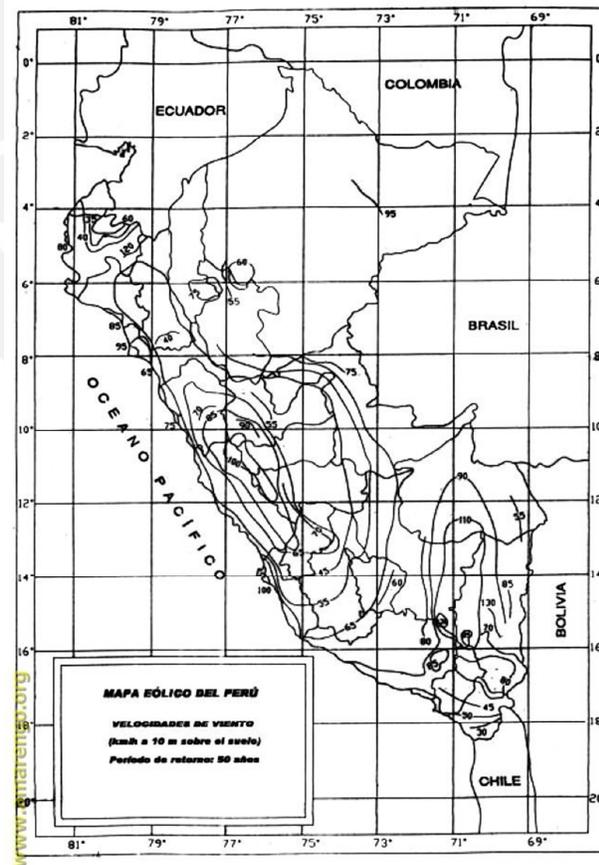


Figura 1.7 Mapa eólico del Perú [MVCS, 2006]

1.3.6. Carga de nieve (S)

De acuerdo a las condiciones de diseño se aplicará una carga de nieve en la plataforma. La presión a considerar debido a esta carga es de 0.4kPa.

1.3.7. Cargas dinámicas

Durante el funcionamiento de la estructura el conjunto estará sometido a cargas dinámicas, estas se caracterizan por variar respecto al tiempo. La frecuencia de vibración de estas afectará seriamente la estructura si llega a condiciones críticas como la resonancia [Alencastre, 2012]; que se da cuando la frecuencia excitatriz del se iguala a la frecuencia natural del sistema. Se debe evitar trabajar cerca a la frecuencia natural en el modo correspondiente. Esto se explicará a mayor detalle más adelante.

1.4. Formas constructivas

Las formas constructivas definirán como se unen los elementos de la estructura y también como se transmiten las cargas entre estos elementos.

1.4.1. Formas constructivas del tanque

El tanque será construido de planchas soldadas de acero. Estas se conformarán, cortarán y prepararán en un taller para luego ser soldadas en campo. De ser posible se soldará por ambos lados, caso contrario se soldará por uno hasta alcanzar el otro extremo. A continuación se muestran ciertas formas constructivas extraídas de la norma.

- **Fondo del tanque:** La placa del fondo del tanque se elabora mediante juntas a traslape, soldando únicamente por la parte superior la cual es accesible (fig. 1.8).

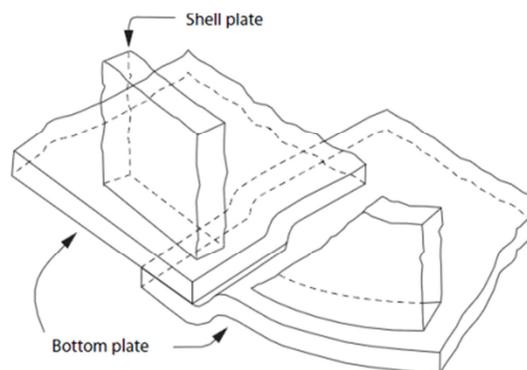


Figura 1.8 Unión de placas en el fondo del tanque [API, 2010]

- **Unión placa de fondo-pared del tanque:** Serán uniones de filete por ambos lados. El espesor del cordón se determina en función al espesor de pared del tanque. (fig. 1.9)

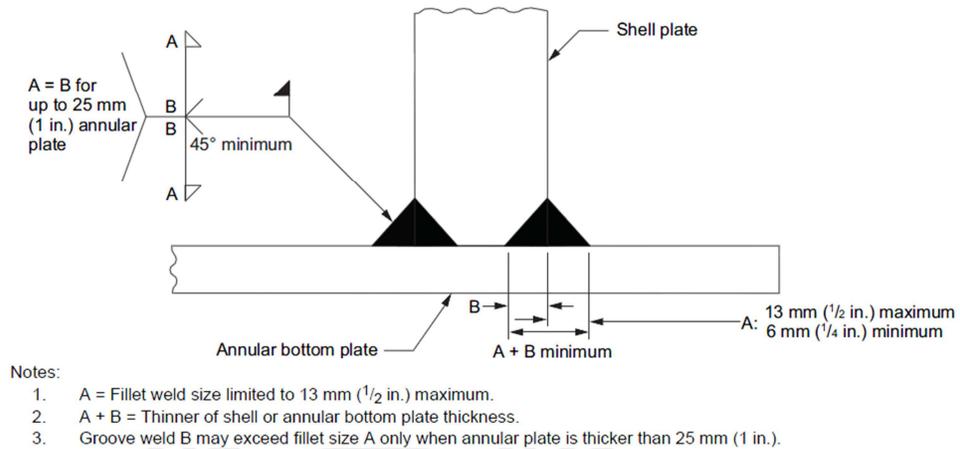


Figura 1.9 Unión pared-base [API, 2010]

- **Unión de placas de pared:** Las placas de pared serán unidas y soldadas a tope. Estas uniones deben garantizar una fusión y penetración completa de material. Por ello se deben preparar las juntas. Los tipos de unión utilizados son en V y doble V para grandes espesores. En las juntas horizontales solo se biselará a un lado y en las verticales a ambos lados (fig. 1.10).

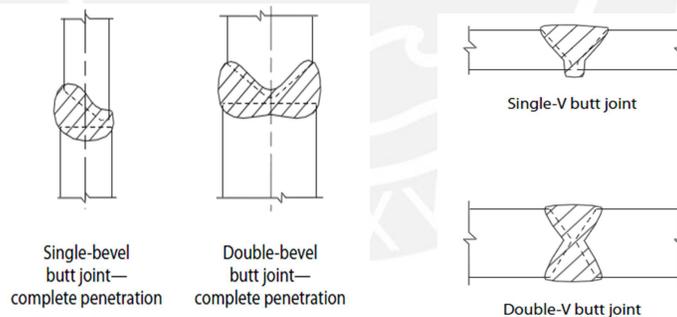


Figura 1.10 Juntas de pared. Verticales (izq.) y horizontales (der) [API, 2010]

- **Uniones de pared y anillos rigidizantes:** Los tanques llevarán un anillo rigidizante que en este caso cumplirá 2 funciones. La primera será dar rigidez contra el viento y la segunda distribuir uniformemente la carga de la plataforma. La figura siguiente muestra un modelo de unión. Como se observa (fig. 1.11), parte de la pared del tanque se suma a la sección del perfil contribuir con la inercia y brindar rigidez. En este trabajo se tratará de un canal C el cual estará en el borde superior. El módulo mínimo de la sección se determina según la norma [API, 2010].

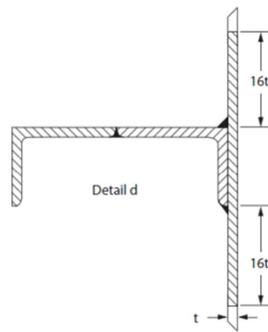


Figura 1.11 Junta pared-anillo rigidizante [API, 2010]

- **Boquillas y aperturas en la pared:** En las paredes del tanque existen diversas boquillas con distintas funciones. Todas ellas están reforzadas para diámetros mayores a 2". En el caso de tuberías, la estructura cuenta con soportes y juntas de expansión necesarias para evitar sobrecargar las conexiones. Las aperturas con las que cuenta el tanque son (fig. 1.13 y 1.14):
 - **Manhole**, para el ingreso durante mantenimiento.
 - **Boquilla de drenaje**, para drenar el contenido.
 - **Boquilla para el rociador**, en la cual se inyecta el oxígeno.
 - **Boquilla de rebose**, en la parte superior.
 - **Canal de alimentación**, en la parte superior, ingreso de solución.
 - **Canal de descarga**, en la parte superior, salida de la solución.

- **Silleta de anclaje para tanques:** Las silletas de anclaje tendrán fijarán el tanque al anillo de cimentación. La figura 1.12 muestra la silleta de anclaje que se empleará. Se tendrá un total de 36 silletas de anclaje distribuidas en el perímetro de la base.

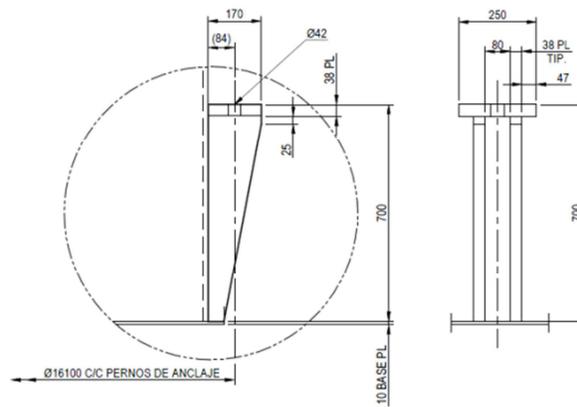


Figura 1.12 Silleta de anclaje

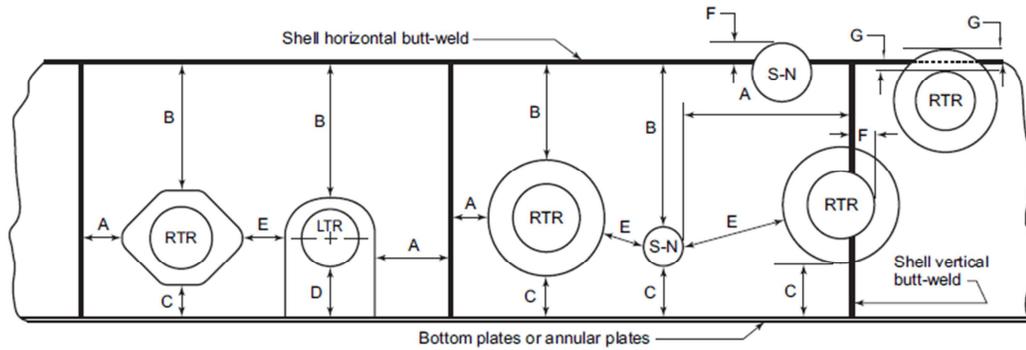


Figura 1.13 Distribución y tipos de apertura en las paredes del tanque [API, 2010]

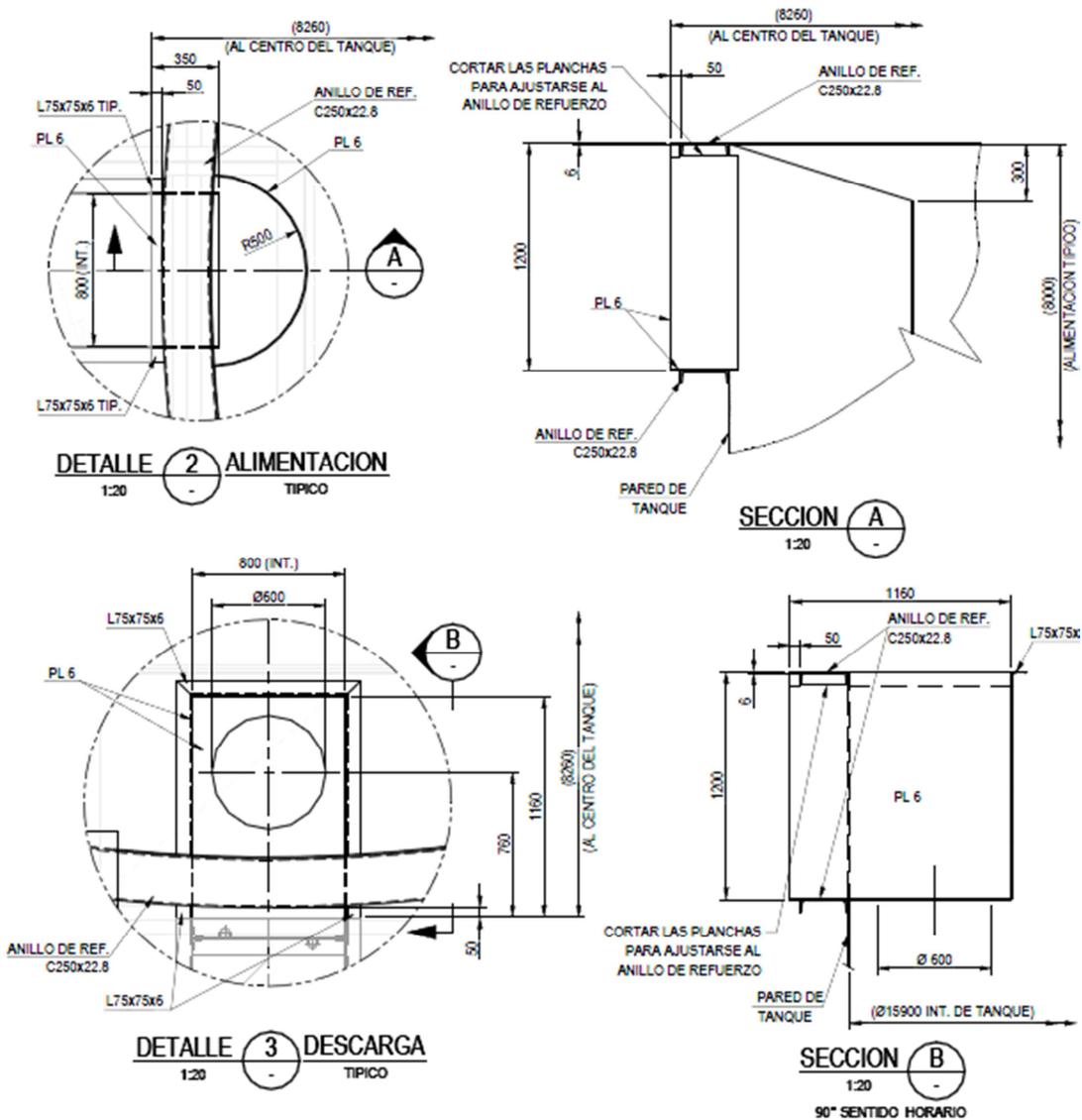


Figura 1.14 Aperturas de alimentación (arriba) y descarga (abajo)

1.4.2. Formas constructivas en la plataforma

Las formas constructivas en la plataforma determinan la rigidez de las uniones, esto será importante al calcular las reacciones y deformaciones en el conjunto. La figura 1.15 muestra la configuración inicial de la plataforma.

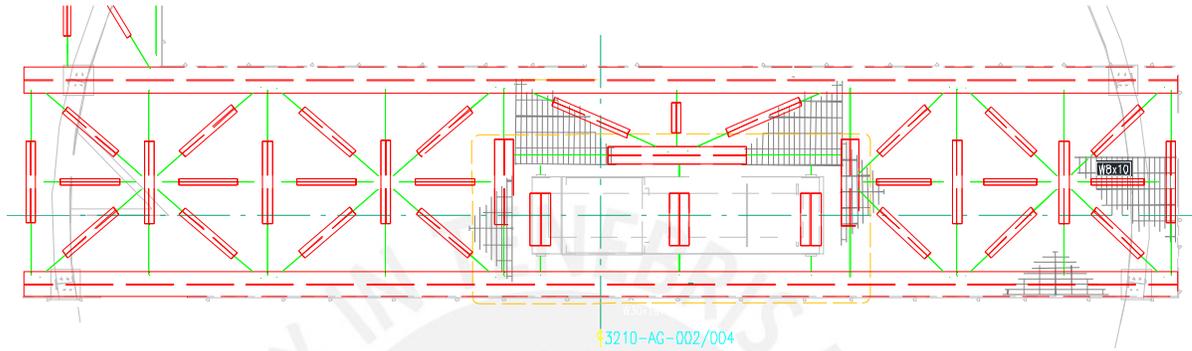


Figura 1.15 Configuración de la plataforma

- **Unión plataforma-tanque:** Es la unión existente entre las vigas principales y los anillos de refuerzo, las vigas descansan sobre placas de apoyo y son unidas a través del ala inferior por medio de pernos (fig. 1.16).

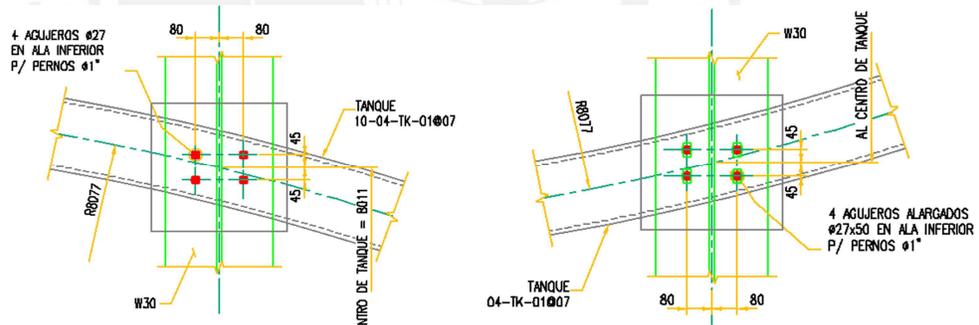


Figura 1.16 Unión plataforma-tanque

- **Soporte del agitador:** Conformado por los perfiles que soportarán al agitador, este tipo de unión es rígida y no permite giro relativo entre sus elementos (fig. 1.17).

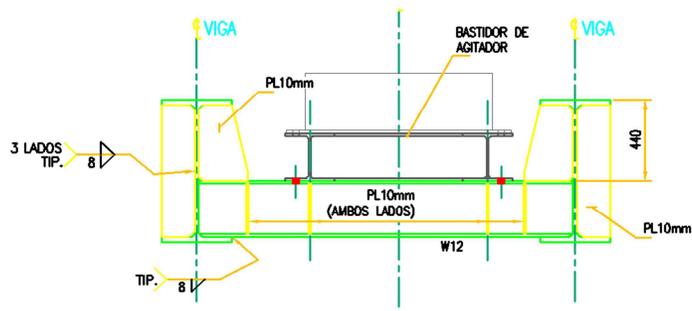


Figura 1.17 Soporte del agitador

- **Unión entre vigas:** Un tipo común de unión entre estos elementos es mediante juntas que permitan rotación y traslación. Para ello las uniones entre vigas comúnmente se realizan a través del alma de los perfiles. Se considera que solo se transmiten fuerzas entre ellos y no momentos en el plano mostrado (fig. 1.18).

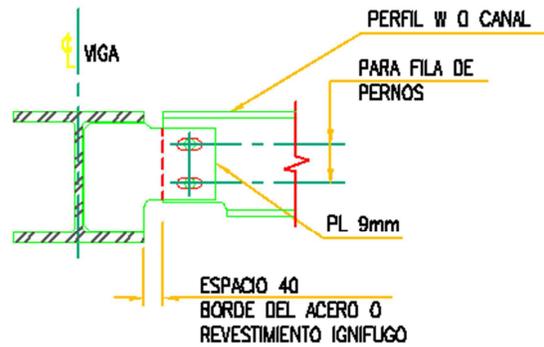


Figura 1.18 Junta entre viga y perfil.

- **Unión entre arriostres y vigas:** Este tipo de unión se realiza mediante cartelas, ya sea atornillando los perfiles o soldándolos. La función de los arriostres es rigidizar la estructura. Se considera que los arriostres sólo transmiten carga axial (fig. 1.19).

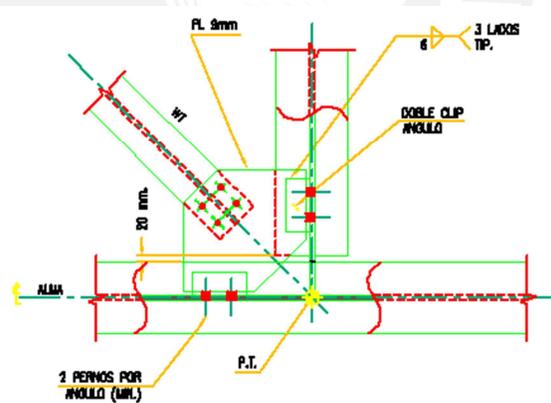


Figura 1.19 Junta viga-arriostres

1.5. Método ASD aplicado al análisis del tanque

El tanque soldado deberá cumplir con los estándares de la norma API 650. Esta norma se basa en el método de diseño del esfuerzo admisible (ASD) el cual toma como valor admisible a un porcentaje del esfuerzo de fluencia o ruptura. El tanque será dimensionado de acuerdo a los métodos propuestos en la norma y evaluado bajo las condiciones de diseño requeridas.

1.5.1. Diseño

1.5.1.1. Consideraciones de diseño

Se deberán considerar las siguientes cargas:

- **Carga muerta (D)** debido al peso del tanque y la plataforma.
- **Prueba hidrostática (H_T)** es una prueba realizada luego del montaje, sirve para evaluar la presencia de fugas y otros defectos de fabricación.
- **Sismos (E)** según lo estipulado en el apéndice E de la norma API 650 [API, 2010].
- **Nieve (S)** en la plataforma.
- **Líquido almacenado (F)** que en este caso será el lodo.
- **Viento (W)**, se aplicará una presión sobre las paredes según la Ec. 1.3 tomada de la norma:

$$P = 0.86 * \left(\frac{V}{190}\right)^2 [kPa] \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde V es la velocidad de diseño. La fuerza ejercida dependerá de la presión y el área proyectada.

- **Cargas externas** las cuales deberán estar determinadas en magnitud y dirección.

Además se debe considerar el efecto de las cargas localizadas. Se debe verificar que los valores de diseño estén por debajo de condiciones admisibles. **Se considerará para este análisis un nivel de diseño (H)** menor a la altura del tanque. Esto se acerca a las condiciones reales de servicio. Entonces:

$$H = 16.3 \text{ m}$$

1.5.1.2. Diseño de pared

Las paredes deberán cumplir con las siguientes características [API, 2010]:

- El espesor seleccionado para cada nivel deberá ser el mayor entre el espesor calculado por prueba hidrostática y el espesor de diseño.
- Para diámetros de tanque entre 15 y 36 m el espesor será como mínimo 6mm.
- El ancho mínimo de plancha recomendado es de 1800mm. Se usarán planchas con un ancho de 2400mm.

En cuanto al esfuerzo admisible, el método ASD trabajará con valores de esfuerzo admisible menores a los valores máximos para el material. Para el esfuerzo admisible de diseño S_d se trabajará con el siguiente valor, sin considerar corrosión admisible (CA):

$$S_d = \min\left[2/3 \sigma_f, 2/5 \sigma_t\right] \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Para el esfuerzo admisible para pruebas hidrostáticas se tendrá, considerando CA:

$$S_t = \min\left[3/4 \sigma_f, 3/7 \sigma_t\right] \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Para el acero A36 se tiene (tabla 1.7):

Tabla 1.7 Propiedades mecánicas

| Material | σ_f (MPa) | σ_t (MPa) | S_d (MPa) | S_t (MPa) |
|----------|------------------|------------------|-------------|-------------|
| A36 M | 250 | 400 | 160 | 171 |

Cálculo mediante método 1 pie:

Este método calcula el espesor requerido a un pie (0.3m) por encima del fondo del nivel a calcular. El espesor de pared será el mayor valor entre:

$$t_d = \frac{4.9(H-0.3)G}{S_d} + CA; \quad t_t = \frac{4.9(H-0.3)}{S_t} \quad (\text{Ec. 1.6a y b})$$

Dónde:

- t_d : espesor de diseño de pared (mm) incluyendo corrosión admisible.
- t_t : espesor de prueba hidrostática (mm) sin considerar corrosión admisible.
- **D**: diámetro nominal del tanque (m).
- **H**: altura de diseño (m). Para este caso es la altura del fondo del anillo a calcular hasta la superficie libre.
- **G**: gravedad específica del fluido.
- **CA**: corrosión admisible (mm).
- **S_d** y **S_t** son los esfuerzos admisibles calculados anteriormente.

Comparando ambas ecuaciones (Ec. 1.6a y b) se ve que debido a la gravedad específica (G), esfuerzo admisible (S_d) y sobre-espesor por corrosión (CA); la expresión de la izquierda siempre será mayor que la derecha para este caso. La tabla 1.8 muestra los

resultados. Se muestra en la primera columna el espesor mínimo requerido, en la siguiente el espesor comercial seleccionado el cual será el espesor de diseño. El anillo 1 corresponde al anillo inferior y el 7 al nivel más alto. Se empleó un espesor mayor en los últimos niveles para que estas soporten la carga de la plataforma y el agitador.

Tabla 1.8 Espesores de diseño

| Anillo | Altura(H) (m) | t _d (mm) | t comercial (mm) |
|--------|------------------|------------------------|---------------------|
| 1 | 16.3 | 12.72 | 16 |
| 2 | 13.9 | 11.03 | 12 |
| 3 | 11.5 | 9.35 | 12 |
| 4 | 9.1 | 7.67 | 10 |
| 5 | 6.7 | 5.98 | 8 |
| 6 | 4.3 | 4.30 | 8 |
| 7 | 1.9 | 2.62 | 8 |

El **esfuerzo admisible** será el producto del esfuerzo de diseño reducido por la eficiencia de soldadura, entonces:

$$\sigma_{adm} = S_d * eff = 160 * 0.85 = 136 \text{ MPa}$$

1.5.1.3. Anillos rigidizantes

Todo tanque de techo abierto debe llevar un anillo rigidizante en la parte superior, de preferencia en el exterior para mantener su redondez. Estos anillos estarán hechos de perfiles estructurales rolados y como mínimo se deberá emplear un perfil L 65x65x6. La sección deberá tener como mínimo el siguiente módulo:

$$Z_{min} = \frac{D^2 H_2}{17} \left(\frac{V}{190} \right)^2 \tag{Ec. 1.7}$$

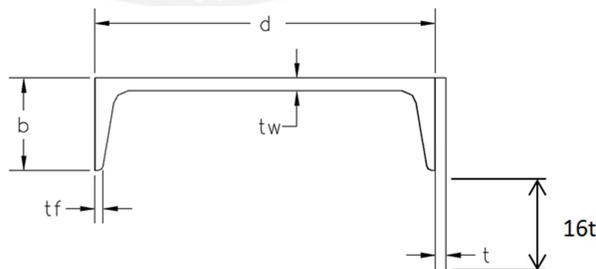


Figura 1.20 Sección de anillo rigidizante empleado

Participará en la sección una parte de la pared del tanque hasta una distancia de 16 veces el espesor. Para este caso el módulo mínimo es:

$$Z_{min} = 54.8 \text{ cm}^3$$

Se empleó como anillo de refuerzo un perfil **C10x15.3**, obteniéndose un módulo de sección $Z=101.76 \text{ cm}^3$ (fig. 1.20). La norma también especifica la altura intermedia máxima sin rigidizar que cumplirá con la expresión:

$$H_i = 9.47 + \left(\frac{t}{D}\right)^{3/2} \left(\frac{190}{V}\right)^2 = 173 \text{ m} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Esto muestra que para las condiciones de viento no se requiere un anillo intermedio. Sin embargo, este se empleará para servir de soporte a las canaletas; y reforzar la zona superior para evitar pandeo local donde se concentren las cargas de la plataforma.

1.5.1.4. Pernos de anclaje

Los tanques deberán ir anclados con la finalidad de evitar un posible desplazamiento o una volcadura durante un vendaval o un sismo. La carga para cada perno deberá ser:

$$t_b = U/N \quad [N] \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Donde U es la carga neta de volteo (N) y N es el número de pernos de anclaje igualmente espaciados. La siguiente tabla muestra los casos a analizar, así como el esfuerzo admisible de los pernos ($\sigma_{adm.p}$)

Tabla 1.9 Casos de análisis para anclajes

| Caso de volteo | U (N) | $\sigma_{adm.p}$ (MPa) |
|-----------------|-------------------------|------------------------|
| Carga de viento | $(4 \cdot M_w/D) - W_2$ | $0.8F_y$ |
| Carga sísmica | $(4 \cdot M_s/D) - W_2$ | $0.8F_y$ |

Dónde:

- M_w es el momento de volteo debido a cargas de viento, N-m.
- M_s es el momento debido a la carga sísmica. Definido más adelante, N-m.
- W_2 es el momento resistente de la carga muerta.
- F_y es el esfuerzo de fluencia del perno.
- D es el diámetro del tanque, m.

1.5.2. Combinaciones de carga

Según el apéndice R de la norma API 650 [API, 2010] se deberán estudiar las siguientes combinaciones de carga aplicables a este diseño particular de tanque abierto:

- D_L+F+L
- D_L+H_t
- D_L+S
- D_L+W+L
- $D_L+F+E+L+0.1S$

1.5.3. Diseño sísmico

El diseño sísmico de tanques según la norma está estipulado en su apéndice E [API, 2010] y tiene como finalidad analizar si la estructura resiste un movimiento sísmico. La metodología de diseño sísmico está basada en el método ASD y el método empleado es el de la cortante basal, el cual deriva de la norma ASCE7 [ASCE, 2010]. El sismo a estudiar se define como el máximo movimiento del terreno con probabilidad de 2% de excedencia en un periodo de 50 años. Este método se basa en un análisis de respuesta espectral, el cual considera dos modos de respuesta, uno impulsivo y otro convectivo. De acuerdo a este método de diseño no se requiere un análisis dinámico, por el contrario se plantea un modelo estático equivalente.

1.5.3.1. Periodo estructural de vibración

Durante un movimiento sísmico, la estructura y el fluido no se moverán de la misma manera. Parte del fluido se moverá junto a la estructura en el mismo periodo y otra parte se moverá con un periodo mayor. La primera parte es la componente impulsiva y la segunda la componente convectiva. Ambas generan esfuerzos en las paredes del tanque y sus efectos se superponen. Cada una tendrá su correspondiente periodo, masa participante, aceleración y fuerza equivalente en la estructura (fig. 1.21).

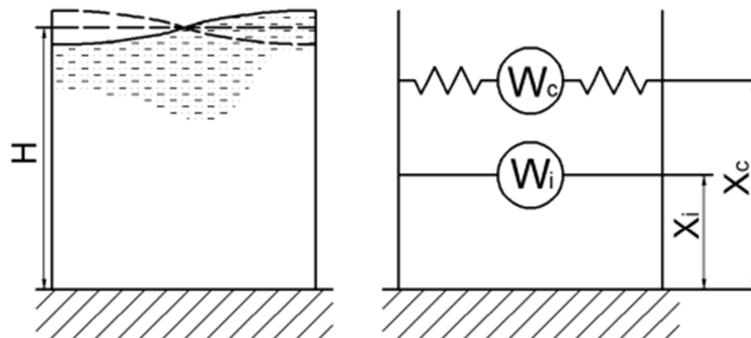


Figura 1.21 Representación dinámica del tanque

1.5.3.2. Diseño

Según el método ASD, durante eventos como cargas sísmicas o vientos se podrá incrementar el valor del esfuerzo admisible en un 33%, es decir:

$$\sigma_{adm.E} = 1.33\sigma_d = 212.8 \text{ MPa}$$

Y considerando la eficiencia de soldadura:

$$\sigma_{adm.E,eff} = \sigma_{adm.E} * eff = 212.8 * 0.85 = 180.88 \text{ MPa}$$

Cortante basal (V)

Los tanques deben ser diseñados para resistir fuerzas sísmicas considerando masa efectiva y presiones dinámicas. El diseño modelará la carga sísmica como fuerzas laterales equivalentes y se realizará una distribución de estas. Se establecerá entonces una **cortante basal (V)** la cual será calculada como la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SRSS) de las componentes impulsiva (V_i) y convectiva (V_c) [API, 2010].

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

$$V_i = A_i(W_s + W_r + W_f + W_i) \quad (\text{Ec. 1.11})$$

$$V_c = A_c W_c \quad (\text{Ec. 1.12})$$

Dónde:

- W_s es el peso de la pared.
- W_r es el peso del techo.
- W_f es el peso del piso.
- W_i es el peso de la componente impulsiva, una fracción del peso total del contenido.
- W_c es el peso de la componente convectiva.
- A_i y A_c son las componentes de aceleración impulsiva y compulsiva, su cálculo se muestra en el anexo A.

Momento de volteo (M_{rw})

El momento de volteo deberá ser soportado por los pernos de anclaje:

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(X_i W_i + X_s W_s + X_r W_r)]^2 + [A_c(X_c W_c)]^2} \quad [N - m] \quad (\text{Ec. 1.13})$$

Se empleará este momento para verificar los pernos de anclaje y para verificar el pandeo en la parte inferior del tanque. X_i , X_s , X_r y X_c son los puntos de aplicación de cada fuerza.

Cálculo de pernos de anclaje

Los pernos deberán soportar la siguiente carga perimetral total

$$w_{ab} = \frac{1.273M_{rw}}{D^2} - w_t \quad \left[\frac{N}{m} \right] \quad (\text{Ec. 1.14})$$

Siendo w_t el peso de las paredes y el techo. Para cada perno la fuerza P_{ab} será:

$$P_{ab} = w_{ab} \left(\frac{\pi D}{n_A} \right) \quad [N] \quad (\text{Ec. 1.15})$$

Donde n_A es el número de pernos.

Máximo esfuerzo longitudinal de compresión

En tanques anclados el esfuerzo de compresión se calcula con la fórmula:

$$\sigma_c = \left(w_t + 1.273 \frac{M_{rw}}{D^2} \right) \frac{1}{1000t_s} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (\text{Ec. 1.16})$$

El anexo A muestra el cálculo del **esfuerzo de compresión admisible F_c** para cada nivel.

1.6. Método LRFD aplicado al análisis de la plataforma

1.6.1. Definición

En la actualidad, el diseño estructural se enfoca ya no únicamente en evaluar la resistencia de la estructura; sino también en un procedimiento orientado más hacia lo racional, que se enfoca en lo que se conoce como “estado límite”. Este estado es la condición límite que alcanza la estructura, fuera de la cual dejará de cumplir su función [AISC, 2010].

Este estado límite se divide en dos categorías. La primera es la resistencia, la cual está relacionada con el comportamiento mecánico respecto a la máxima resistencia de los materiales. La segunda categoría es el servicio, la cual está relacionada con la funcionalidad de la estructura ante las deflexiones propias del servicio. El propósito de este método de diseño es no sobrepasar ninguno de los estados límite de la estructura. Debido a que siempre existirá una posibilidad de falla, se debe buscar cierta posibilidad adecuada y práctica basándose en métodos estadísticos [Barton, 2003].

Se considera que la carga (Q) y la resistencia (R) son variables aleatorias. El diseño entonces deberá satisfacer las siguientes ecuaciones (Ec. 1.17 y 1.18):

$$\sum \gamma_i Q_i = R_u \quad (\text{Ec. 1.17})$$

$$R_u \leq \phi R_n \quad (\text{Ec. 1.18})$$

Dónde:

- $\sum \gamma_i Q_i$ es la suma de las cargas Q_i multiplicadas por sus factores de mayorización γ_i .
- R_u es la resistencia requerida, determinada por las combinaciones de carga.
- ϕ es el factor de resistencia.
- R_n es la resistencia nominal del material.
- ϕR_n es la resistencia de diseño del material.

1.6.2. Combinaciones de carga

La norma ASCE 7 [ASCE, 2010] brinda las combinaciones de carga a aplicarse. Las combinaciones son las siguientes:

- **1.4D**
- **1.2D+1.6L+0.5(L_p o S o R)**
- **1.2D+1.6(L_p o S o R) + (L o 0.5W)**
- **1.2D+W+L+0.5(L_p o S o R)**
- **1.2D+E+L+0.2S**
- **0.9D+W**
- **0.9D+E**

Se deberá evaluar cada caso y se deberá considerar como resistencia requerida a la combinación de cargas que genera la mayor resistencia en la estructura o en algún elemento a analizar. Se deberán hallar los esfuerzos internos ya sea por tracción, compresión, flexión, corte, o por cargas combinadas.

1.6.3. Factores de resistencia

La norma AISC 360-10 brinda valores de resistencia nominal y factores de resistencia para cada tipo de carga. Los factores de resistencia aseguran de manera estadística que para cierto tipo de carga la resistencia de diseño tiene valores menores que la resistencia nominal del material. La tabla siguiente muestra algunos valores de factor de resistencia empleados en la norma.

Tabla 1.10 Factores de resistencia

| ϕ | Caso de carga |
|--------|---------------------------|
| 0.90 | Fluencia por tracción |
| 0.75 | Fractura por tracción |
| 0.85 | Compresión |
| 0.90 | Flexión |
| 0.90 | Fluencia por corte |
| 0.90 | Carga combinada |
| 0.75 | Pernos a tracción y corte |
| 0.7 | Pernos no deslizantes |

Basado en lo mencionado, se afirma lo siguiente respecto al método de diseño LRFD:

- Este método resulta versátil debido a que se pueden modelar las cargas por separado.
- Se puede refinar el análisis mientras más información se tenga sobre el modelo.
- El modelo brinda factores de resistencia independientes para cada tipo de carga.
- Debido a que se modelan las cargas por separado, se puede conocer el efecto de cada una de ellas sobre la resistencia de la estructura.

1.6.4. Uniones

En cuanto a las uniones, se consideran los siguientes tres tipos de uniones entre miembros, las cuales dependen de su rigidez:

- **Conexiones simples:** son aquellas conexiones que transmiten momentos despreciables. Deberá tener la capacidad de rotación necesaria para girar libremente.
- **Conexión de momento totalmente restringida:** Transmite momento con una rotación despreciable entre sus componentes. Deberá tener la resistencia y rigidez suficiente para soportar las cargas y mantener el ángulo relativo entre los miembros.
- **Conexión de momento parcialmente restringida:** Transfiere momento pero una rotación no despreciable. Las características fuerza-deformación de este tipo de uniones deberán ser determinadas ya sea de manera analítica o experimental.

La figura 1.22 muestra lo explicado anteriormente. El diseño se realizó con uniones simples y en algunos casos con conexiones totalmente rígidas. De haber uniones semi-rígidas (parcialmente restringida) se modelarán como conexiones rígidas.

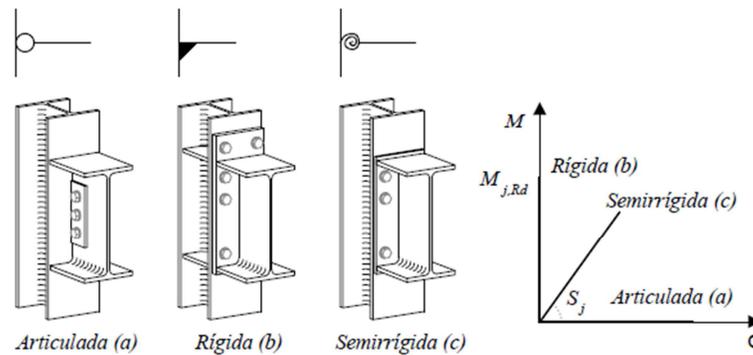


Figura 1.22 Clasificación de uniones según su rigidez [Jiménez, 2013]

1.6.5. Propiedades de los elementos

Se aplicarán distintos tipos de análisis los cuales dependerán no solo de la carga, sino también de las propiedades de la sección [AISC, 2010]. Para ello la norma las clasifica de acuerdo a los grados de esbeltez de la parte del perfil estructural a analizar (ala o alma). Este dependerá de la relación longitud característica/espesor (b/t o h/t , “b” ancho de media ala y “h” longitud de alma). Se definen los tipos de sección en la tabla 1.11. De acuerdo a sus propiedades se evaluarán distintos estados límite.

Tabla 1.11 Propiedades de sección

| Tipo de carga | Tipo de ala / alma | Condición |
|---------------|--------------------|--|
| Compresión | No esbelto | $b/t (h/t) \leq \lambda_r$ |
| | Esbelto | $b/t (h/t) > \lambda_r$ |
| Flexión | Compacto | $0 \leq b/t (h/t) \leq \lambda_p$ |
| | No compacto | $\lambda_p < b/t (h/t) \leq \lambda_r$ |
| | Esbelto | $b/t (h/t) > \lambda_r$ |

Donde λ_r y λ_p son los valores de esbeltez mínimos para elementos no compactos y compactos, respectivamente.

1.7. Vibraciones mecánicas

1.7.1. Definición

Se definen vibraciones mecánicas como la oscilación de la posición (magnitud mecánica) respecto a un valor estático inicial en el tiempo. Estas son causadas por las solicitaciones variables que presenta un sistema. La magnitud de estas vibraciones es en general pequeña respecto al tamaño del sistema; sin embargo, puede producir efectos

significativos sobre el mismo como perturbaciones sobre su funcionamiento que logran alcanzar el estado límite. Muchos sistemas vibratorios se modelan como sistemas de 1 grado de libertad. Sistemas de n grados de libertad son más complejos pero describen de mejor manera el comportamiento del sistema.

Se llevará a cabo un análisis dinámico del conjunto. Al ser el agitador un equipo rotativo, este transmitirá cargas cíclicas a su bastidor y este a la plataforma. Es fundamental determinar las características del conjunto con la finalidad de evitar condiciones críticas como la resonancia (frecuencia de trabajo se acerca a la frecuencia natural del sistema). Este análisis determinará los modos de vibración de la estructura para asegurarse que ninguna de estas frecuencias y modos sean excitados por la frecuencia de funcionamiento del equipo. Para ello este acápite brindará el marco teórico para determinar el comportamiento de un sistema de 1 grado de libertad (GDL), para posteriormente determinar los modos vibratorios de un sistema de n GDL.

1.7.2. Solución de sistemas de 1 GDL

En un sistema de 1 GDL se requiere de 1 variable para definir su estado. La figura 1.23 muestra un sistema de 1GDL. La ecuación diferencial del sistema (Ec. 1.19) es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (\text{Ec. 1.19})$$

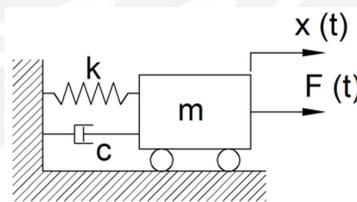


Figura 1.23 Modelo de 1 GDL. Elaboración propia

Donde:

- **m** representa a la característica inercial del sistema, asociada a la energía cinética.
- **c** representa a la característica de amortiguamiento, asociada a la energía disipativa.
- **k** representa a la característica elástica, asociada a la energía potencial.
- **F** es la fuerza que ingresa sobre el sistema, asociada al trabajo.

Dividiendo entre m , se puede reescribir la ecuación diferencial de la siguiente manera:

$$\ddot{x} + 2d\dot{x} + \omega_n^2 x = F(t)/m \quad (\text{Ec. 1.20})$$

Donde:

- $d = c/(2m)$ es el coeficiente de atenuación.
- $\omega_n = \sqrt{k/m}$ es la frecuencia natural del sistema, será la frecuencia a la cual el sistema oscile libremente al no haber amortiguamiento.

Se somete al sistema a una carga armónica $F = F_o \cos \omega t$ y la solución de la ecuación es la siguiente:

Primero será necesario definir los siguientes términos:

- **Amortiguamiento crítico:** $c_c = 2\sqrt{km}$
- **Amortiguamiento relativo:** $\xi = c/c_c$
- **Relación de frecuencias:** $r = \omega/\omega_n$

Luego de la etapa transitoria inicial, considerando solamente el funcionamiento en estado continuo, la solución de la ecuación diferencial tomará la forma [Thomson, 1982]:

$$x = X \cos(\omega t - \theta) \quad (\text{Ec. 1.21})$$

Nótese que la posición tendrá una amplitud distinta a la fuerza excitatriz y estará desfasada de la misma, pero tendrá la misma frecuencia que esta. Resulta entonces importante determinar sobretodo la relación de amplitudes ($X/(F_o/k)$) y adicionalmente el desfase (θ). Estas relaciones están dadas a continuación [Thomson, 1982]:

$$\frac{X}{F_o/k} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (\text{Ec. 1.22})$$

$$\tan(\theta) = \frac{2\xi r}{1-r^2} \quad (\text{Ec. 1.23})$$

Se puede representar gráficamente las siguientes expresiones en función de "r" (fig. 1.24), Como se observa a medida que "r" se aproxima a 1 la amplitud crece y el sistema entra en resonancia, de no haber suficiente amortiguamiento el sistema seguiría incrementando su amplitud con cada oscilación. Es por este motivo que la frecuencia de excitación se encuentre lejos de la frecuencia natural. Para asegurar un correcto funcionamiento, solo es necesario que la frecuencia de excitación este lo suficientemente lejos de la frecuencia natural, esto no depende del amortiguamiento. Por ello es recomendable que: $r = \sqrt{2}$

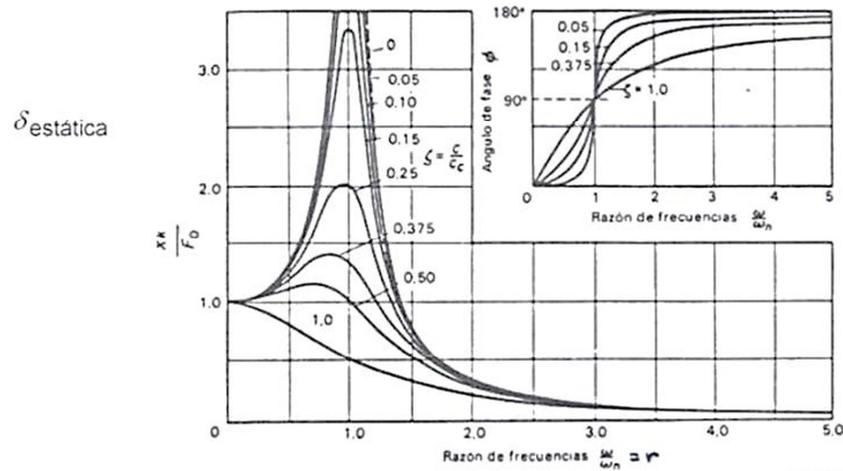


Figura 1.24 Respuesta del sistema de 1GDL en función de “r” [Thomson, 1982]

1.7.3. Solución de sistemas de n grados de libertad

La solución a sistemas de n grados de libertad sigue básicamente el mismo fundamento que el sistema de 1GDL. Se procederá en esta parte a determinar los modos de vibración para sistemas de n GDL, el cual requiere de n ecuaciones para determinar su estado. El sistema de ecuaciones se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 m_{11}\ddot{x}_1 + \dots + m_{1n}\ddot{x}_n + c_{11}\dot{x}_1 + \dots + c_{1n}\dot{x}_n + k_{11}x_1 + \dots + k_{1n}x_n &= f_1(t) \\
 m_{21}\ddot{x}_1 + \dots + m_{2n}\ddot{x}_n + c_{21}\dot{x}_1 + \dots + c_{2n}\dot{x}_n + k_{21}x_1 + \dots + k_{2n}x_n &= f_2(t) \\
 \vdots & \\
 m_{n1}\ddot{x}_1 + \dots + m_{nn}\ddot{x}_n + c_{n1}\dot{x}_1 + \dots + c_{nn}\dot{x}_n + k_{n1}x_1 + \dots + k_{nn}x_n &= f_n(t)
 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 1.24})$$

Escrito de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & \dots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ \vdots \\ f_n(t) \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec.1.25})$$

En forma matricial abreviada sería:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = f \quad (\text{Ec. 1.26})$$

Para este tipo de sistemas sucederá algo similar a lo anterior. Si se perturba al sistema en uno de sus modos vibratorios, el sistema vibrará con la frecuencia natural correspondiente al modo de vibración en caso de no presentar amortiguamiento (C=0). Para hallar las frecuencias naturales y modos de vibración, no se considera amortiguamiento y se somete a la estructura a vibración libre. La ecuación diferencial es:

$$M\ddot{X} + KX = 0 \quad (\text{Ec. 1.27})$$

La solución a la ecuación sería la siguiente:

$$X(t) = \emptyset. e^{j\omega t} \quad (\text{Ec. 1.28})$$

Es decir:

$$\begin{Bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{Bmatrix} \cdot e^{j\omega t} \quad (\text{Ec. 1.29})$$

Derivando 2 veces:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= j\omega\emptyset. e^{j\omega t} \\ \ddot{X}(t) &= -\omega^2\emptyset. e^{j\omega t} \end{aligned}$$

Reemplazando:

$$[K - M\omega^2]\emptyset = 0 \quad (\text{Ec. 1.30})$$

Multiplicando por la matriz inversa M^{-1} se obtiene la ecuación característica:

$$[A - \lambda I]\emptyset = 0 \quad (\text{Ec. 1.31})$$

Dónde: $A = M^{-1}K$ y $\lambda = \omega^2$. Al ser $X \neq 0$

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (\text{Ec. 1.32})$$

Resolviendo la determinante se obtienen n raíces λ con valores reales positivas. Las frecuencias naturales serían:

$$\omega_i = \sqrt{\lambda_i} \quad (\text{Ec. 1.33})$$

Reemplazando ω_i en la ecuación característica se obtienen el vector propio "i" correspondiente a la i-ésima frecuencia natural. Se tendrán n vectores propios con n valores propios cada uno. Estos vectores son los llamados modos de vibración. Así:

$$[A - \lambda_i I]\emptyset_i = 0 \quad (\text{Ec. 1.34})$$

Para que el sistema entre en resonancia, se requiere entonces que las cargas excitatrices tengan una frecuencia igual a alguna frecuencia natural del sistema ω_i adicionalmente deberá excitarla en la dirección de su respectivo vector propio. Se puede determinar de antemano el modo de vibración, pero se deberá determinar la frecuencia natural.

1.7.4. Análisis dinámico aplicado al conjunto

El análisis modal realizado en el sistema tendrá en cuenta lo siguiente:

- Se deberán modelar correctamente las uniones ya que de ello dependerá la rigidez del sistema lo cual influirá notablemente sobre el resultado.
- Considerando el tamaño del conjunto y el contenido del líquido almacenado dentro del tanque, se puede apreciar que la masa del tanque incluyendo su contenido es sumamente mayor a la masa de la plataforma con el agitador. Esta última llega a las 30 toneladas lo cual es mucho menor a la primera (5000t).
- El agitador no se encuentra en el centro de la plataforma, sino hacia un lado. Esto generará un alabeo en la plataforma.

El análisis a realizar hallará las frecuencias naturales del conjunto y sus respectivos modos de vibración. Se infiere a priori que algunos de los modos de vibración son los siguientes (figura 1.25):

- Modo de deflexión vertical de la plataforma (eje z).
- Modo de flexión en contrafase vertical (alabeo), debido al desbalance de masas.
- Modo de traslación de la plataforma respecto al eje x

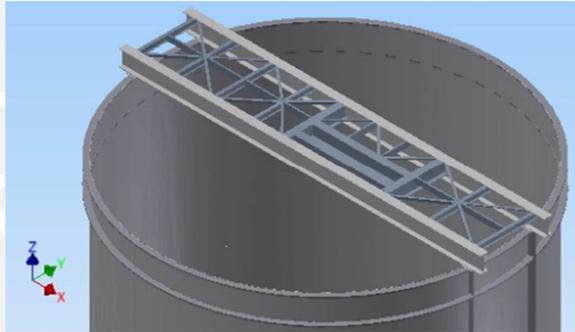


Figura 1.25 Representación de la plataforma. Elaboración propia

1.8. Método de los elementos finitos (MEF)

1.8.1. Definición

Método conocido también como análisis por elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés). Es una técnica eficaz utilizada para obtener soluciones aproximadas en problemas complejos [Alencastre, 2013]; los cuales contienen más de una variable dependiente que debe satisfacer las ecuaciones diferenciales dentro de su propio dominio o campo. Su correcto uso facilita la interpretación de variables estudiadas. Este método considera al todo como un ensamble de partículas de tamaño finito relacionadas entre sí en sus nodos denominadas elementos finitos. El proceso de conversión se denomina discretización o modelado [Da Fonseca, 2011] (fig. 1.26).



Figura 1.26 Discretización

1.8.2. Fundamentos del MEF

Para representar un fenómeno físico, el MEF se basa en los siguientes fundamentos:

- Una función continua en un dominio global se puede aproximar en una serie de funciones continuas operando en un número finito de pequeños subdominios.
- El dominio global se subdivide en subdominios que son elementos de geometría sencilla llamados elementos finitos. Estos **no son infinitesimalmente pequeños**.
- Los puntos que definen las conexiones entre elementos se llaman nodos.
- La función bajo el dominio, es resuelta para sus puntos nodales. El valor de la función en cualquier punto interno puede estar definido en términos de las variables nodales.
- Los nodos presentan seis grados de libertad (3 de desplazamiento y 3 de rotación).
- El conjunto de elementos representa una aproximación a los dominios geométricos.
- Los nodos no representan físicamente puntos de conexión dentro del dominio.
- En el análisis estructural se debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos internos o externos, relaciones de deformación-desplazamiento entre elementos, y leyes constitutivas de los materiales [Alencastre, 2013].

1.8.3. Etapas en la aplicación del MEF para el análisis estructural

- **Definición del fenómeno físico:**

Primero se debe definir el dominio a estudiar. Se establecen las características físicas y geométricas de este, también sus fronteras. Asimismo, se deben determinar las ecuaciones diferenciales y variables que gobiernan el entorno. Luego se establecen condiciones de borde, que actúan sobre las fronteras del sistema. Estas pueden ser por ejemplo cargas o restricciones de desplazamiento en los soportes (fig. 1.27)

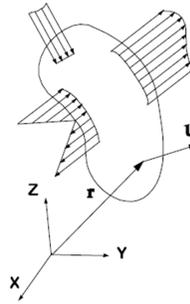


Figura 1.27 Definición del dominio [Alencastre, 2013]

- **Discretización del medio:**

Se discretiza el problema físico. Para ello se debe idealizar el modelo continuo en elementos finitos unidos entre sí mediante sus respectivos nodos. Se debe seleccionar el tipo de elemento correcto y del tamaño adecuado para que el comportamiento del modelo discreto se aproxime al modelo real. A esto se le denomina mallado (fig. 1.28).

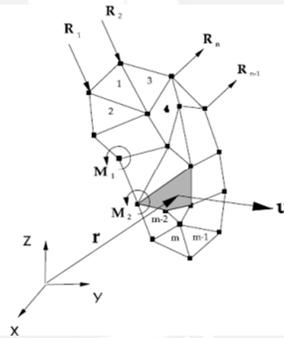


Figura 1.28 Dominio discretizado (mallado) [Alencastre, 2013]

- **Solución del dominio**

- **Formulación de la ecuación finita del elemento.**

Para plantear la ecuación finita del elemento lo primero que se debe de hacer es establecer las ecuaciones de equilibrio para cada elemento (fig. 1.29). Dependiendo de los grados de libertad que posea cada uno de sus nodos, se plantearán ecuaciones de equilibrio elementales. Una vez establecidas las ecuaciones de equilibrio del elemento se determinan las propiedades físicas del elemento mediante las leyes constitutivas. Estas leyes relacionan propiedades del material con sus características

físicas. En el análisis estructural se aplica la ley de Hooke. Finalmente se determina la ecuación finita del elemento (Ec. 1.35).

$$[K]^{(e)}\{u\}^{(e)} = \{F\}^{(e)} \quad (\text{Ec. 1.35})$$

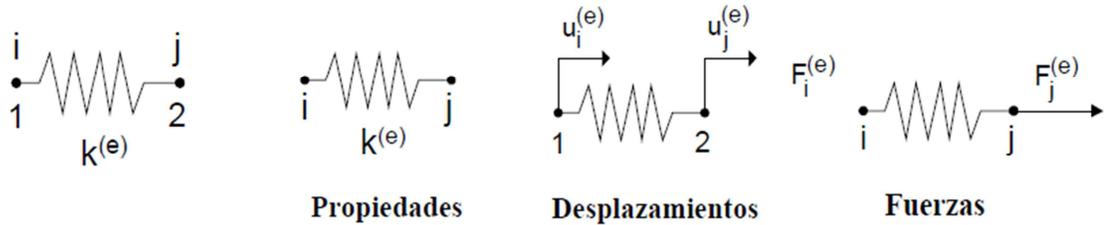


Figura 1.29 Elemento resorte; propiedades, desplazamientos y fuerzas [Alencastre, 2013].

o **Formulación de la matriz global del dominio**

La matriz global del dominio parte de las ecuaciones finitas de cada elemento. En este punto se determinan las relaciones de compatibilidad entre los elementos; los cuales deberán tener la misma posición y orientación en sus nodos comunes. Finalmente se acopla toda la información en una matriz global que representará las características físicas del dominio en base a las características de cada elemento que la compone. Cada elemento aportará con su respectiva rigidez a la matriz global (fig. 1.30).

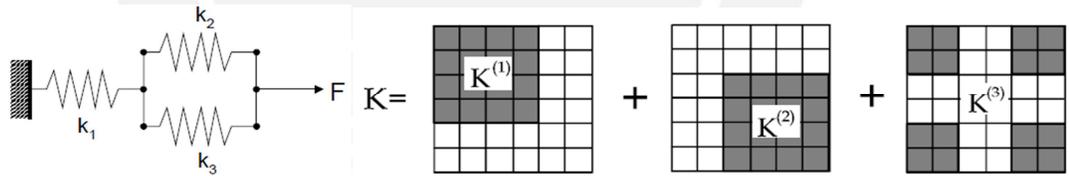


Figura 1.30 Izquierda, sistema de resortes. Derecha, contribución de cada elemento a la matriz global de rigidez [Alencastre, 2013]

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (\text{Ec. 1.36})$$

o **Solución del sistema global**

Finalmente se aplican las cargas sobre los nodos y se establecen las condiciones de borde, estas permitirán resolver el sistema y determinarán el comportamiento del mismo. Se calculan los desplazamientos. Mediante leyes constitutivas se determinan deformaciones unitarias y posteriormente los esfuerzos (Ec. 1.37).

$$\{u\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (\text{Ec. 1.37})$$

Capítulo 2: Procedimiento general de simulación

En este capítulo se explicará el procedimiento realizado para llevar a cabo la simulación. Se mencionarán las consideraciones tomadas en cuenta para llevar a cabo el análisis desde la definición del problema hasta el manejo de resultados. El objetivo de este capítulo es asegurar resultados confiables mediante la metodología establecida.

2.1. Definición del problema

El punto de partida de la simulación es la definición del problema. En esta parte se debe definir lo siguiente:

- **Objeto de estudio:** Es el objeto sobre el cual se realizará el análisis. En este caso es el conjunto tanque-plataforma N° 2 del área de lixiviación del proyecto.
- **Objetivo del estudio:** Es lo que se espera lograr con la simulación. Para el presente trabajo, el objetivo es realizar una evaluación estructural general del conjunto.
- **Marco teórico:** Es el fundamento teórico-técnico en el cual se sustenta el estudio. Contiene documentación técnica como especificaciones, estándares, información de sitio y principios físicos que gobiernan el comportamiento del objeto de estudio. Esto brindará información necesaria para poder realizar la simulación.

En el presente trabajo se define el problema en el capítulo 1. En el capítulo presente se establecerá el método para resolverlo y analizar los resultados de los capítulos siguientes.

2.2. Modelo Conceptual

Este modelo representará las características del modelo real. Se debe definir este modelo antes de comenzar a realizar un modelo CAD para la simulación. Dependiendo de la potencialidad del software de diseño se pueden realizar modelos de gran complejidad. De acuerdo a la información recopilada de planos, normas y estándares; se pueden apreciar las características constructivas del sistema. Estas características definirán no solo la forma, sino también el comportamiento de la estructura.

Antes de realizar el modelo conceptual y de plasmarlo en un software CAD es necesario definir lo que uno espera analizar de este. Si se espera realizar un estudio muy detallado sobre puntos característicos como por ejemplo uniones, se debe realizar un modelo conceptual que permita analizar estos detalles. Por otro lado, si lo que se desea

es evaluar el comportamiento general del sistema solo será necesario modelar características representativas de estos detalles, como por ejemplo la rigidez de las uniones y las restricciones que presentan. Esto se puede interpretar como orientar el modelo hacia el objetivo esperado. Para la simulación a realizar, los detalles constructivos tienen un tamaño muy pequeño respecto al conjunto y esto requiere realizar una discretización (en adelante mallado) muy fina en esas zonas. Esto trae como consecuencia un modelo muy elaborado y, en esta ocasión, poco práctico.

2.2.1. Modelo simplificado

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se procederá a realizar las simplificaciones siguientes a fin de cumplir con el objetivo del análisis:

- **Eliminar las aperturas del tanque:** Debido a que las conexiones exteriores presentan la cantidad suficiente de apoyos y grados de libertad, lo cual hace que no se apliquen cargas en estos puntos. En el caso del Manhole y la apertura de descarga, estas boquillas se encuentran reforzadas con una placa adicional de mayor espesor lo cual evitará que se presenten fallas en estas zonas.
- **No considerar silletas de anclaje:** Debido a que la unión entre silleta-tanque tiene un tamaño relativamente pequeño respecto al sistema, se tendría que realizar un mallado muy fino para estudiar este elemento, y su efecto no es significativo.
- **Despreciar efecto de los deflectores:** Conociendo de antemano la carga que estos podrían soportar, se desprecia su efecto sobre las paredes del tanque. Considerarlas requeriría un modelado y mallado detallado en la sección de empalme con el tanque para obtener resultados confiables. La justificación se dará en el capítulo siguiente.
- **No modelar geoméricamente las conexiones:** Para estos casos solo es necesario saber el comportamiento de las conexiones. Estas se modelaron como uniones que limitan ciertos grados de libertad, fijando completamente los cuerpos en algunos casos y en otros permitiendo la rotación alrededor de un eje para no transmitir momentos.
- **Simplificar formas geométricas complejas:** Siempre y cuando sus características no tengan un aporte significativo al sistema. Este es el caso del agitador que para los fines de este trabajo solo aporta características inerciales a sus soportes.
- **Modelar geometría con líneas y superficies:** Esto depende del tipo de análisis a realizar y de los resultados que espera verificar. Se emplean líneas y se asignan a estas propiedades de sección para darle un área y una inercia. Se emplean

superficies y se asigna el espesor para obtener como resultado solo 2 esfuerzos principales considerando que el tercero no es de interés.

Con estas consideraciones se muestra el modelo conceptual simplificado del conjunto. La figura 2.1 muestra el modelo geométrico realizado en el software. Se aprecia que las paredes se modelan como superficies a las cuales se les asignó el espesor correspondiente de diseño y en el caso de los perfiles estructurales, estos se modelan como líneas con sus respectivas propiedades de sección. La esfera representa las características inerciales del agitador como conjunto; estas características se reflejan al soporte del equipo mediante ecuaciones de restricción (fig. 2.2)

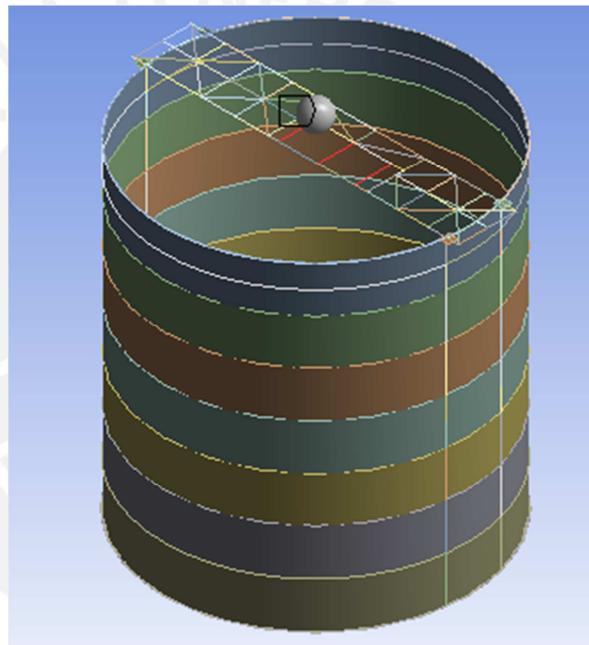


Figura 2.1. Modelo geométrico para la simulación

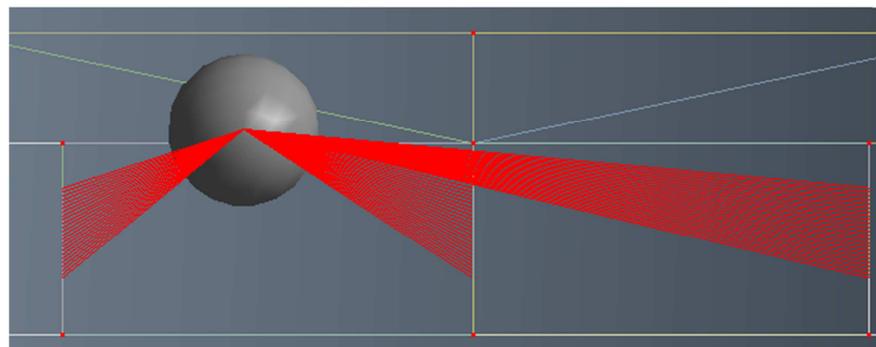


Figura 2.2. Ecuaciones de restricción entre agitador (esfera) y soportes (líneas)

2.3. Mallado

Con la geometría ya definida se procedió a realizar el mallado del conjunto. Para ello se seleccionó el tipo de elemento a emplear. Debido a que la geometría se modeló como líneas y superficies. Se asignaron los siguientes tipos de elementos:

2.3.1. Elementos tipo viga (BEAM)

Se emplea este tipo de elementos el análisis de estructuras hechas de perfiles estructurales. Este elemento está basado en la Teoría de vigas de Timoshenko [ANSYS, 2013] la cual considera efectos de fuerzas cortantes y de rotación en la sección. Este tipo de elemento se emplea cuando las deflexiones son pequeñas. Se puede aplicar para elementos curvos. En este caso se trabajara con elementos totalmente elásticos por lo cual la distribución de momento en la sección será lineal. Cada nodo tendrá 6 grados de libertad: 3 rotaciones y 3 desplazamientos (fig. 2.3).

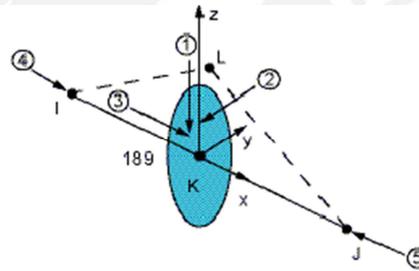


Figura 2.3. Elemento BEAM 189, 3 nodos [ANSYS, 2013]

2.3.2. Elementos tipo placa (SHELL)

Este tipo de elemento es el adecuado para analizar miembros de pared delgada [ANSYS, 2013]. Cada uno de sus nodos tiene 6 grados de libertad. En este elemento el esfuerzo alrededor del espesor es cero. Soporta cargas nodales como presiones superficiales. En el caso de tanques y recipientes a presión se considera que no existe componente radial en los esfuerzos, por ello este elemento resulta adecuado (fig. 2.4).

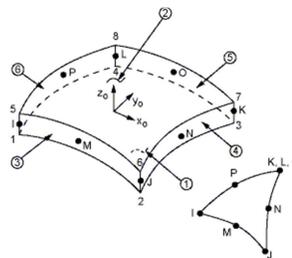


Figura 2.4. Elemento SHELL 281, 8 nodos [ANSYS, 2013]

2.3.3. Conjunto mallado

Se presenta el conjunto mallado con los elementos seleccionados (fig. 2.5 y 2.6):

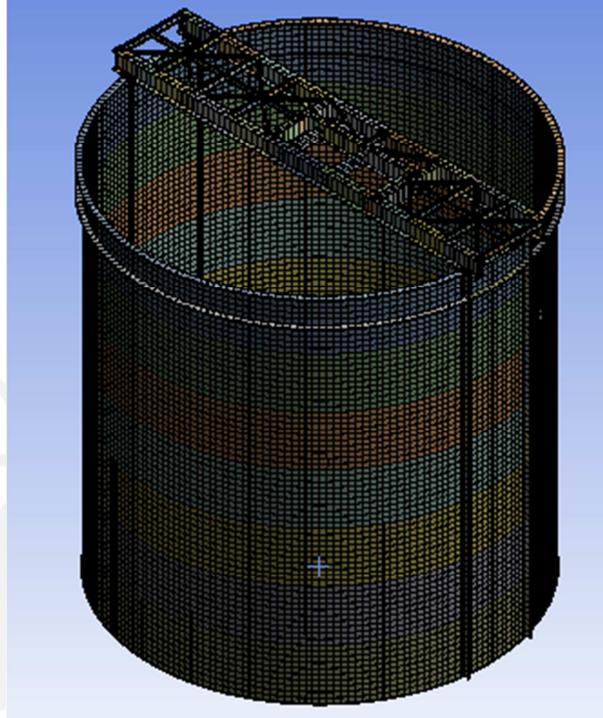


Figura 2.5. Conjunto mallado

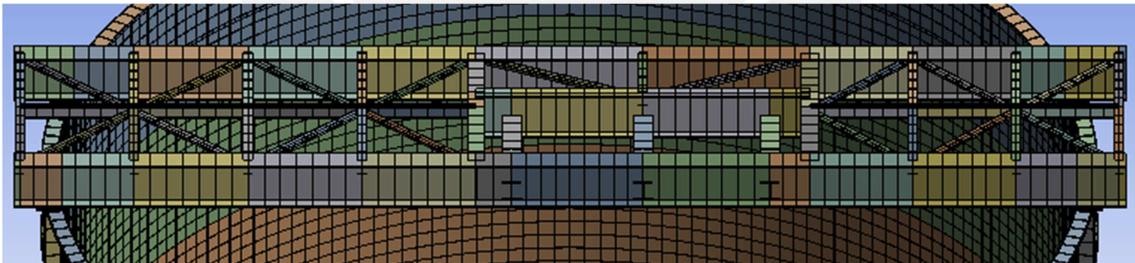


Figura 2.6. Detalle superior de la plataforma

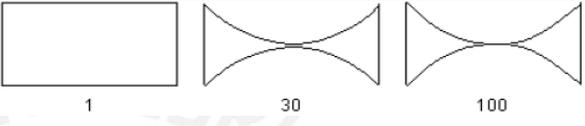
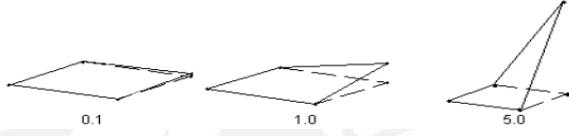
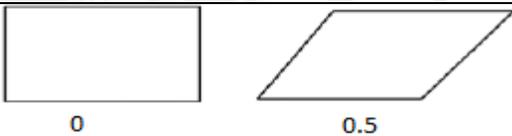
2.3.4. Calidad de malla

Se debe verificar la calidad de la malla. Algunos factores que determinan la calidad de la malla que se aplican a elementos tipo placa son los siguientes [ANSYS, 2013]:

- **Calidad de elemento:** Se basa en la relación de volumen/longitud. Toma valores entre 0 y 1 siendo este último un cubo o cuadrado perfecto.

- **Otros factores:** Se muestran otros factores en la tabla 2.1. Mientras más se acerquen los elementos a formas cuadradas en un plano, más confiables serán los resultados.

Tabla 2.1. Factores de calidad de malla

| Factor | Definición |
|-----------------------|--|
| Ratio de aspecto |  |
| Ratio Jacobiano |  |
| Factor de deformación |  |
| Desviación paralela |  |
| Oblicuidad |  |

A continuación se muestran las características de la malla generada para el conjunto:

Tabla 2.2. Características de la malla

| Generales | | | | |
|--------------------------------------|------------|-----------|------------|-----------------|
| Nodos | | | | 66185 |
| Elementos | | | | 21509 |
| Características métricas de la malla | | | | |
| Parámetro | Mínimo | Máximo | Promedio | Desviación std. |
| Calidad de elemento | 0.142 | 0.999 | 0.923 | 0.125 |
| Ratio de aspecto | 1 | 5.039 | 1.121 | 0.245 |
| Ratio Jacobiano | 1 | 16.306 | 1.276 | 0.841 |
| Factor de deformación | 0 | 9.567 E-3 | 8.995 E-07 | 1.890 E-05 |
| Desviación paralela | 0 | 118.28 | 4.939 | 9.033 |
| Oblicuidad | 1.306 E-10 | 0.905 | 8.552 E-02 | 0.126 |
| Calidad ortogonal | 0.384 | 1 | 0.982 | 4.4418 E-02 |

2.4. Condiciones de borde

Se definen a continuación las siguientes condiciones de borde:

- **Soporte fijo en el piso:** Este soporte fija la base del tanque. Es la condición dada por las silletas de anclaje donde la base no desliza ni gira sobre el piso (fig. 2.7).

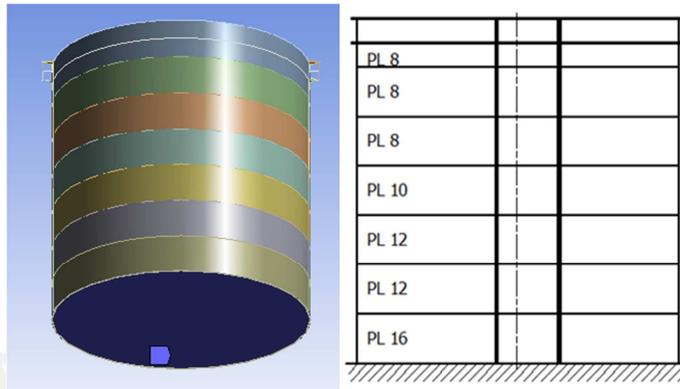


Figura 2.7. Soporte fijo en base del conjunto (azul, izq.), conceptual (der.)

- **Conexiones:**

- **Conexiones tipo rígidas (bonded/fixe):** Este tipo de conexión restringe los 6 grados de libertad entre elementos, equivale a un empotramiento. Se empleó para las uniones de la plataforma como el soporte del agitador, donde las uniones con las vigas principales se realizan empleando cordones por todo el contorno y también atiesadores (fig. 2.8 izq).
- **Conexiones tipo articuladas (revolute):** Permiten un grado de libertad (rotación alrededor de un eje). Este tipo de uniones se emplean en casi toda la plataforma para evitar transmitir momentos entre elementos (fig. 2.8 der).

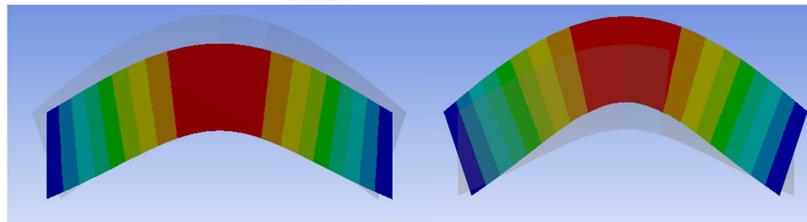


Figura 2.8. Viga sometida a la misma carga. Empotrada (izq.) y articulada (Der.)

- **Cargas:**

- **Presiones:** Se aplica este tipo de carga sobre las paredes del tanque. Esta puede ser constante o variable sobre toda la superficie.

- **Fuerzas:** Se aplican las fuerzas sobre los perfiles estructurales. Las cargas pueden ser fuerzas distribuidas o cargas nodales.
- **Aceleraciones:** Para cargas como el peso o cargas sísmicas se aplicarán aceleraciones en las direcciones correspondientes. Las cargas se generan debido a la fuerza ejercida por estas aceleraciones.
- **Combinaciones de carga:** Estas combinaciones se realizan de acuerdo a lo mencionado en las respectivas normas de diseño. Se deben evaluar todas las combinaciones de carga aplicables a este conjunto.

2.5. Solución

El programa se encargará de ensamblar la matriz de rigidez global, se establecerán todas las condiciones de borde y el software resolverá el sistema. Dado que se realizará un análisis lineal en el rango elástico del material no será necesario realizar iteraciones en el modelo, pues este se resolverá de manera directa.

2.6. Post-procesamiento

Se evaluarán los resultados obtenidos en la simulación. Dependiendo del tipo de análisis a realizar se emplearán distintos tipos de herramientas para la evaluación; en algunos casos los resultados son el parámetro de entrada para evaluaciones posteriores.

2.6.1. Análisis estático del tanque

Se verificará el tanque de acuerdo a la norma API 650 [API, 2010] (fig.2.9).

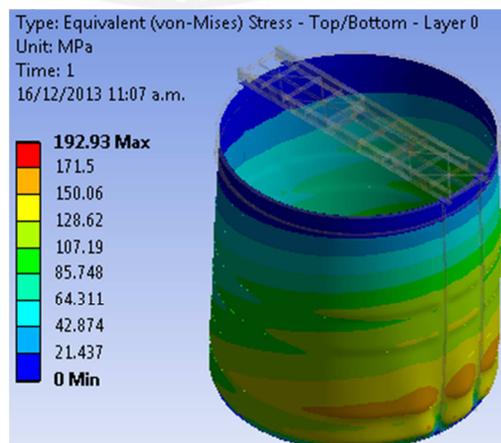


Figura 2.9. Ejemplo de estado de esfuerzos del tanque

2.6.2. Análisis estático de los perfiles estructurales

El objetivo de la simulación es verificar que no se sobrepase el estado límite de la estructura para ninguna de las combinaciones de carga. Para ello se determinarán los diagramas de cargas internas para cada elemento y las reacciones en las uniones, también se evaluarán las deflexiones en estos componentes. Esto servirá de input para realizar las verificaciones pertinentes de acuerdo a la norma [AISC, 2010] (fig. 2.10).

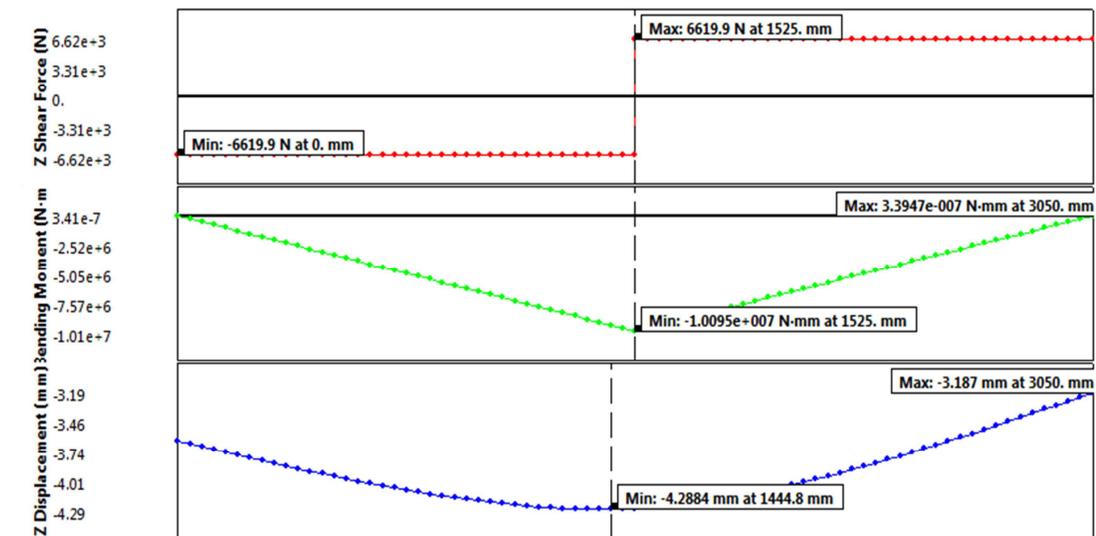


Figura 2.10. Diagrama de fuerzas internas

2.6.3. Análisis dinámico

Se determinarán las frecuencias naturales de vibración para el sistema y sus respectivos modos de vibración. Se debe verificar en primera instancia que ninguna de estas frecuencias este cerca a alguna de las frecuencias de excitación generadas por el agitador en el respectivo modo.

2.6.4. Contraste teórico de los resultados

Se deberá realizar un cálculo analítico para poder verificar que el método empleado es confiable. Si al comparar los resultados se observa que los resultados se aproximan lo suficiente se puede afirmar que la simulación es válida. Se contrastará la simulación con un cálculo analítico basado en el marco teórico del capítulo 1.

Capítulo 3: Análisis estático del conjunto

En este capítulo se realizará el análisis estático del conjunto. Para tal objetivo el capítulo comenzará definiendo un modelo conceptual en base al modelo físico real, que representará su comportamiento. Una vez definido, se modelará y analizará cada carga por separado; posteriormente se evaluará la estructura realizando las combinaciones de carga requeridas tanto para el tanque como para la plataforma. Para el caso del Tanque el análisis se realizará según la norma API 650 [API, 2010] y para el caso de la plataforma se realizará según la norma AISC 360 [AISC, 2010].

3.1. Modelo conceptual de la estructura

3.1.1. Representación conceptual del tanque

El tanque es un equipo que estará sometido principalmente a cargas de presión interna en sus paredes. Este tipo de recipientes de pared delgada están sometidos a esfuerzos circunferenciales y axiales; los primeros debido a la presión del fluido y los otros debido a cargas en el eje vertical. Los esfuerzos debido a la presión generan una expansión circunferencial en las paredes que consecuentemente generará una deformación radial del tanque.

En algunos puntos de la pared del tanque se contará con elementos de refuerzo y soporte. Este es el caso de las 4 columnas de soporte de la plataforma las cuales irán soldadas a la pared; esto causará que la pared no pueda expandirse radialmente de manera uniforme donde se encuentren las columnas y esto concentrará esfuerzos en el tanque. En la parte superior se tienen los dos anillos de refuerzo hechos a base de perfiles rolados los cuales van soldados a la pared del tanque; en esta zona el tanque no estará sometido a altas presiones internas, los anillos brindarán una mayor rigidez circunferencial pero permitirán una expansión uniforme. En la base del tanque, se tendrán 36 silletas de anclaje que fijarán el tanque con el suelo, las cuales restringirán todo grado de libertad en la base del tanque.

El modelo conceptual del tanque se define por el tipo de uniones entre sus elementos y por los elementos que brinden rigidez y lo fijen al suelo. Las uniones de pared del tanque, tanto horizontales y verticales, serán soldadas a tope lo cual garantiza la continuidad por lo que se modelará una pared continua con cambios de espesor donde

corresponda. No es necesario considerar aperturas puesto que todas estas vienen reforzadas y presentan apoyos suficientes para no sobrecargar al tanque. Se modelarán las columnas y los anillos de refuerzo unidos a la pared para evaluar el efecto que causan sobre las paredes. En lugar de modelar las silletas de anclaje, se modelará al tanque con una condición de empotramiento en su base, restringiendo así todo grado de libertad (fig. 3.1).

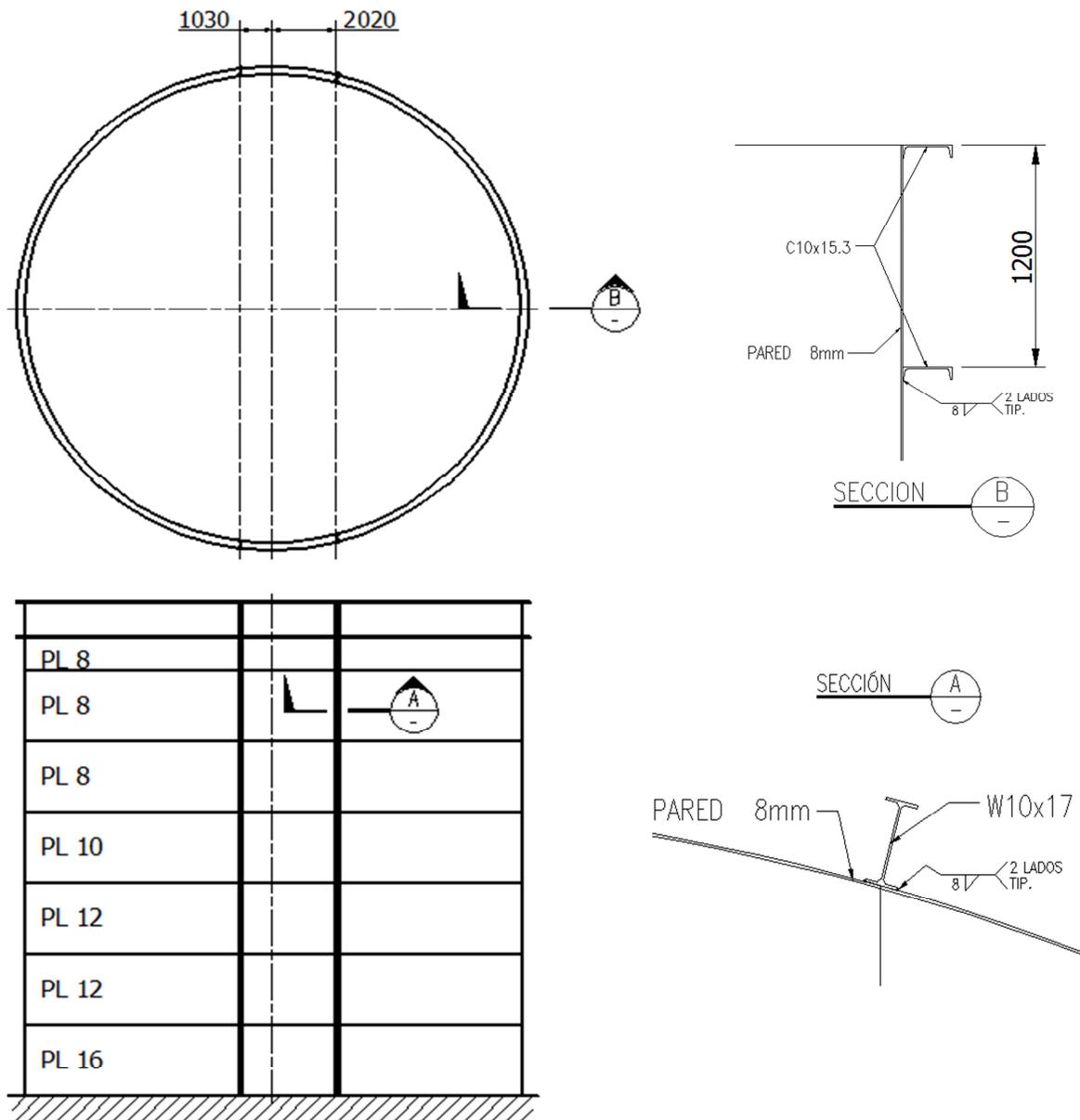


Figura 3.1. Representación conceptual del tanque. Elaboración propia

3.1.2. Representación conceptual de la plataforma

La representación conceptual de la plataforma sigue el mismo principio que el explicado en la sección anterior. Se elaborará el modelo conceptual de cada componente dependiendo de su función y comportamiento. Finalmente el comportamiento final estará dado por la superposición de efectos de cada componente. Basados en el modelo inicial mostrado en los planos (revisar Anexo C), se identifican los siguientes elementos.

- **Vigas principales:** Su función es soportar toda la plataforma. Está conformada por dos vigas principales W30x191. Estas se encuentran simplemente apoyadas ya que permiten el giro en ambos ejes principales. En el plano XY soportan el peso de la plataforma y la carga axial del agitador. Su representación es la siguiente (fig. 3.2):

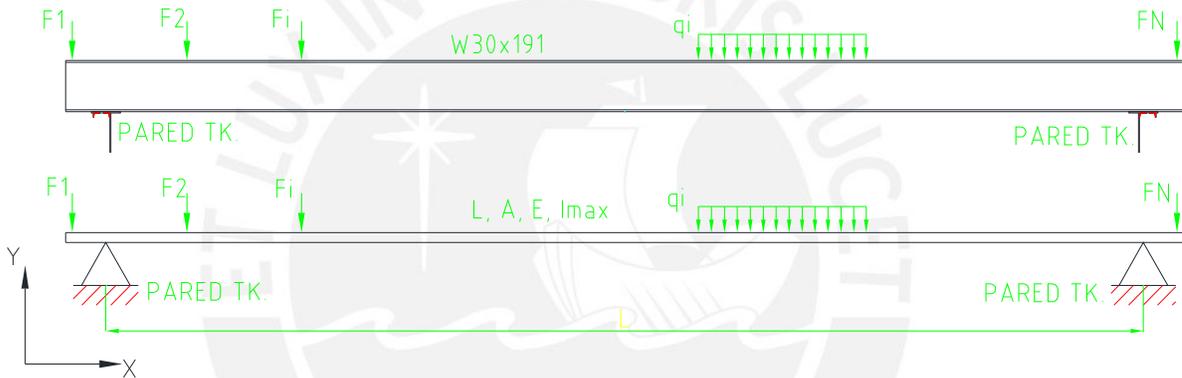


Figura 3.2. Representación viga principal, plano XY

En el plano XZ Soportan cargas laterales (vientos, sismos, carga viva). Pero debido al tipo de unión, la representación conceptual sigue siendo la misma (fig. 3.3). En esta plataforma se dispone también de vigas que distribuyen las cargas del agitador hacia las vigas principales (W30x132).

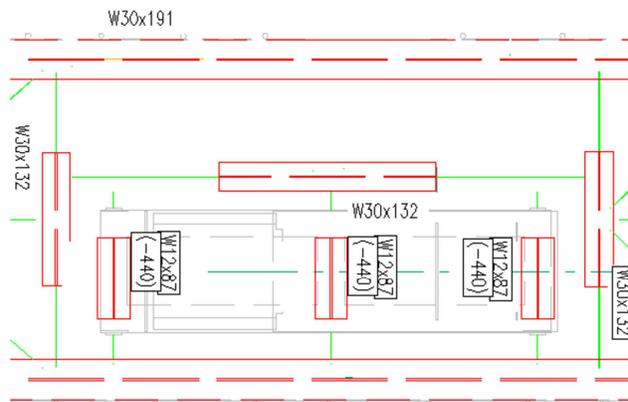


Figura 3.3. Perfiles de apoyo y distribución (W30x132)

Su representación conceptual para cada una de ellas será la misma que en el caso anterior, es decir simplemente apoyadas.

- Viguetas longitudinales:** Su función es soportar a las parrillas de piso, las cuales también se apoyan en las vigas principales. La función de estos elementos es soportar la carga viva en la plataforma, la cual se considera uniformemente distribuida. La conforman perfiles W8x10, los cuales van unidos a las vigas transversales mediante uniones que se pueden considerar articuladas (fig. 3.4).

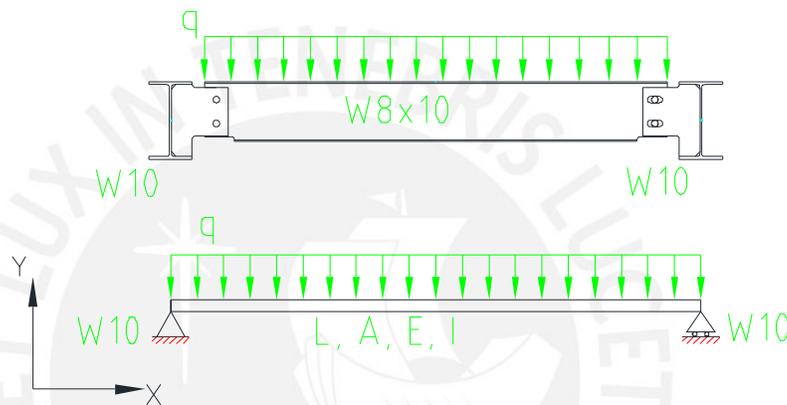


Figura 3.4. Representación de viguetas longitudinales

- Viguetas transversales:** Dispuestas de manera transversal, estas soportan las cargas de las viguetas longitudinales y de los arriostres, para transmitirlos a las vigas principales. La conforman perfiles W10 y su representación es la siguiente (fig. 3.5):

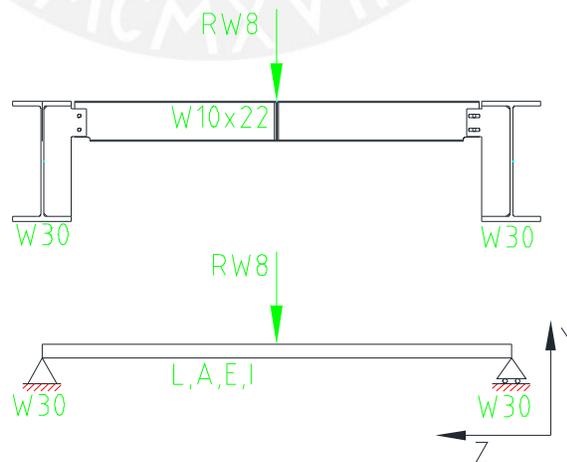


Figura 3.5. Representación de viguetas transversales

- **Viga soporte del agitador:** Estas vigas soportan el bastidor del agitador, motivo por el cual deben garantizar la rigidez suficiente del equipo. Esto se logra mediante una unión que impida el giro relativo entre soporte y viga principal, por lo cual esta unión se puede considerar como un empotramiento (fig. 3.6).

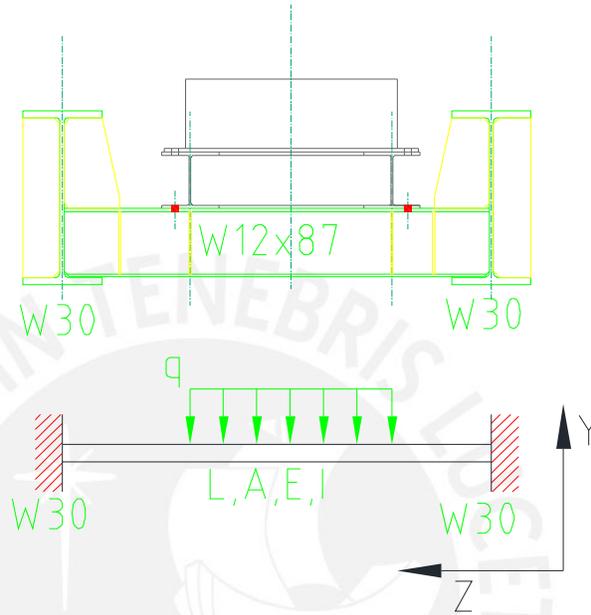


Figura 3.6. Representación conceptual viga de soporte del agitador

- **Arriostres:** Estos elementos cumplen la función de brindar rigidez a la estructura. Debido al tipo de unión que presentan se considera que solamente trabajan bajo cargas axiales. En el modelo se trabajará con perfiles rolados en tipo WT (fig. 3.7).

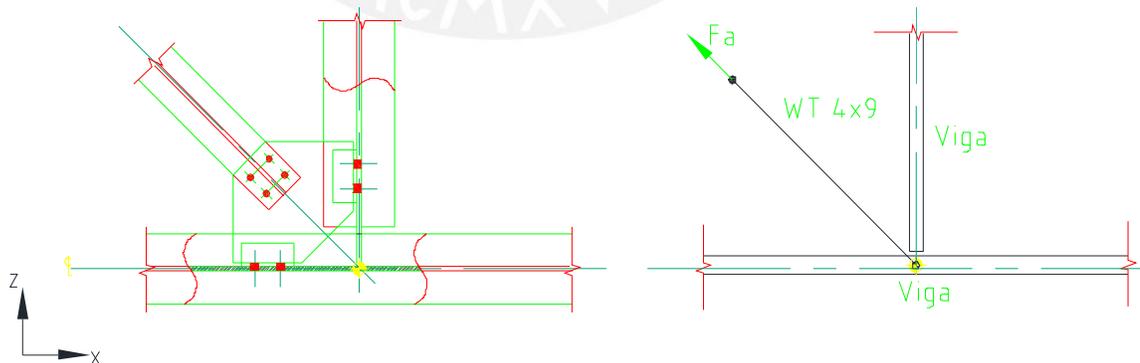


Figura 3.7. Representación conceptual de arriostres

3.2. Modelado de cargas

Una vez definida la geometría se procede a realizar el modelado de las cargas. En este capítulo se modelará cada carga por separado de manera analítica y mediante el método de elementos finitos. De esta manera se contrastarán los resultados y se determinara que cargas se pueden despreciar, para así simplificar el análisis.

3.2.1. Carga Muerta (D)

La carga muerta en este caso la comprende el peso de la estructura y del agitador. Esta carga es importante para la plataforma y para el apoyo del último nivel del tanque. En la figura 3.8 se muestra la ubicación apoyos de la plataforma y los centros de masa de la plataforma y el agitador. El sistema de referencia se encuentra en el centro del tanque.

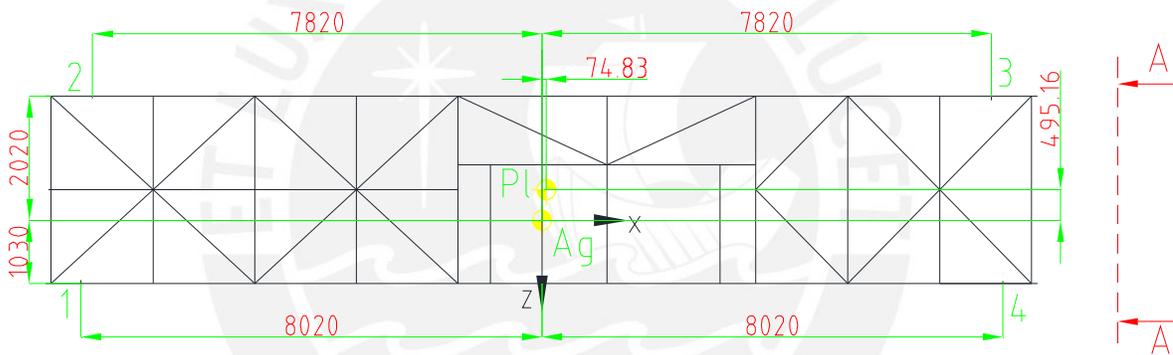


Figura 3.8. Ubicación de apoyos y centros de masa de la plataforma y agitador

Con los datos mostrados en la figura anterior se traslada la carga a su centro de masa. Las reacciones verticales $R_1=R_4$, $R_2=R_3$ se calcularán realizando un equilibrio estático con la carga equivalente W_p (fig. 3.9), los resultados se muestran en la tabla 3.1.

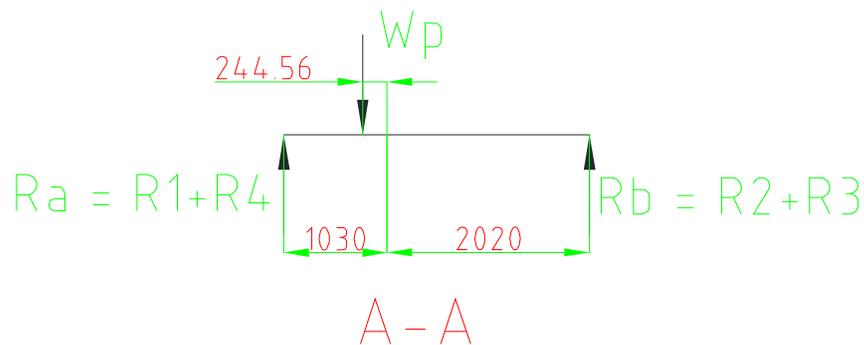


Figura 3.9. Carga equivalente y reacciones

Tabla 3.1. Comparación de resultados

| Masas y centros de gravedad | | | |
|-----------------------------|-----------|----------|-----------|
| | Masa (kg) | (X) (mm) | (Z) (mm) |
| Agitador | 13501 | 0 | 0 |
| Plataforma | 13784 | 74.82 | -494.26 |
| Equivalente | 27285 | 37.02 | -224.56 |
| Reacciones de apoyos | | | |
| Reacciones (N) | Analítico | MEF | Error (%) |
| R1 | 77878 | 76836 | 1.34 |
| R2 | 55907 | 55082 | 1.48 |
| R3 | 55907 | 56320 | 0.74 |
| R4 | 77878 | 78700 | 1.06 |

3.2.2. Carga Viva (L)

La carga viva está dada por las cargas generadas por el agitador, tanto sobre el tanque como sobre la plataforma. Estas cargas han sido tomadas de los datos brindados por el fabricante del equipo. A continuación se modelarán las cargas y se analizará su efecto sobre la estructura.

- **Torque:** Esta carga se debe al momento resistente que ofrece el fluido al ser agitado. Se transmite mediante el eje del impulsor y lo soporta el bastidor del equipo, el cual lo transfiere a las vigas de soporte de la plataforma. Realizando un DCL sobre estos 3 componentes se calcula la fuerza que soporta cada viga (fig. 3.10):

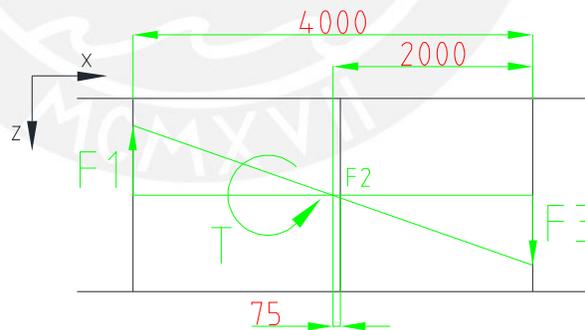


Figura 3.10. Distribución torque en vigas soporte

La fuerza de reacción en las vigas soporte será una carga axial la cual será proporcional a la distancia de la línea media, d_i , entonces:

$$\frac{F_1}{d_1} = \frac{F_2}{d_2} = \frac{F_3}{d_3} \tag{Ec. 3.1}$$

Además:

$$T = F_1 * d_1 + F_2 * d_2 + F_3 * d_3 = 84852 \text{ N} - m \tag{Ec. 3.2}$$

Se aplica el mismo torque en el software (fig. 3.11) y se obtienen los resultados en la tabla 3.2:

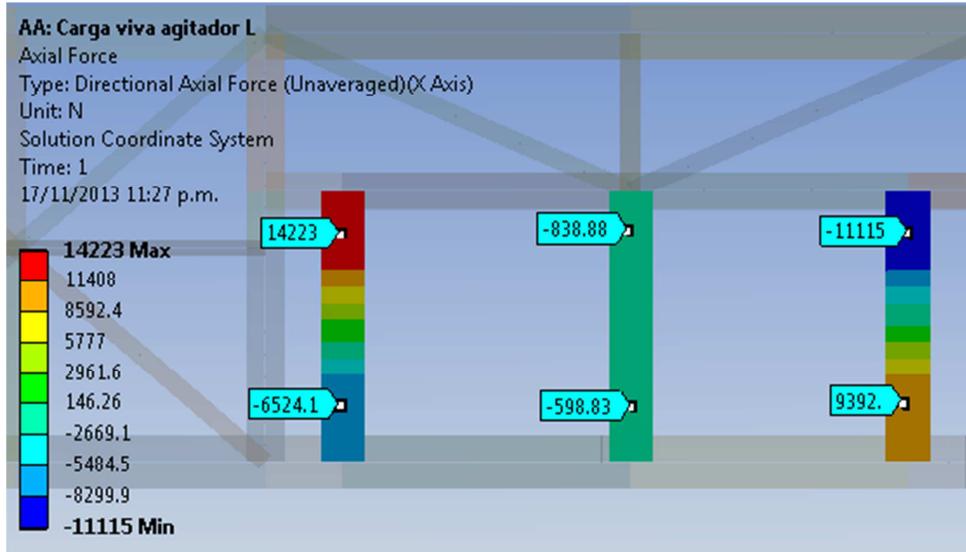


Figura 3.11. Distribución de cargas mediante MEF.

Tabla 3.2. Comparación de resultados

| Fuerza (N) | Analítico | MEF | Error (%) |
|------------|-----------|---------|-----------|
| F1 | 21304 | 20747.1 | 2.61 |
| F2 | 277.57 | 240.0 | 13.5 |
| F3 | 20887 | 20507 | 1.82 |

- **Empuje axial sobre la plataforma:** En este tipo de agitadores se empuja el fluido hacia abajo y la reacción sobre el soporte será una carga ascendente. Esto es favorable para la plataforma ya que en funcionamiento esta carga contrarresta al peso (fig. 3.12).

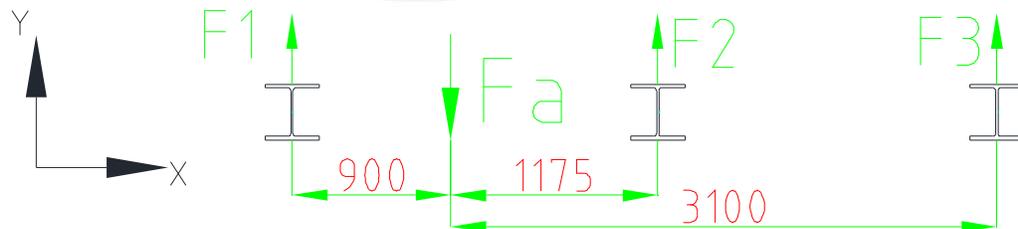


Figura 3.12. DCL empuje axial

Considerando que la reacción en los soportes es mayor a medida que la distancia “ d_i ” es menor:

$$F_1 d_1 = F_2 d_2 = F_3 d_3 \tag{Ec. 3.3}$$

Planteando ecuaciones de equilibrio y resolviendo se ven los resultados en la tabla 3.3

Tabla 3.3. Comparación de resultados

| Fuerza (N) | Analítico | MEF | Error (%) |
|------------|-----------|--------|-----------|
| F1 | 130623 | 133698 | 2.35 |
| F2 | 76636 | 71948 | 6.12 |
| F3 | 10703 | 12317 | 15.00 |

- Carga sobre los deflectores:** Debido a efectos de la viscosidad el fluido tendrá una componente de velocidad tangencial con su máximo valor en el extremo del impeler e igual a cero en las paredes del tanque (fig. 3.13). Se calcula entonces la fuerza sobre cada uno de estos deflectores (tabla 3.4).

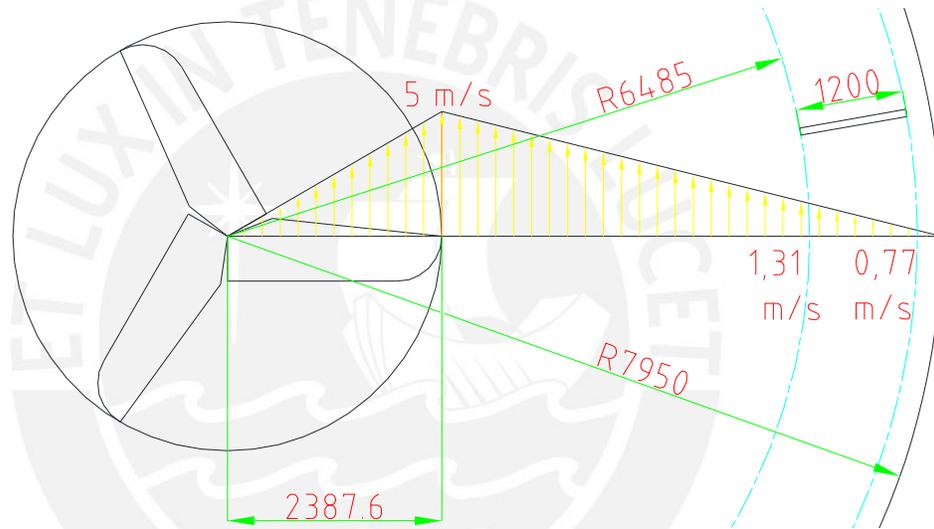


Figura 3.13. Velocidad tangencial del fluido

Tabla 3.4. Fuerzas sobre deflectores

| Calculo de fuerzas sobre deflectores | | |
|--|----------------|--------------|
| Parámetro | unidad | valor |
| Velocidad promedio | m/s | 0.7778 |
| Altura del deflector | m | 15.3 |
| Ancho del deflector | m | 1.2 |
| Área de deflector | m ² | 18.36 |
| Flujo másico del fluido sobre el deflector | kg/s | 20559 |
| Fuerza aplicada a cada deflector | N | 15987 |
| Fuerza aplicada a cada deflector | t | 1.630 |

Como se puede apreciar, la fuerza no es significativa comparada con las dimensiones del deflector. Asimismo, este perfil de velocidades se desarrolla solo a la altura del impeler siendo la velocidad menor a distintas alturas. Por esta razón **no se considerará dentro del modelo los deflectores ni la carga sobre ellos.**

3.2.3. Carga viva en la plataforma (Lp)

Es la carga viva de diseño supuesta para la plataforma. Para el proyecto se aplica una carga en la plataforma de 500kg/m^2 . Esta carga se distribuye a través de las parrillas de piso aplicando el concepto de cargas tributarias [Hibbeler, 1999] (fig. 3.14).

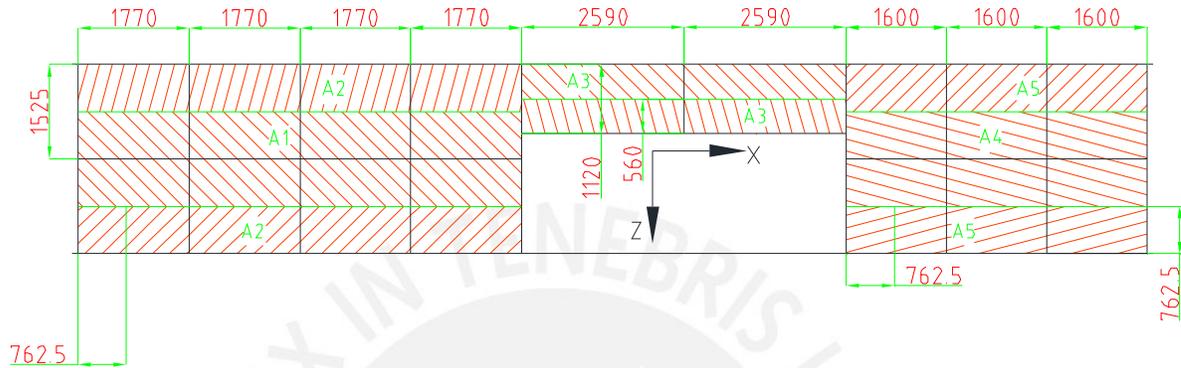


Figura 3.14. Distribución de carga viva en la plataforma

Tabla 3.5. Carga tributaria para cada área de la fig. 3.14

| Cálculo cargas tributarias | Área | Carga viva | Carga viva |
|----------------------------|----------------|--------------|---------------|
| | m ² | kg | N |
| A1 | 10.8 | 5399 | 52959 |
| A2 | 5.40 | 2699 | 26480 |
| A3 | 2.90 | 1450 | 14228 |
| A4 | 7.32 | 3660 | 35905 |
| A5 | 3.66 | 1830 | 17952 |
| Total | 45.60 | 24799 | 243278 |

Se elaboran los diagramas de fuerzas cortantes y momentos para perfiles W8 (fig. 3.15):

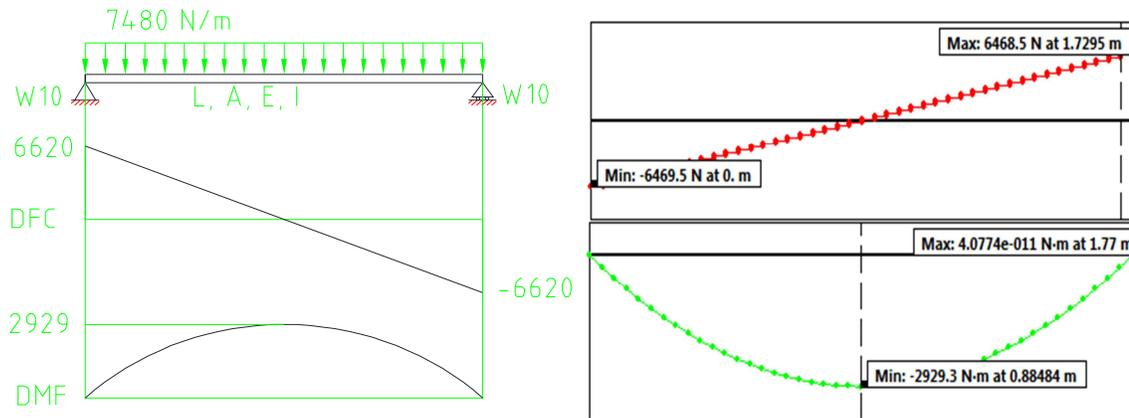


Figura 3.15. Diagrama de fuerzas internas para un perfil W8. Izq. Analítico, derecha MEF

De la misma manera se transmiten las reacciones a las vigas transversales y estas a las vigas principales. El **software empleado en este trabajo emplea otra convención de signos**, por ello los diagramas tienen sentidos opuestos.

3.2.4. Carga de nieve (S)

Esta carga se aplica de la misma manera que la carga anterior. Según criterios del proyecto se aplicará una carga equivalente a una presión de 0.4kPa, esto es equivalente a una carga de 41kg/m². Esta carga es despreciable respecto a la carga anterior Lp. Además en las combinaciones de carga en las que participa, su factor de ponderación es menor a 1. Por estos motivos **se desprecia esta carga**.

3.2.5. Carga de viento (W)

La fuerza ejercida por el viento al impactar la estructura genera cargas que posiblemente afecten a la estabilidad de la estructura. Se modelan estas cargas de acuerdo a lo establecido en las normas API 650 [API, 2010] y NTE E020 [MVCS, 2006].

- **Para el tanque**, se aplica sobre las paredes la siguiente presión:

$$P = 0.86 \left(\frac{V}{190} \right)^2 \quad (kPa) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde V es la velocidad de diseño, en este caso V=75km/h. Por lo tanto:

$$P = 0.134 \text{ kPa}$$

Siendo el área proyectada para esta presión, y también la fuerza horizontal ejercida:

$$A_p = DH = 15.9 * 16.8 = 267.12 \text{ m}^2$$

$$F_t = P * A_p = 35794 \text{ N}$$

- **Para la plataforma**, la velocidad de diseño modificada V_h [MVCS, 2006] será:

$$V_h = V(h/10)^{0.22} = 75 * 1.7^{0.22} = 84.28 \text{ km/h}$$

La presión ejercida horizontalmente en la plataforma (en vigas principales) será:

$$P_h = 0.005 * C * V_h^2 = 0.005 * 1.5 * 84.28^2 = 53.28 \text{ kg/m}^2$$

La fuerza ejercida en la plataforma será:

$$A_p = L * H = 17.26 * 0.777 = 13.41 \text{ m}^2$$

$$F_p = P_h * A_p = 7009 \text{ N}$$

Estas fuerzas son prácticamente despreciables. Solo se tomarán en cuenta para el análisis de estabilidad al volteo para el tanque, en el cálculo de anclajes.

3.2.6. Presión del fluido (F)

Esta carga está dada por la presión hidrostática del fluido en las paredes del tanque. La cual genera esfuerzos circunferenciales en las paredes; estos se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_t = \frac{Pr}{t} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Dónde:

- **P** es la presión en la altura a evaluar, en este caso $P=\rho gh$
- **ρ** es la densidad del lodo, **g** la gravedad y **h** la profundidad.
- **r** es el radio del tanque
- **t** es el espesor de la pared en la altura correspondiente

Tabla 3.6. Comparación de resultados

| Profundidad m | Presión Pa | t mm | Esfuerzo MPa | Esfuerzo MEF MPa | Error % |
|------------------|---------------|---------|-----------------|---------------------|------------|
| 16 | 226022 | 16 | 112 | 114 | 1.79 |
| 13.6 | 192119 | 12 | 127.2 | 126.4 | 0.63 |
| 11.2 | 158215 | 12 | 104.81 | 107 | 2.09 |
| 8.8 | 124312 | 10 | 98.82 | 98.21 | 0.62 |

3.2.7. Presión hidrostática de prueba (Ht)

En tanques soldados, es usual realizar una prueba hidrostática llenándolo con agua antes de que la estructura entre en servicio. Debido a que el lodo que procesará será de mayor densidad que el agua ($\rho=1440\text{kg/m}^3$) esta carga **no será tomada en cuenta**.

3.2.8. Carga sísmica (E)

Se modelará la carga sísmica de acuerdo a lo establecido tanto en el apéndice E de la norma API 650, para el tanque, y en la NTE E030, para la plataforma. Para este tipo de proyectos es necesario conocer las condiciones de terreno, por tal motivo se realiza un estudio geológico del terreno del cual se extrae información necesaria para el análisis. Para el caso del tanque se calcularán los efectos sísmicos del fluido sobre las paredes, esfuerzos normales de compresión vertical y también la estabilidad al volteo. Para la plataforma se modelarán las cargas mediante el método de la cortante basal.

3.2.8.1. Carga sísmica para el tanque

Los parámetros sísmicos calculados en base a la norma API 650 se muestran en la tabla 3.7. En el anexo A del presente trabajo se detalla el cálculo.

Tabla 3.7. Resultados parámetros sísmicos

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--|-------------------|---------------|
| Grupo de USO sísmico SUG | | II |
| Aceleración Pico del terreno (Sp) | %g | 0.4 |
| Amplitud máxima para sismos de periodos cortos (Ss) | %g | 1 |
| Amplitud máxima para sismos de periodos de 1s (S1) | %g | 0.5 |
| Clase de sitio | | D |
| Coefficiente de sitio Fa (aceleración) | | 1.1 |
| Coefficiente de sitio Fv (velocidad) | | 1.5 |
| Altura de diseño (H) | m | 16.3 |
| Diámetro del tanque (D) | m | 15.9 |
| Relación H/D | | 1.025 |
| Coefficiente Ci | | 6.2 |
| Espesor equivalente del tanque (tu) | mm | 10.571 |
| Densidad del fluido | kg/m ³ | 1440 |
| Módulo de elasticidad del Acero | GPa | 210 |
| Periodo impulsivo (Ti) | s | 0.230 |
| Coefficiente Ks | | 0.578 |
| Periodo convectivo (Tc) | s | 4.151 |
| Factor de reducción (Q) | | 1 |
| Factor de reducción de carga impulsiva (Rwi) | | 4 |
| Factor de reducción de carga convectiva (Rwc) | | 2 |
| Factor de importancia (I) | | 1.25 |
| Coefficiente para ajuste de aceleración (K) | | 1.5 |
| Periodo mayor del suelo (TL) | s | 4 |
| Ts | | 0.682 |
| Aceleración impulsiva (Ai) | %g | 0.344 |
| Aceleración convectiva (Ac) | %g | 0.163 |
| Centro masa carga impulsiva (Xi) | m | 6.655 |
| Centro de masa carga convectiva (Xc) | m | 12.164 |

De estos resultados se tomarán las aceleraciones Impulsiva y Convectiva para realizar el análisis dinámico del fluido. Cada una de estas componentes generará esfuerzos circunferenciales en la pared del tanque que dependen de las aceleraciones (Ai, Ac), la gravedad específica (G), el diámetro (D) y la profundidad (Y). Se calculan de esta manera:

- Para $Y < 0.75D$:
$$N_i = 5.22A_iGD^2 \left(\frac{Y}{0.75D} - 0.5 \left(\frac{Y}{0.75D} \right)^2 \right) \quad \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (\text{Ec. 3.6})$$

- Para $Y > 0.75D$:
$$N_i = 2.6A_iGD^2 \quad \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (\text{Ec. 3.7})$$

- Para ambos casos:
$$N_c = 1.85A_cGD^2 \left(\frac{\cosh \frac{3.68(H-Y)}{D}}{\cosh \frac{3.68H}{D}} \right) \quad \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (\text{Ec. 3.8})$$

- El esfuerzo será:
$$\sigma_{t(Y)} = \frac{\pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2}}{t_{(Y)}} \quad [MPa] \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Los datos se ingresarán y modelarán como presiones. Por lo tanto la fórmula de esfuerzo circunferencial (Ec. 3.5) se modificará a:

$$P_{(Y)} = \frac{\sigma_{t(Y)} * 2t_{(Y)}}{D} = \frac{2 * (N_i \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2})}{D} \quad [MPa] \quad (\text{Ec. 3.10})$$

La distribución de presiones para cualquier profundidad (Y) durante un sismo se muestra en la figura 3.16, extraída de la norma ACI 350.3 [ACI, 2006]:

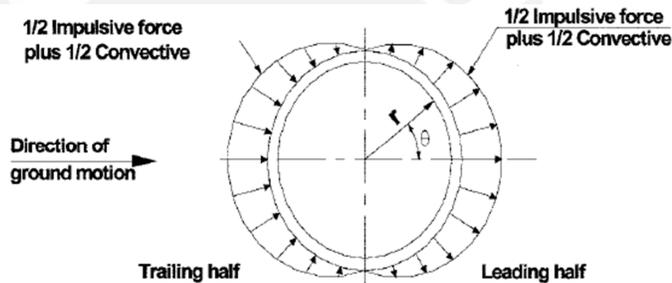


Figura 3.16. Distribución de presiones en la pared de un tanque circular [ACI, 2006]

Graficando la Presión máxima en función de la altura medida desde el fondo se obtiene lo mostrado en la figura 3.17. Se comparan resultados en la tabla 3.8,

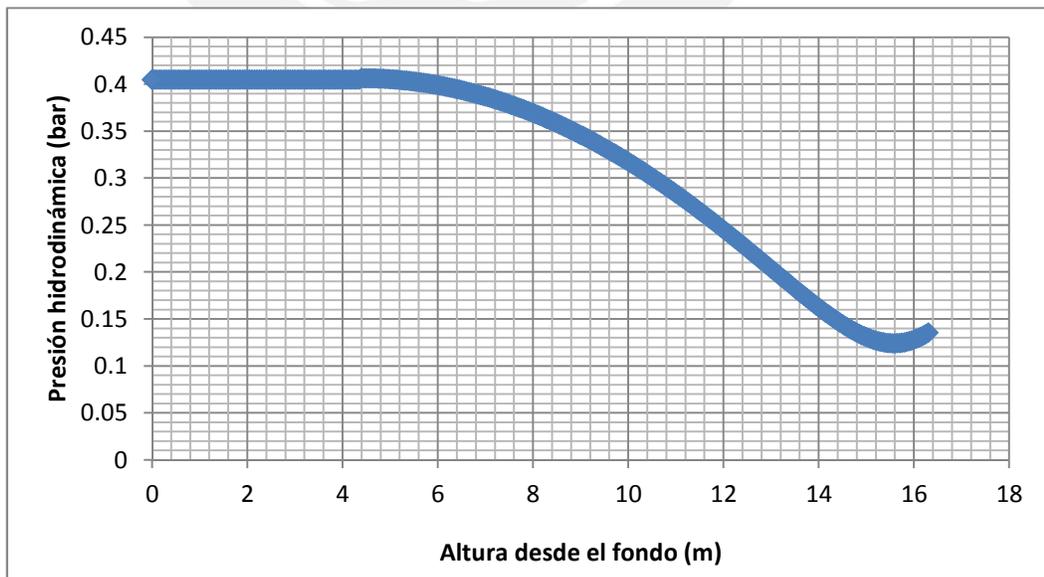


Figura 3.17. Presión máxima en las paredes vs. Altura desde el fondo

Tabla 3.8. Comparación de resultados

| Y (m) | Ni (N/mm) | Nc (N/mm) | Nt (N/mm) | t (mm) | Esf (MPa) | MEF (MPa) | Error (%) |
|-------|-----------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-------------|
| 2.3 | 325.36 | 5.785 | 325.41 | 16 | 20.34 | 22.63 | 9.64 |
| 3.3 | 325.36 | 6.070 | 325.43 | 12 | 27.12 | 26.91 | 0.77 |
| 4.7 | 326.37 | 8.347 | 326.48 | 12 | 27.29 | 26.86 | 1.58 |
| 7.3 | 303.62 | 13.87 | 303.94 | 10 | 30.39 | 29.01 | 4.54 |

Se someterá al conjunto a una aceleración A_i para calcular la cortante basal y con ella el momento resistente M_{rw} . Y se compararon estos datos con el procedimiento establecido en la norma (tabla 3.9).

Tabla 3.9. Cortante basal y momento resistente

| | Según Norma | Usando A_i (MEF) | Error (%) |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| Cortante Basal (N) | 1.291×10^7 | 1.27×10^7 | 1.63 |
| Momento resistente (N.m) | 8.804×10^7 | 8.460×10^7 | 3.91 |

3.2.8.2. Carga sísmica para la plataforma

De la misma manera que en el caso anterior se determina la cortante basal. Para la plataforma se determinan los parámetros sísmicos (tabla 3.10). La cortante basal (V) se determina aplicando la siguiente expresión:

$$V = \frac{ZUSC}{R} P \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Lo cual se traduce como una carga proporcional al peso P multiplicada por un factor ($ZUSC/R$). Esto significa que la cortante es originada por una aceleración que será equivalente a una fracción de la aceleración de la gravedad.

Tabla 3.10 Parámetros sísmicos según NTE E.030

| Parámetro | unidad | Valor |
|---|--------|------------|
| Factor de zona (Z) | | 0.4 |
| Tipo de suelo | | S2 |
| Periodo fundamental del suelo (T_p) | s | 0.6 |
| Factor de suelo (S) | | 1.2 |
| Periodo vibracional | s | 0.22 |
| Factor de amplificación sísmica (C) | | 2.5 |
| Factor de importancia (U) | | 1.5 |
| Factor de reducción (R) | | 6 |
| C/R | | 0.41666667 |
| ZUSC/R | | 0.3 |

Por lo tanto la aceleración sísmica que origina la cortante es:

$$S_a = \frac{ZUSC}{R}g = 0.3g = 2.943 \text{ m/s}^2$$

Sin embargo, la aceleración impulsiva A_i calculada en la sección anterior es mayor a este parámetro. Por este motivo **se modelarán las cargas aplicando la aceleración impulsiva “ A_i ” según API 650 (0.344g).**

3.3. Análisis estático del tanque

A continuación se realizará el análisis de combinaciones de carga para el tanque según la norma API 650. Las cargas se aplicarán al conjunto tanque – plataforma, pero para esta parte del análisis se evaluará únicamente al tanque. Se verificará que no se sobrepase el esfuerzo admisible para ninguno de los casos. Las combinaciones de carga luego de las consideraciones tomadas anteriormente se reducen a las siguientes:

- D+F+L+Lp
- D+W
- D+F+L+Lp+Ex
- D+F+L+Lp+Ez

3.3.1. Caso 1: D+F+L+Lp

Es el caso de la estructura entrando en servicio (tabla 3.11, fig. 3.19). Los resultados son:

Tabla 3.11. Resultados D+F+L+Lp

| Nivel anillo | Parámetro | Descripción | σ (MPa) | $\sigma_{\text{Adm.}}$ (MPa) | Status |
|--------------|------------------------|---------------|----------------|------------------------------|--------|
| Nivel 1 | σ_{max1} | Circ. + Flex. | 155.26 | 136 | X |
| Nivel 2 | σ_{max2} | Circ. + Flex. | 140.27 | 136 | X |
| Nivel 3 | σ_{max3} | Circ. + Flex. | 110.79 | 136 | ✓ |
| Nivel 4 | σ_{max4} | Circ. + Flex. | 100.53 | 136 | ✓ |
| Nivel 5 | σ_{max5} | Circ. + Flex. | 92.28 | 136 | ✓ |
| Nivel 6 | σ_{max6} | Circ. + Flex. | 61.76 | 136 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_{max7} | Circ. + Flex. | 29.45 | 136 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_{c7} | Compresión Y. | -16.487 | -41.77 | ✓ |

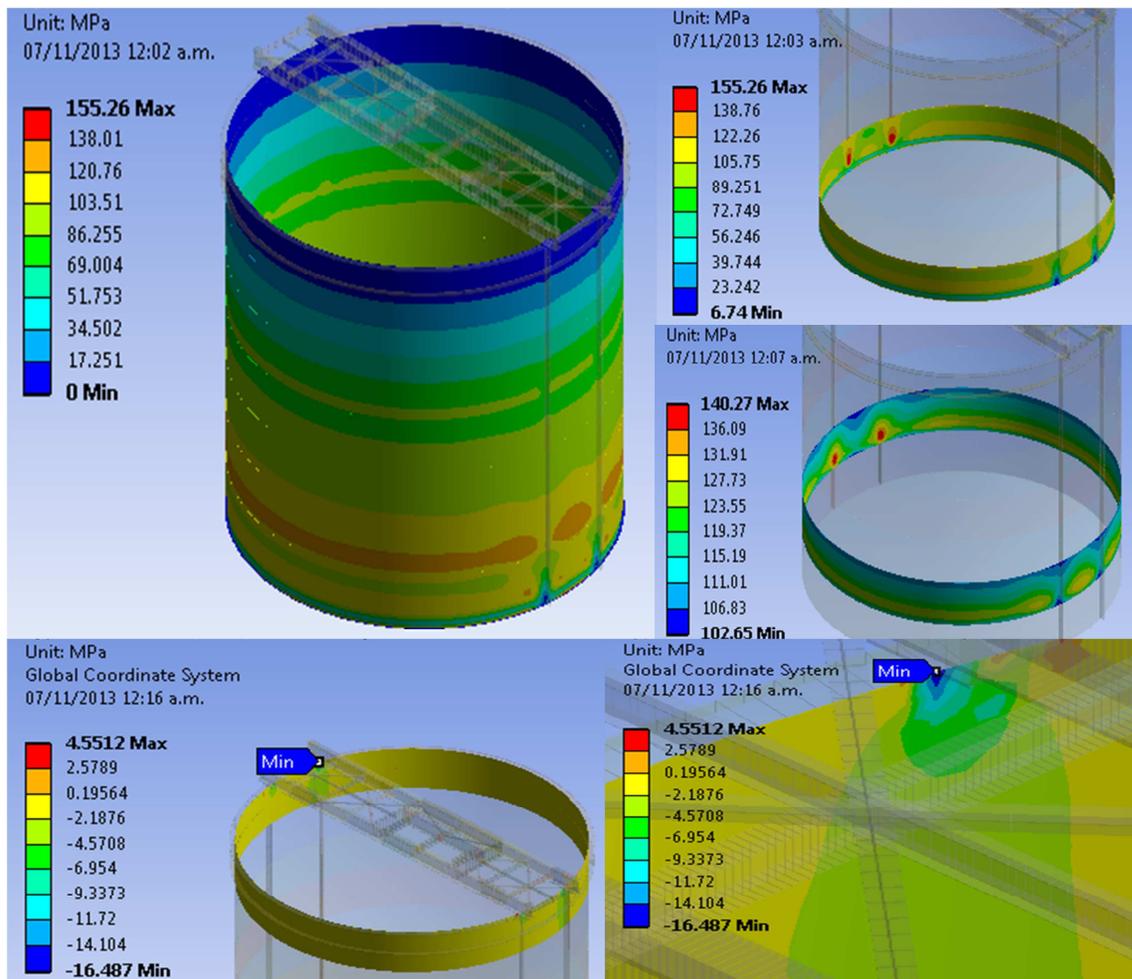


Figura 3.18 Resultados D+F+L+Lp

Como se puede apreciar los esfuerzos en la pared del tanque en los anillos 1 y 2 son superiores a los esfuerzos admisibles, y estos se dan detrás de las columnas soldadas a la pared (fig. 3.18). Esto se debe a que estos esfuerzos no son sólo circunferenciales sino también de flexión (fig. 3.20), debido a la expansión radial no uniforme de la pared (fig. 3.19).

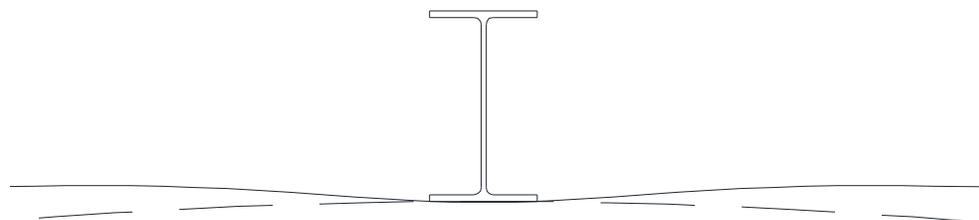


Figura 3.19. Deformación radial no uniforme

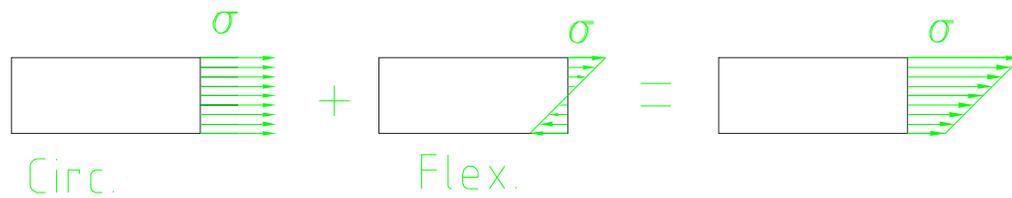


Figura 3.20. Combinación de esfuerzos

Si bien la presencia de columnas es perjudicial en los primeros niveles, su presencia es favorable en el último nivel, donde distribuye mejor los esfuerzos (fig. 3.18).

3.3.2. Caso 2: D+W

Se analizó la estabilidad al vuelco del tanque sometido a una carga de viento (tabla 3.12).

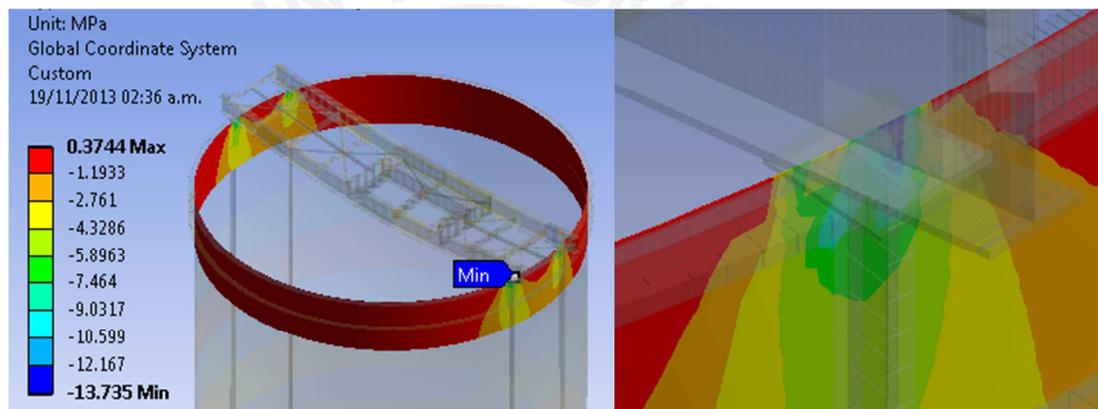


Figura 3.21. Esfuerzos normales en apoyos

Tabla 3.12. Resultados esfuerzos de compresión caso D+W (fig. 3.21)

| Parámetro | Descripción | σ (MPa) | σ_{adm} (MPa) | Status |
|---------------|--------------|----------------|----------------------|--------|
| σ_{c7} | Compresión Y | -24.315 | -41.77 | ✓ |

Tabla 3.13. Verificación de anclajes

| Pesos y momentos | | | |
|--|------|-----------|------|
| Peso total de carga muerta | Wtot | 9.51E+05 | N |
| Momento calculado por cargas de volteo | Mw | 614750000 | N.mm |
| Momento calculado por cargas de volteo | Mw | 614750 | N.m |
| Fuerza total de levante por cada perno | U | -7.96E+05 | N |

Como se observa, la fuerza de levante sobre cada perno de anclaje es negativa (tabla 3.13). Esto significa que **el tanque es estable con su propio peso y los pernos de anclaje no trabajan para esta combinación de carga.**

3.3.3. Caso 3: D+F+L+Lp+Ex

Esta carga y la siguiente se dan cuando la estructura se encuentra en servicio y ocurre un sismo. Los resultados se muestran a continuación (tabla 3.14, 3.15 y fig. 3.22).

Tabla 3.14. Resultados de esfuerzos D+F+L+Lp+Ex

| Nivel anillo | Parámetro | Descripción | σ (MPa) | σ_{adm} (MPa) | Status |
|--------------|-----------------|---------------|----------------|----------------------|--------|
| Nivel 1 | σ_{max1} | Circ. + Flex. | 195.98 | 180.88 | X |
| Nivel 1 | σ_1 | Compresión Y | -40.857 | -69.74 | ✓ |
| Nivel 2 | σ_{max2} | Circ. + Flex. | 184.43 | 180.88 | X |
| Nivel 3 | σ_{max3} | Circ. + Flex. | 148.67 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 4 | σ_{max4} | Circ. + Flex. | 136.77 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 5 | σ_{max5} | Circ. + Flex. | 128.55 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 6 | σ_{max6} | Circ. + Flex. | 88.665 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_{max7} | Circ. + Flex. | 46.418 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_7 | Compresión Y | -30.115 | -41.77 | ✓ |

Nuevamente se aprecia el mismo efecto que en el caso 1. Existe una concentración de esfuerzos que sobrepasa los valores admisibles para el tanque. Para este caso la carga sísmica se da en el eje x y hace que la presión sea mayor cerca a las columnas de soporte (fig. 3.22).

Tabla 3.15. Cálculo de pernos de anclaje

| Cálculo de fuerzas en la base | | | |
|---|---------|-------------|-----------------|
| Parámetro | Símbolo | Valor | Unidad |
| Momento total en la base | Ms | 8.46E+10 | N.mm |
| Momento total en la base | Ms | 8.46E+07 | N.m |
| Fuerza vertical sobre la base sin considerar fluido | Wt | 1.11E+06 | N |
| Fuerza lineal vertical | wt | 7.00E+04 | N/m |
| Verificación de pernos de anclaje | | | |
| Fuerza total de levante | wab | 3.56E+05 | N/m |
| Fuerza de levante por perno | tb | 4.94E+05 | N |
| Área de cada perno | Ap | 1963.495408 | mm ² |
| Esfuerzo admisible de fluencia para cada perno | Fyadm | 330 | MPa |
| Esfuerzo en el perno de anclaje | Tb | 251 | MPa |
| Verificación Esfuerzos Perno | | ✓ | |

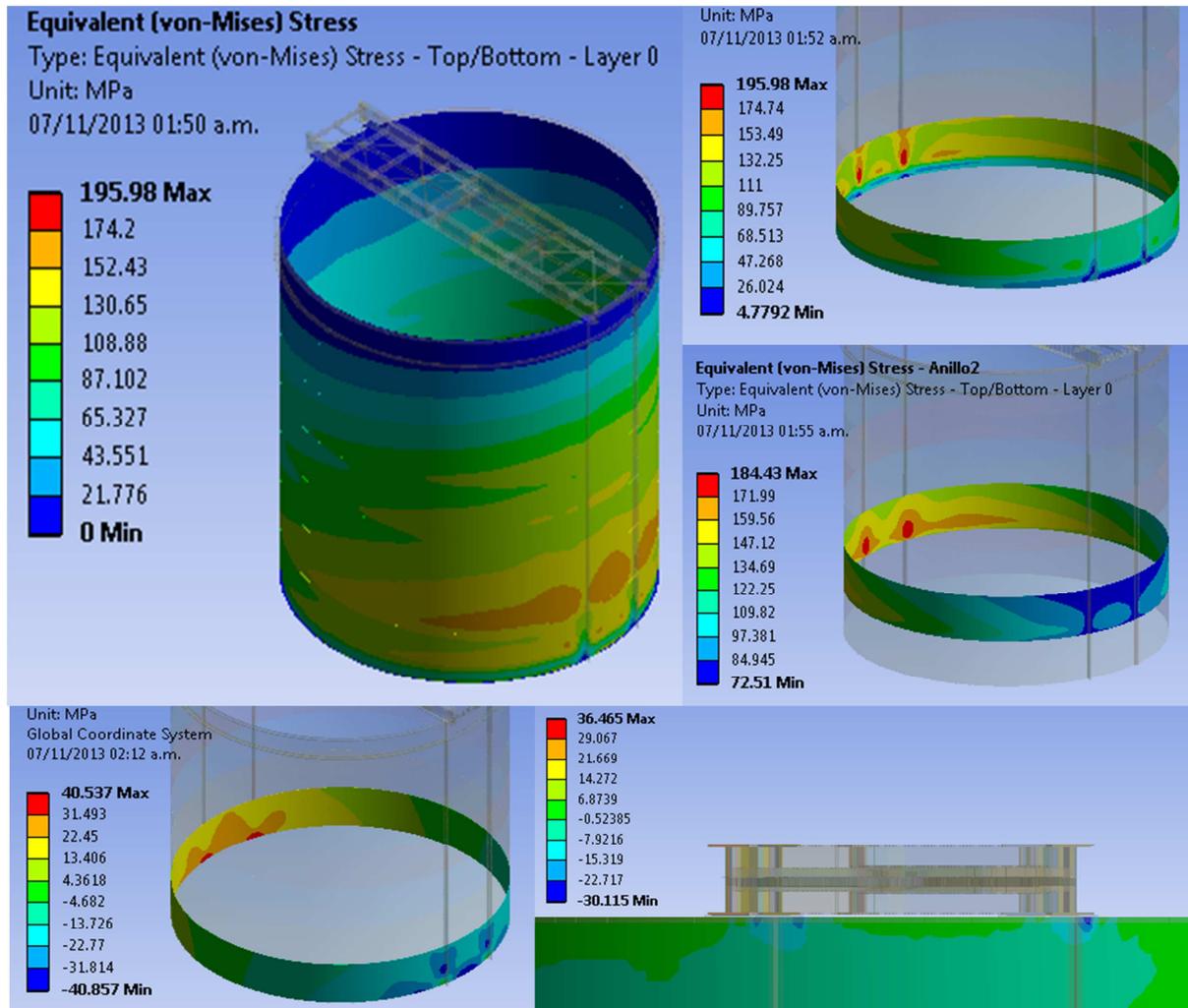


Figura 3.22. Resultados caso D+F+L+Lp+Ex

3.3.4. Caso 4: D+F+L+Lp+Ez

Se aplica la carga sísmica del caso 3 pero esta vez en dirección al eje Z (tabla 3.16)

Tabla 3.16. Resultados esfuerzos caso D+F+L+Lp+Ez

| Nivel anillo | Parámetro | Descripción | σ (MPa) | σ_{adm} (MPa) | Status |
|--------------|-----------------|--------------|----------------|----------------------|--------|
| Nivel 1 | σ_{max1} | Circ. | 163.92 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 1 | σ_{c1} | Compresión Y | -29.344 | -69.74 | ✓ |
| Nivel 2 | σ_{max2} | Circ. | 169.43 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 3 | σ_{max3} | Circ. | 143.63 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 4 | σ_{max4} | Circ. | 134.84 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 5 | σ_{max5} | Circ. | 125.82 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 6 | σ_{max6} | Circ. | 86.188 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_{max7} | Circ. | 41.798 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_{c7} | Compresión Y | -37.628 | -41.77 | ✓ |

Debido a que la presión máxima no ocurre cerca a las columnas (fig. 3.23 y 3.24), el esfuerzo en las paredes del tanque es causado debido a fuerzas circunferenciales. El cálculo de estabilidad al volteo se muestra a continuación (tabla 3.17).

Tabla 3.17. Cálculo de anclajes caso 4

| Parámetro | Símbolo | Valor | Unidad |
|---|--------------|-------------|-----------------|
| Momento total en la base | Ms | 8.44E+10 | N.mm |
| Momento total en la base | Ms | 8.44E+07 | N.m |
| Fuerza vertical sobre la base sin considerar fluido | Wt | 1.11E+06 | N |
| Fuerza lineal vertical | wt | 7.00E+04 | N/m |
| Fuerza total de levante | | | |
| Fuerza de levante por perno | wab | 3.55E+05 | N/m |
| Fuerza de levante por perno | tb | 4.93E+05 | N |
| Área de cada perno | Ap | 1963.495408 | mm ² |
| Esfuerzo admisible de fluencia para cada perno | Fyadm | 330 | MPa |
| Esfuerzo en el perno de anclaje | Tb | 251 | Mpa |
| Verificación Esfuerzos Perno | | ✓ | |

Se aprecia que el cálculo de fuerzas de anclaje es prácticamente el mismo. Esto debido a que la carga se debe a la masa, la aceleración y la altura. Se debe reducir el efecto de concentración de esfuerzos para estar dentro del rango admisible.

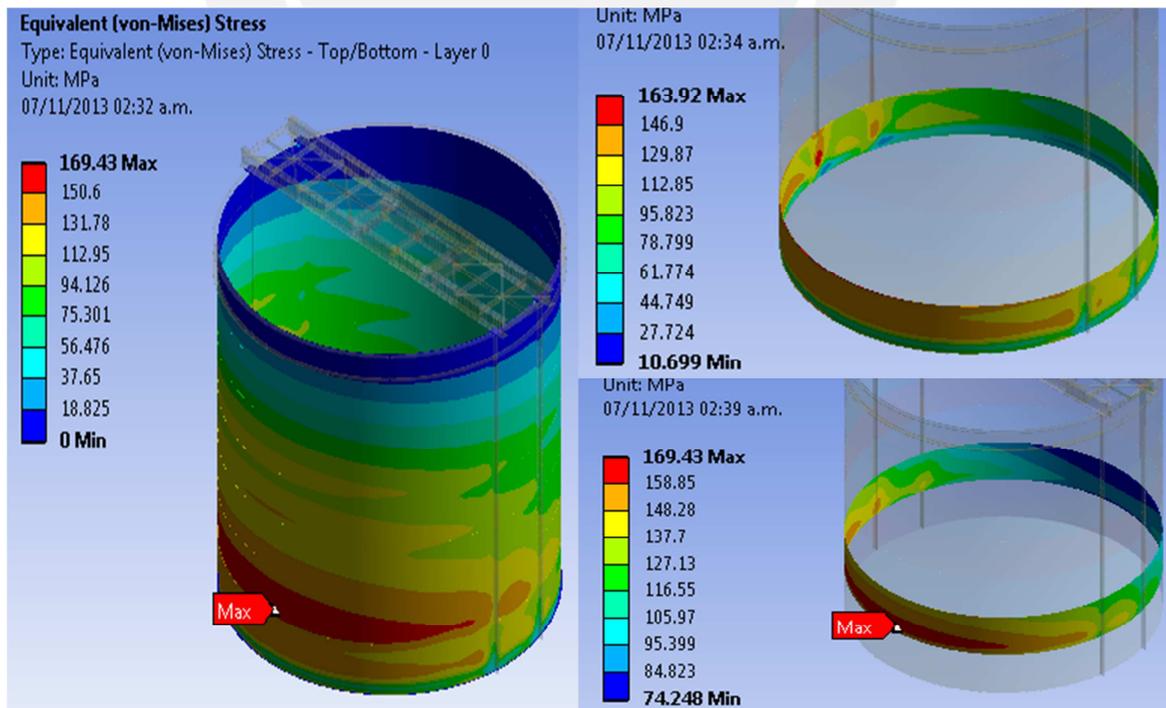


Figura 3.23. Resultados caso D+F+L+Lp+Ez. Esfuerzos de Von Mises

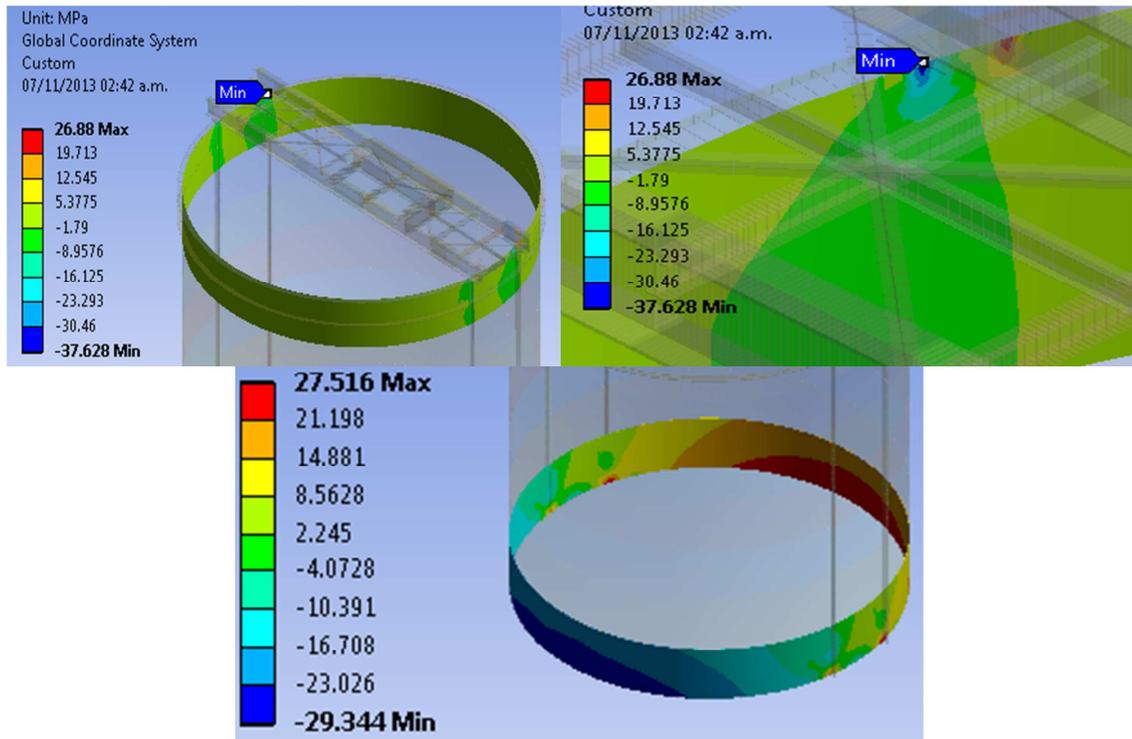


Figura 3.24. Resultados caso D+F+L+Lp+Ez, Esfuerzos normales (eje Y)

3.4. Análisis estático de la plataforma

Para el análisis estático de la plataforma se realizará la verificación de los perfiles y las uniones de acuerdo a la norma AISC 360, evaluando los estados límites correspondientes. Como se explicó en el capítulo 1, estos estados dependen de las propiedades de la sección y en particular de la esbeltez de sus componentes. La tabla 3.18 muestra las características de los perfiles empleados en la plataforma. El procedimiento para clasificación de secciones y determinación de estados límite se encuentra en el Anexo B.

Tabla 3.18. Clasificación de los perfiles

| Elemento | Perfil | Compresión | | Flexión | |
|------------------------------|---------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Tipo de ala | Tipo de alma | Tipo de ala | Tipo de alma |
| Viga principal | W30x191 | NO ESBELTA | ESBELTA | COMPACTA | COMPACTA |
| Viga transversal plataforma | W10x22 | NO ESBELTA | ESBELTA | COMPACTA | COMPACTA |
| Vigueta longitudinal | W8x10 | NO ESBELTA | ESBELTA | NO COMPACTA | COMPACTA |
| Vigas refuerzo de plataforma | W30x132 | NO ESBELTA | ESBELTA | COMPACTA | COMPACTA |
| Vigas soporte de agitador | W12x87 | NO ESBELTA | NO ESBELTA | COMPACTA | COMPACTA |

Considerando solo las cargas significativas, las combinaciones son:

- 1.4D
- 1.2D+1.6L+0.5Lp
- 1.2D+1.6Lp + L
- 1.2D+Ex+L
- 1.2D+Ez+L
- 0.9D+Ex
- 0.9D+Ez

3.4.1. Caso 1: 1.4D

Se evalúa la estructura considerando solo su propio peso incrementado 1.4 veces (ver figs. 3.25, 3.26 y 3.27). La tabla 3.19 muestra la verificación de estados límite.

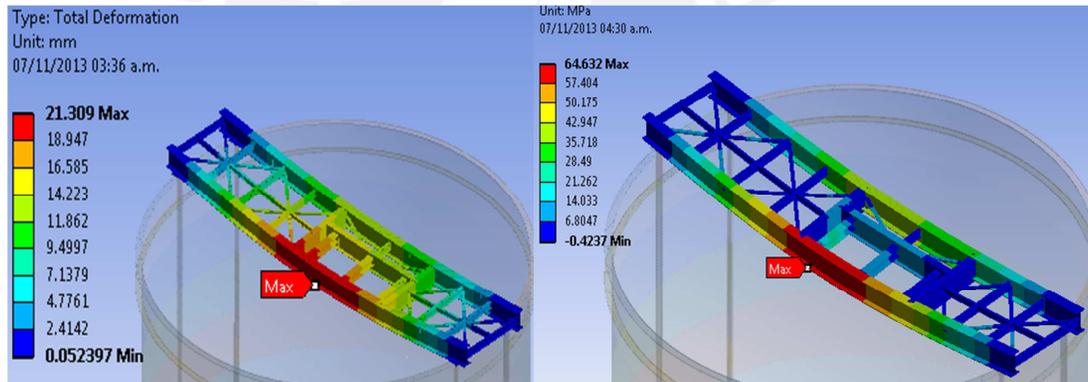


Figura 3.25. Caso 1: Deformaciones (izq.) y esfuerzos combinados (der.)

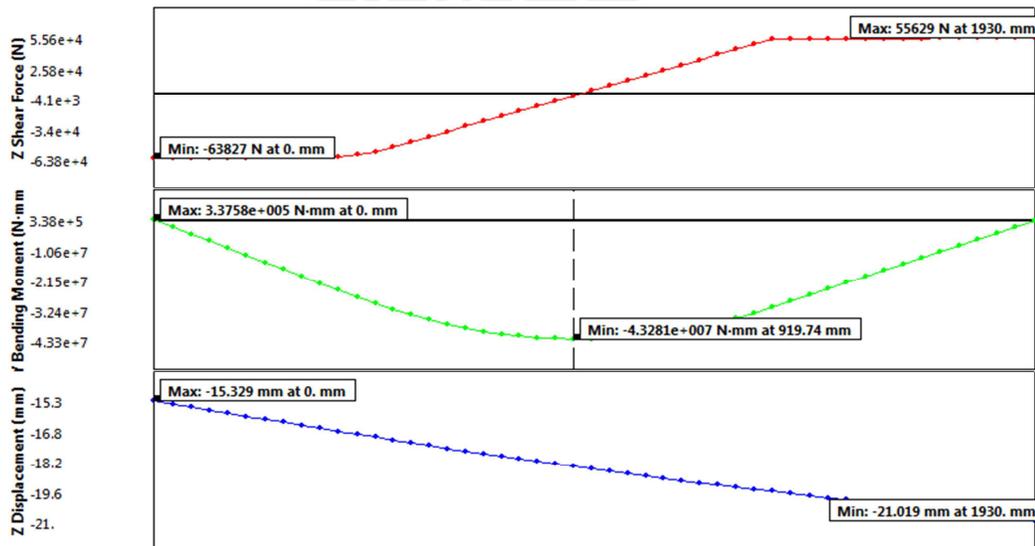


Figura 3.26. Caso 1: Diagrama de fuerzas internas de viga soporte

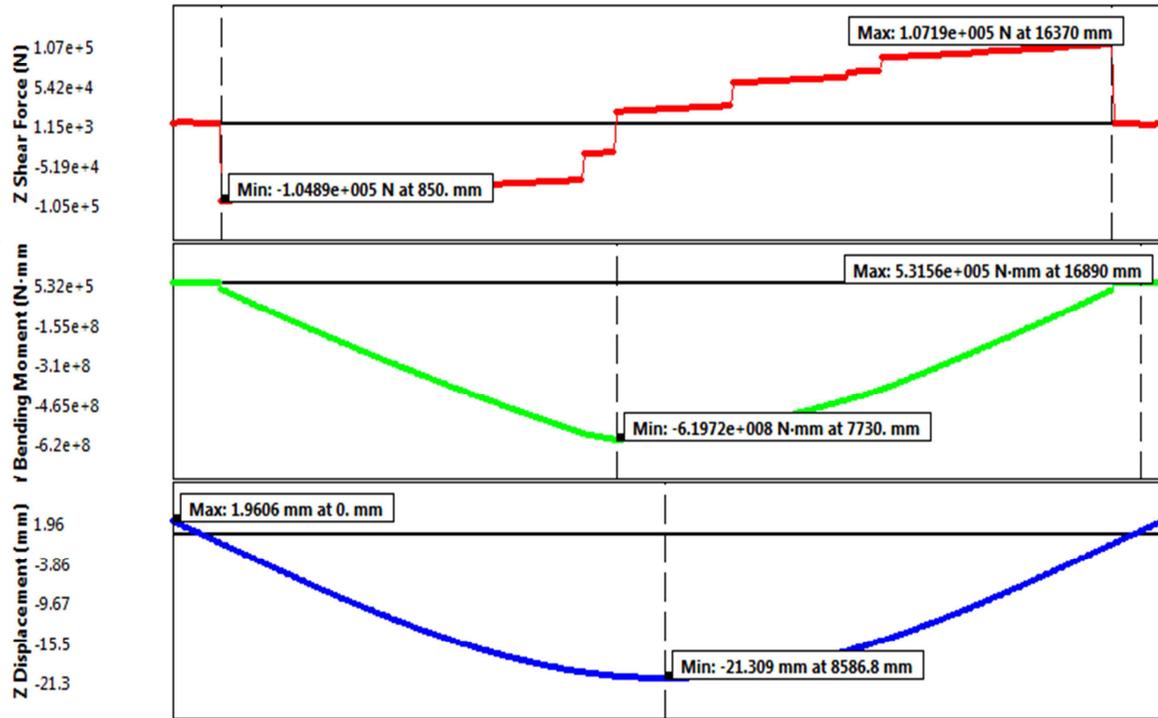


Figura 3.27. Caso 1: Diagrama de fuerzas internas viga principal

Tabla 3.19. Resultados Caso 1: 1.4D

| Elemento | Verificación | Valor requerido | Valor admisible | Factor de utilización | Factor máximo | Status |
|----------|--|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------|
| W30x191 | Momento flector (kN.m) | 62 | 339 | 0.18 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 102 | 2593 | 0.04 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 64.63 | 345 | 0.19 | 0.9 | ✓ |
| W30x132 | Momento flector (kN.m) | 7.51 | 214.83 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 82.97 | 2358.7 | 0.04 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 14.03 | 345 | 0.04 | 0.9 | ✓ |
| W12x87 | Momento flector (kN.m) | 4.33 | 66.72 | 0.06 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 63.83 | 726.15 | 0.09 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 28.49 | 345 | 0.08 | 0.9 | ✓ |
| W30-W30 | Unión (kN) | 92.97 | 584.34 | 0.14 | 0.75 | ✓ |

Se logra verificar que bajo carga muerta la plataforma no sobrepasa ningún estado límite. Se observa que el máximo factor de utilización es de 19% para la viga principal, la cual puede soportar casi 5 veces la carga aplicada en este caso.

3.4.2. Caso 2: 1.2D+1.6L+0.5Lp

Este es el caso de operación de la plataforma, con las cargas vivas amplificadas (figs. 3.28 y 3.29). Las verificaciones se ven en la tabla 3.20.

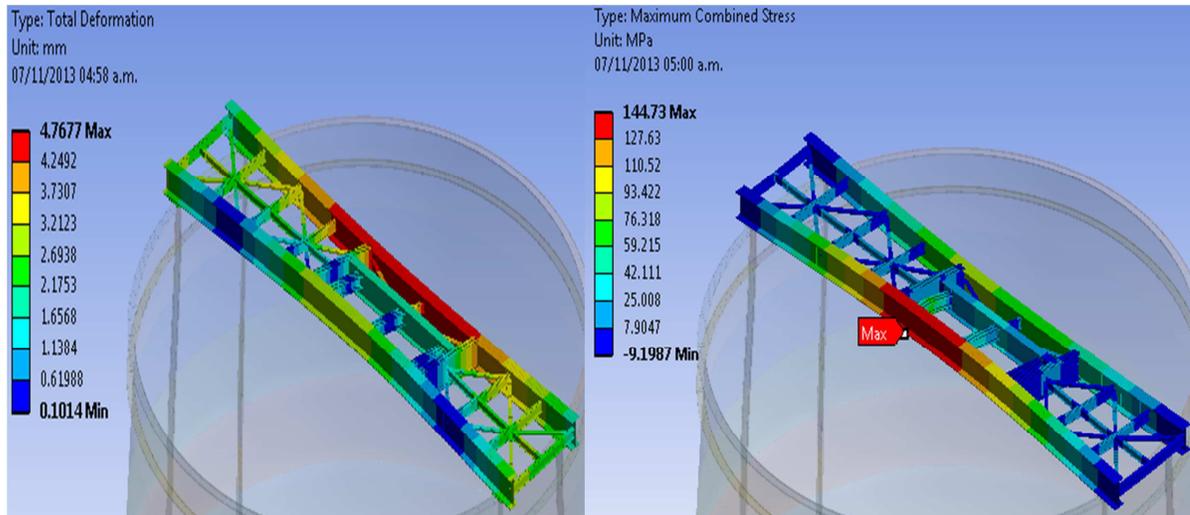


Figura 3.28. Caso 2: Deformaciones (izq.) y esfuerzos combinados (der.)

Tabla 3.20. Resultados caso 2: 1.2D+1.6L+0.5Lp

| PERFIL | Verificación | Valor requerido | Valor admisible | Factor de utilización | Factor máximo | Status |
|---------|--|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------|
| W30x191 | Momento flector (kN.m) | 19.6 | 339 | 0.06 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 49.45 | 2593.38 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 144.73 | 345 | 0.42 | 0.9 | ✓ |
| W30x132 | Momento flector (kN.m) | 4.54 | 214.83 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 61.76 | 2359 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 42.11 | 345 | 0.12 | 0.9 | ✓ |
| W12x87 | Momento flector (kN.m) | 4.12 | 66.72 | 0.06 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 60.43 | 726.15 | 0.08 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 76.32 | 345 | 0.22 | 0.9 | ✓ |
| W10x22 | Momento flector (kN.m) | 0.57 | 13.11 | 0.04 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 4.07 | 324.34 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 25 | 345 | 0.07 | 0.9 | ✓ |
| W8x10 | Momento flector (kN.m) | 0.15 | 4.38 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 3.39 | 187.7 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 25.01 | 345 | 0.07 | 0.9 | ✓ |
| W30-W30 | Unión (kN) | 61.76 | 584.34 | 0.11 | 0.75 | ✓ |
| W10-W30 | Unión (kN) | 4.07 | 233.73 | 0.02 | 0.75 | ✓ |
| W8-W10 | Unión (kN) | 3.39 | 233.73 | 0.01 | 0.75 | ✓ |

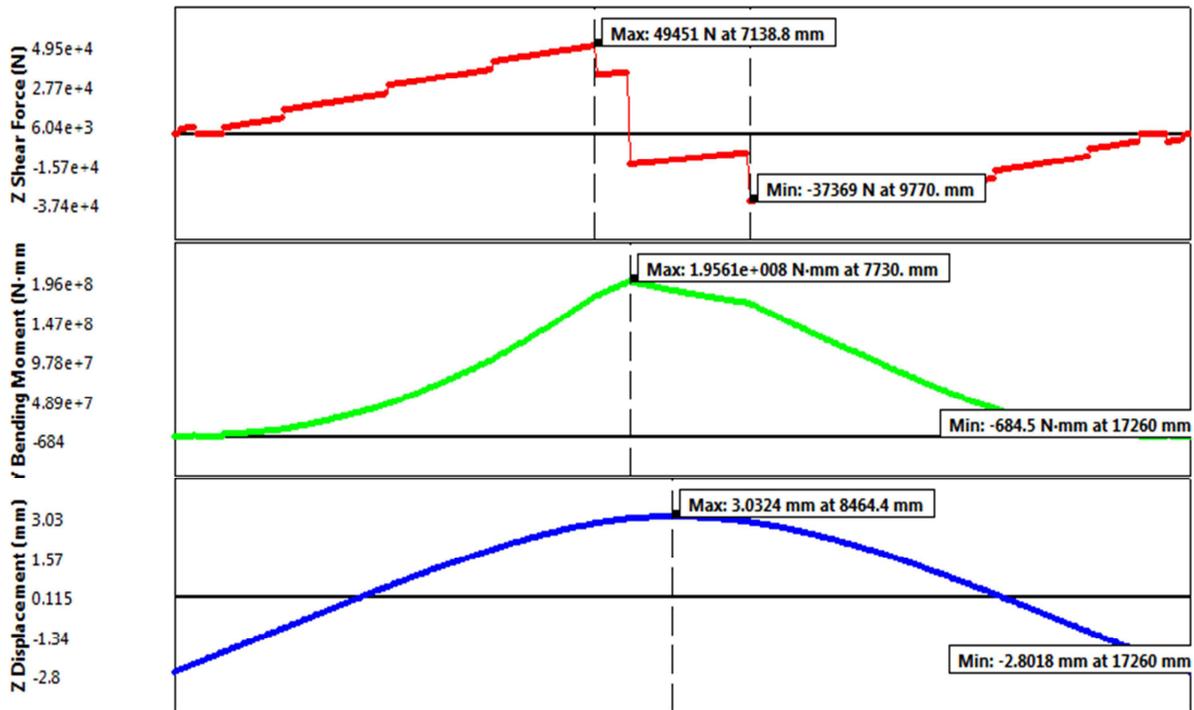


Figura 3.29. Caso 2: Diagrama de fuerzas internas viga principal

3.4.3. Caso 3: 1.2D+1.6Lp + L

Se verifica esta vez amplificando la carga viva de la plataforma y con el valor real de la carga viva (figs. 3.30 y 3.31). La verificación de estados límite se ve en la tabla 3.21:

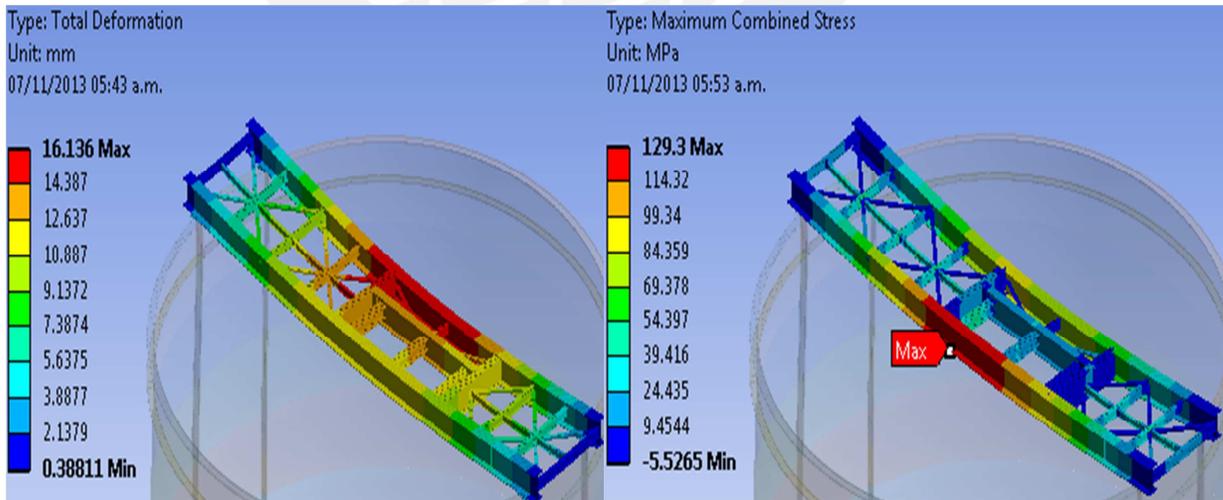


Figura 3.30. Caso 3: Deformaciones (izq.) y esfuerzos combinados (der.)

Tabla 3.21. Resultados caso 3: 1.2D+1.6Lp+L

| PERFIL | Verificación | Valor requerido | Valor admisible | Factor de utilización | Factor máximo | Status |
|---------|--|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------|
| W30x191 | Momento flector (kN.m) | 26 | 339 | 0.08 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 87 | 2593 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 129.3 | 345 | 0.37 | 0.9 | ✓ |
| W30x132 | Momento flector (kN.m) | 1.68 | 214.83 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 15.80 | 2359 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 9.46 | 345 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| W12x87 | Momento flector (kN.m) | 1.20 | 66.72 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 17.53 | 726.15 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 54.39 | 345 | 0.16 | 0.9 | ✓ |
| W10x22 | Momento flector (kN.m) | 1.68 | 13.11 | 0.13 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 11.35 | 321.34 | 0.04 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 54.40 | 345 | 0.16 | 0.9 | ✓ |
| W8x10 | Momento flector (kN.m) | 0.48 | 4.38 | 0.11 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 10.50 | 187.7 | 0.06 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 54.40 | 345 | 0.16 | 0.9 | ✓ |
| W30-W30 | Unión (kN) | 15.8 | 584.34 | 0.03 | 0.75 | ✓ |
| W10-W30 | Unión (kN) | 11.35 | 233.73 | 0.05 | 0.75 | ✓ |
| W8-W10 | Unión (kN) | 10.50 | 233.73 | 0.04 | 0.75 | ✓ |

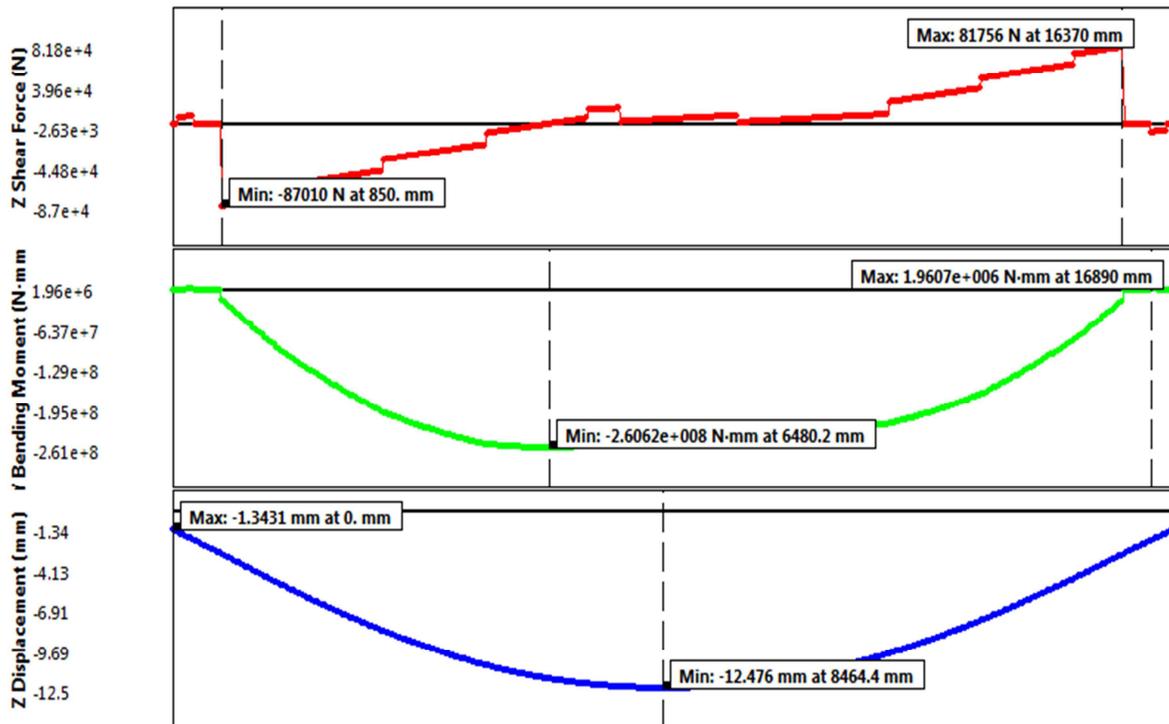


Figura 3.31. Caso 3: Diagrama de fuerzas internas viga principal

3.4.4. Caso 4: 1.2D+Ex+L

Ahora se muestra al conjunto en servicio, sometido a un sismo en el eje x (figs. 3.32 y 3.33). Las verificaciones se muestran en la tabla 3.22:

Tabla 3.22. Resultados caso 4: 1.2D+Ex+L

| PERFIL | Verificación | Valor requerido | Valor admisible | Factor de utilización | Factor máximo | Status |
|---------|--|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------|
| W30x191 | Momento flector (kN.m) | 5.77 | 339 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 21.60 | 2593.3 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 109.75 | 345 | 0.32 | 0.9 | ✓ |
| W30x132 | Momento flector (kN.m) | 0.9 | 214.83 | 0.00 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 16.89 | 2358.7 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 30.85 | 345 | 0.09 | 0.9 | ✓ |
| W12x87 | Momento flector (kN.m) | 1.43 | 66.72 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 21.15 | 726.15 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 57.15 | 345 | 0.17 | 0.9 | ✓ |
| W30-W30 | Unión (kN) | 16.98 | 584.34 | 0.03 | 0.75 | ✓ |

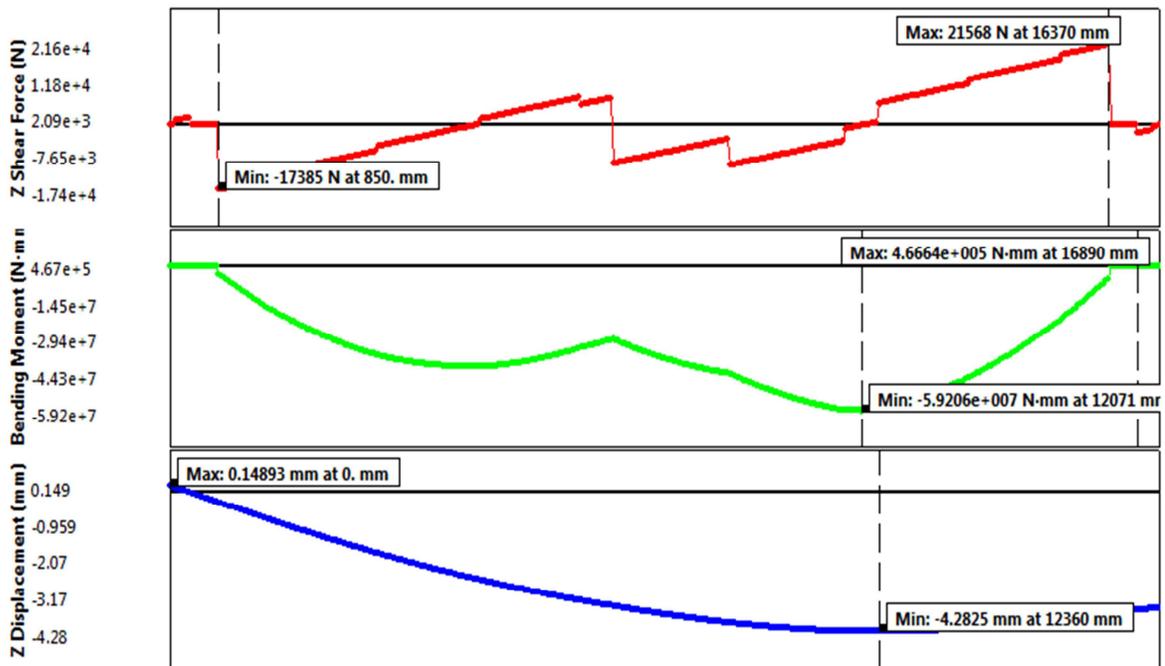


Figura 3.32 Caso 4: Diagrama de fuerzas internas viga principal

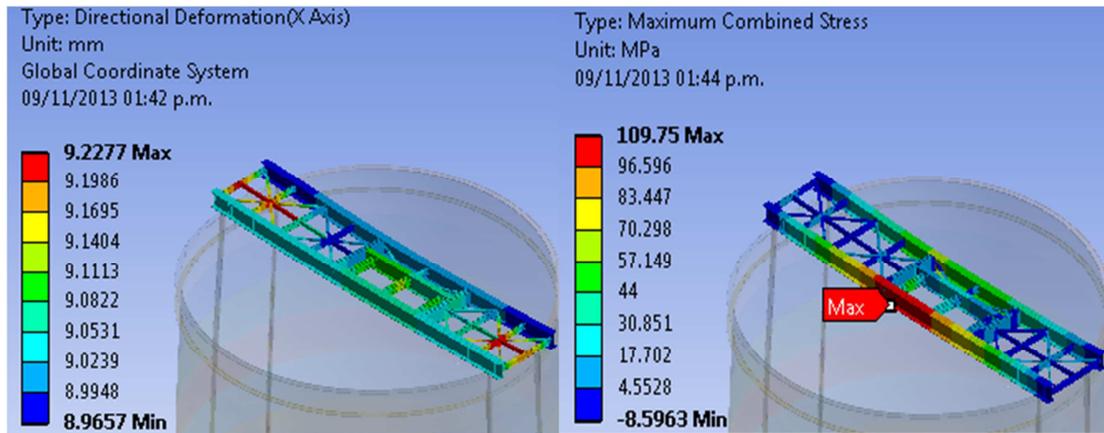


Figura 3.33. Caso 4: Deformaciones (izq.) y esfuerzos combinados (der.)

3.4.5. Caso 5: 1.2D+Ez+L

Con carga sísmica en el eje z. Ver figs. 3.34, 3.35 y tabla 3.23:

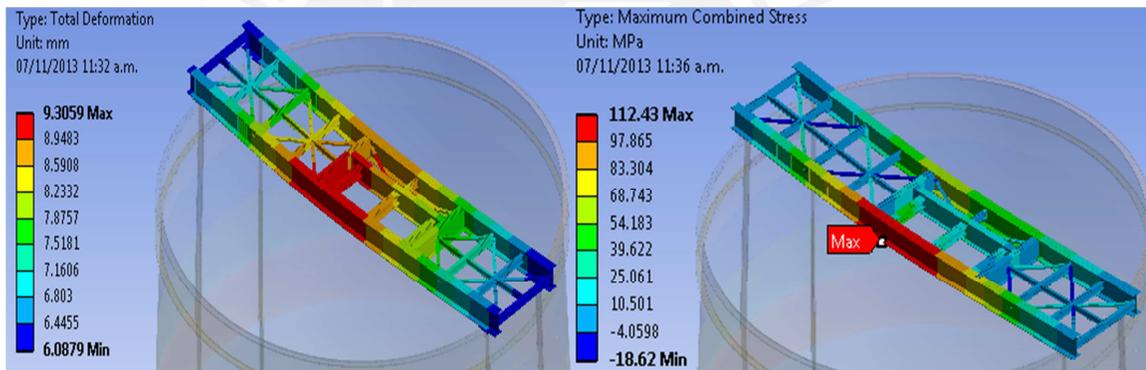


Figura 3.34. Caso 5: Deformaciones (izq.) y esfuerzos combinados (der.)

Tabla 3.23. Resultados caso 5: 1.2D+L+Ez

| PERFIL | Verificación | Valor requerido | Valor admisible | Factor de utilización | Factor máximo | Status |
|---------|--|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------|
| W30x191 | Momento flector (kN.m) | 8.12 | 339 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 25.5 | 2593.3 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 112.43 | 345 | 0.33 | 0.9 | ✓ |
| W30x132 | Momento flector (kN.m) | 1.56 | 214.83 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 21.20 | 2358.7 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 39.022 | 345 | 0.11 | 0.9 | ✓ |
| W12x87 | Momento flector (kN.m) | 1.55 | 66.72 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 22.19 | 726.15 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 54.183 | 345 | 0.16 | 0.9 | ✓ |
| W30-W30 | Unión (kN) | 21.20 | 584.34 | 0.04 | 0.75 | ✓ |

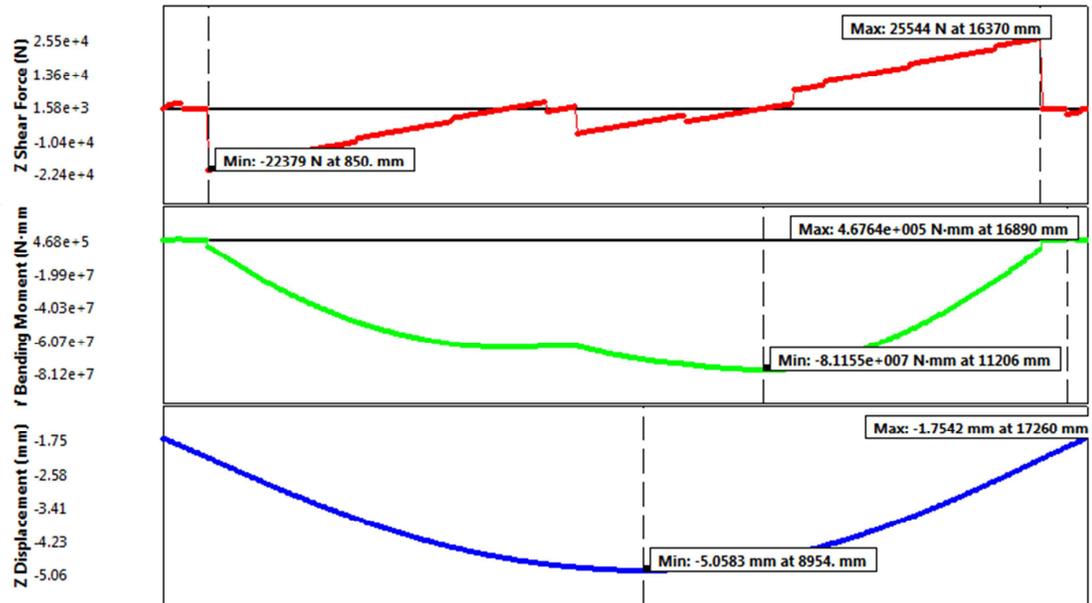


Figura 3.35. Caso 5: Diagrama de fuerzas internas viga principal

3.4.6. Caso 6: 0.9D+Ex

Se evalúa en este caso y el siguiente la estructura sometida al peso y a la carga sísmica (ver figs. 3.36 y 3.37). La verificación de estados límite se muestra en la tabla 3.24

Tabla 3.24. Resultados caso 6: 0.9D+Ex

| PERFIL | Verificación | Valor requerido | Valor admisible | Factor de utilización | Factor máximo | Status |
|---------|--|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------|
| W30x191 | Momento flector (kN.m) | 39.10 | 339 | 0.12 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 77.10 | 2593.3 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 44.20 | 345 | 0.13 | 0.9 | ✓ |
| W30x132 | Momento flector (kN.m) | 4.99 | 214.8 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 50.05 | 2358 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 10.48 | 345 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| W12x87 | Momento flector (kN.m) | 2.53 | 66.72 | 0.04 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 37.54 | 726.15 | 0.05 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 21.86 | 345 | 0.06 | 0.9 | ✓ |
| W30-W30 | Unión (kN) | 50.51 | 584.34 | 0.09 | 0.75 | ✓ |

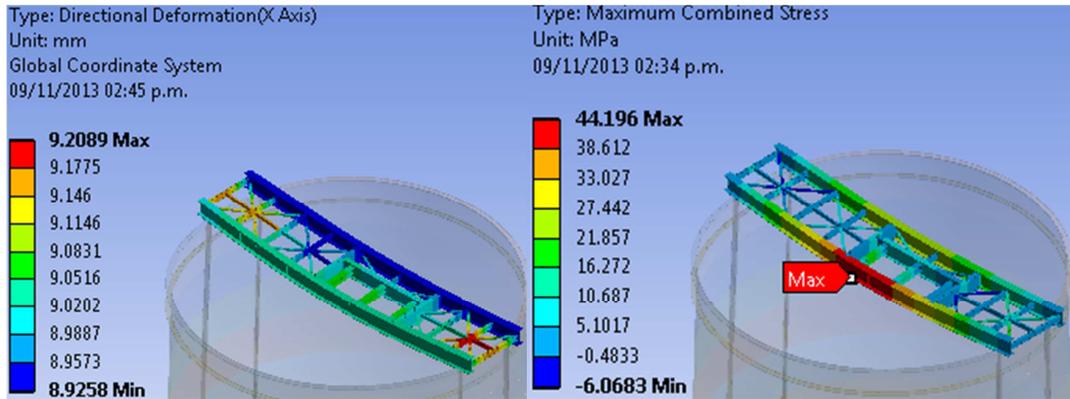


Figura 3.36. Caso 6: Deformaciones (izq.) y esfuerzos combinados (der.)

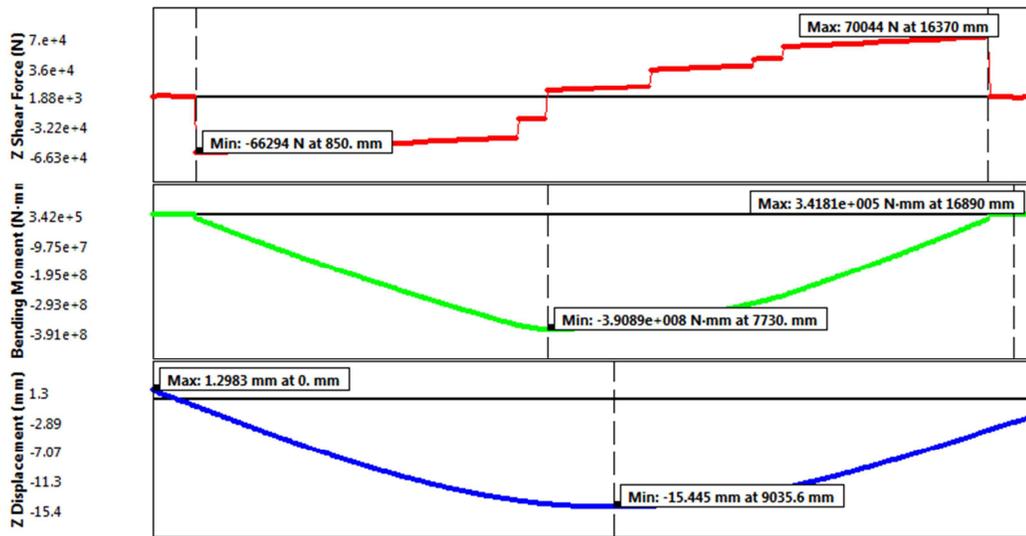


Figura 3.37. Caso 6: Diagrama de fuerzas internas viga principal

3.4.7. Caso 7: D+Ez

Caso similar al anterior pero con sismo en el eje Z (ver figs. 3.38 y 3.39 y tabla 3.25).

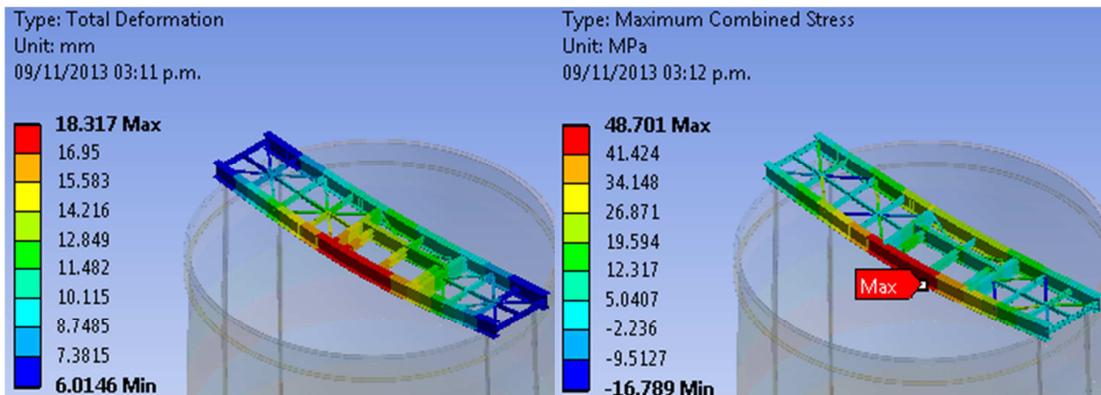


Figura 3.38. Caso 7: Deformaciones (izq.) y esfuerzos combinados (der.)

Tabla 3.25. Resultados caso 7: 0.9D+Ez

| PERFIL | Verificación | Valor requerido | Valor admisible | Factor de utilización | Factor máximo | Status |
|---------|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------|
| W30x191 | Momento flector (kN.m) | 39.10 | 339 | 0.12 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 77.10 | 2593.3 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 44.196 | 345 | 0.13 | 0.9 | ✓ |
| W30x132 | Momento flector (kN.m) | 4.99 | 214.8 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 50.51 | 2358 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 10.48 | 345 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| W12x87 | Momento flector (kN.m) | 2.53 | 66.72 | 0.04 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 37.53 | 726.1 | 0.05 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 21.857 | 345 | 0.06 | 0.9 | ✓ |
| W30-W30 | Unión (kN) | 50.51 | 584.3 | 0.09 | 0.75 | ✓ |

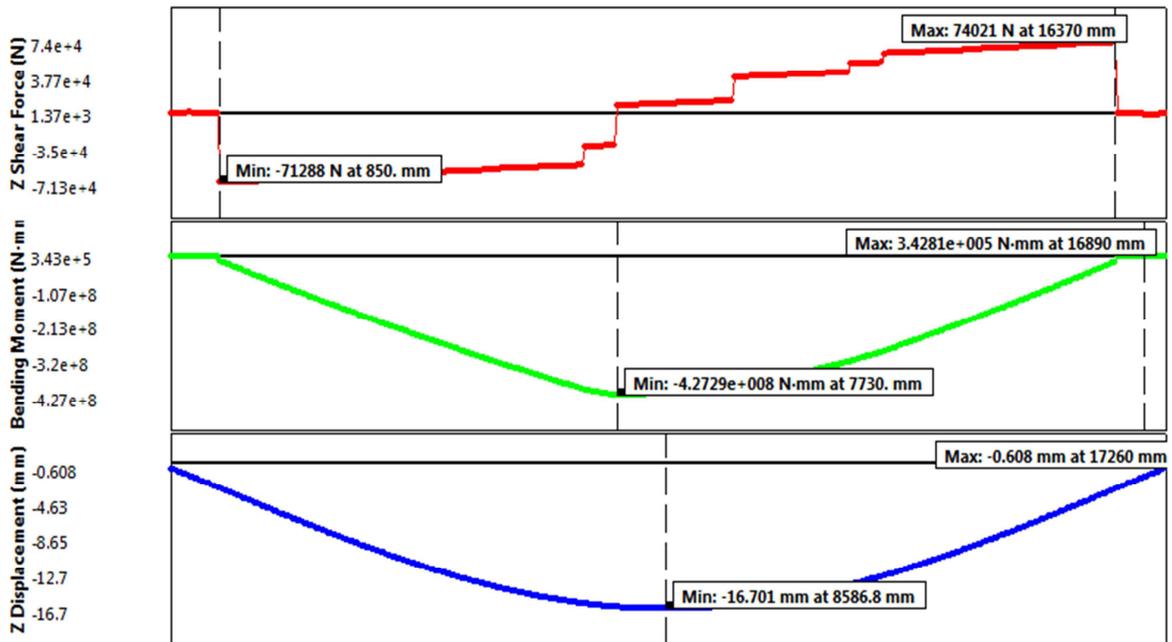


Figura 3.39. Caso 7: Diagrama de fuerzas internas viga principal

3.4.8. Desplazamientos y deflexiones

Se analizó el desplazamiento de la estructura para sus condiciones reales de servicio, es decir sin aplicar factores de amplificación de carga. Se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.26. La deflexión vertical admisible se tomó de especificaciones de diseño del proyecto y la separación mínima requerida entre estructuras se tomó de la NTE E.030 [MVCS, 2006].

Tabla 3.26. Resultados desplazamientos

| Caso | Ux (mm) | Separación X mínima (mm) | Uy(mm) | Uy adm. (mm) | Verificación |
|----------|---------|--------------------------|---------|--------------|--------------|
| D | - | - | -15.221 | -20 | ✓ |
| D+F+L | - | - | +3.725 | ±10 | ✓ |
| D+F+L+Ex | 9.2206 | 30 | -4.08 | ±10 | ✓ |

3.5. Análisis de resultados.

Respecto al modelado de cargas:

- Las cargas fueron modeladas correctamente y el contraste teórico de resultados muestra errores menores a 10% en la mayoría de casos.
- Para la carga viva del agitador (L) se observa que en dos puntos el error llega hasta 15%, esto se debe a que las cargas entre vigas soporte se están transmitiendo a través de las vigas principales; esto muestra que el comportamiento descrito en el modelo MEF es el correcto ya que la condición de empotramiento está transmitiendo cargas y momentos.

Respecto a la evaluación del tanque:

- Se observa en el caso 1 que las paredes del tanque en los dos primeros niveles fallan al presentar esfuerzos equivalentes de 155 MPa y 140 MPa respectivamente, los cuales son superiores al esfuerzo admisible (136 MPa) La causa de ello es la concentración de esfuerzos en la zona próxima a las columnas debido a la combinación de esfuerzos circunferenciales y de flexión.
- En el caso 2 se puede apreciar que el tanque es estable ante una carga de viento, debido a que la fuerza neta de levante tiene valor negativo. Bajo cargas de viento no se requiere anclar el tanque.
- En el caso 3, debido a que la carga sísmica ejerce la máxima presión cerca a las columnas, los esfuerzos en la pared en los dos primeros niveles son 196 MPa y 184 MPa respectivamente y superan al esfuerzo admisible (181 MPa). Se vuelve a presentar el mismo efecto que el caso 1, en el cual se combinan esfuerzos circunferenciales y de flexión.
- En el caso 4, debido a que la presión máxima se ejerce en una zona lejana a las columnas unidas a la pared, los esfuerzos obtenidos son menores a los esfuerzos

admisibles (181 MPa) siendo el máximo valor en la pared de 169 MPa. Esto se debe a que los esfuerzos en las paredes son solo circunferenciales.

- Para los casos 3 y 4 los pernos de anclaje soportan el momento de volteo en la base, se puede apreciar que estos no sobrepasan su valor de fluencia ya que trabajan a un 76% de su esfuerzo admisible (330 MPa).
- En todos los casos se observa que las columnas ayudan a distribuir la carga vertical de los apoyos de la plataforma en una corta longitud. Por ejemplo, en el caso 1 el esfuerzo de compresión en un punto próximo al apoyo es 16.8 MPa y esta carga logra distribuirse y reducirse a su cuarta parte un metro abajo.

Respecto a la evaluación de la plataforma

- Se observa que la plataforma no fallará por resistencia para ninguna combinación de carga. El factor de utilización más crítico se da en el caso 2, el cual es de 42% para el estado límite de falla por esfuerzos combinadas, siendo el máximo admisible de 90%.
- Para todas las combinaciones de carga los elementos que trabajan con un mayor factor de utilización son las vigas principales, los otros elementos cumplen función de soporte para las parrillas y de rigidización de la estructura.
- Se puede apreciar que la plataforma no fallará en condiciones de servicio, ya que no logra superar la deflexión máxima admisible, y en el caso de un sismo no sobrepasa la separación mínima recomendada por la norma NTE E0.30.
- Se ve que la plataforma no distribuye sus cargas uniformemente; esto debido a la disposición asimétrica del agitador, lo cual hace que una viga principal este más cargada que la otra. Por ejemplo, en el caso 2 una de las vigas principales está sometida a un estado de esfuerzos combinados máximos de 145 MPa, mientras que la otra presenta 76 MPa.

Capítulo 4: Análisis dinámico del conjunto

En este capítulo se realizará el análisis dinámico del conjunto que consistirá en un análisis modal para evaluar el comportamiento del sistema ante las cargas que exciten al mismo. El objetivo de esta evaluación es determinar los modos de vibración; para lo cual se podrá realizar este procedimiento de manera analítica considerando un modelo dinámico equivalente de la estructura. Posteriormente, se realizará el mismo análisis utilizando el método de elementos finitos el cual parte de las condiciones de borde, la rigidez y masa del conjunto para llegar a los resultados.

4.1. Modelo dinámico del conjunto

El modelo dinámico del conjunto propuesto para realizar un análisis modal considera únicamente a la plataforma debido a que el tanque tendrá una masa relativamente grande y no será excitado por el agitador. El modelo propuesto partirá del supuesto de que solo trabajarán como elementos que brinden rigidez las vigas principales y que la masa se aplica en la mitad de esta (fig. 4.1).

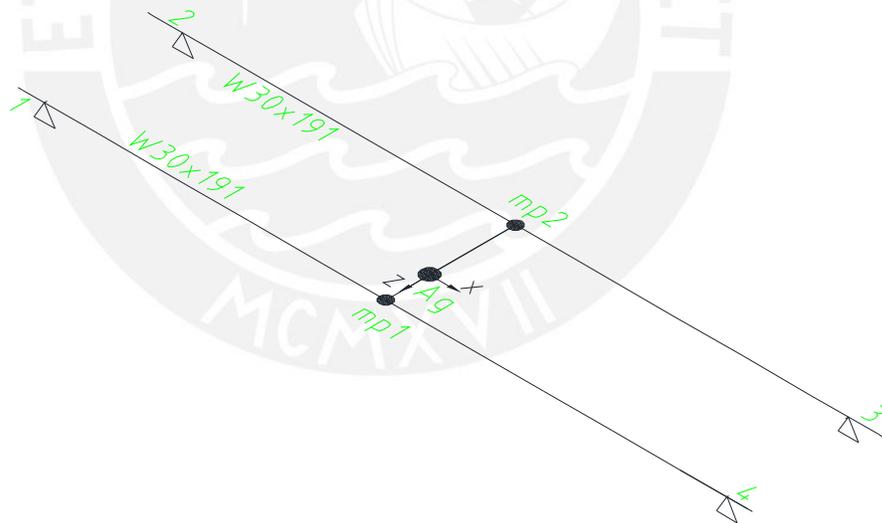


Figura 4.1. Modelo dinámico conceptual

Visto desde un plano que muestre el desplazamiento asumido el modelo conceptual sería el mostrado en la figura 4.2. En este modelo el desplazamiento del conjunto se da en el eje “y”, las masas m_{p1} , m_{p2} corresponden a las masas participativas de las vigas, m_{ag} a la masa del agitador las rigideces de los resortes K_1 y K_2 vienen dadas por la fórmula deducida del cálculo de las deflexiones verticales en vigas (fig. 4.3).

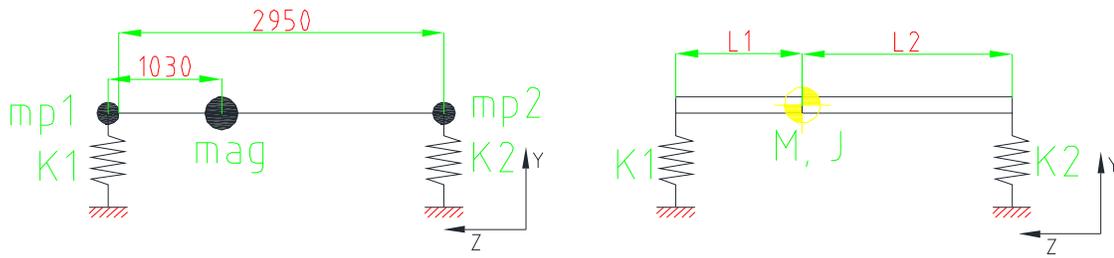


Figura 4.2. Modelo dinámico conceptual, plano Y-Z

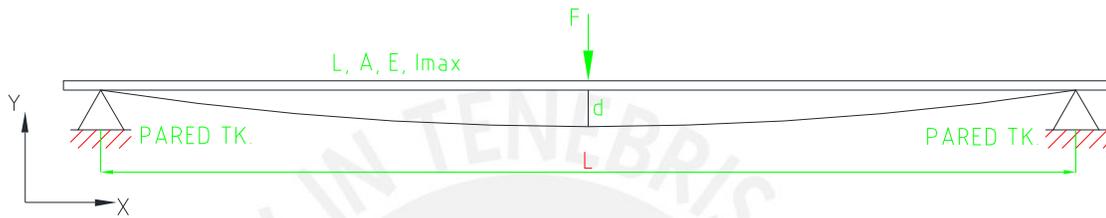


Figura 4.3. Deflexión vertical de una viga simplemente apoyada

$$K = \frac{F}{d} = \frac{48EI}{L^3} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Se procede a resolver el problema para poder determinar los modos de vibración del modelo propuesto. Para ello se considerará la longitud entre apoyos de las vigas principales; la masa del agitador y las masas participativas de la plataforma, como una sola masa equivalente y su inercia respecto a su centro de gravedad (tablas 4.1 y 4.2).

Tabla 4.1. Características inerciales del sistema

| Características inerciales del sistema | | |
|--|-------------------|-------|
| Parámetro | unidad | valor |
| Masa | kg | 4811 |
| Constante de rigidez 1 | kN/m | 8727 |
| Constante de rigidez 2 | kN/m | 9414 |
| Fracción de participación de masa | | 0.45 |
| Masa participativa viga principal | kg | 2165 |
| Masa de agitador | kg | 13784 |
| Centro de masa | m | 1.148 |
| Masa participativa total | kg | 15949 |
| Inercia respecto al centro de masa | kg/m ² | 10877 |
| L1 | m | 1.148 |
| L2 | m | 1.902 |

Tabla 4.2. Resultados de análisis modal

| Resultados de análisis modal | | |
|------------------------------|--------|--------------|
| Parámetro | unidad | valor |
| FRECUENCIAS NATURALES | | |
| ω_1 | rad/s | 32.57 |
| ω_2 | rad/s | 63.77 |
| f1 | Hz | 5.18 |
| f2 | Hz | 10.15 |
| MODOS DE VIBRACIÓN | | |
| Modo 1 | | |
| A1/A2 | | -4.311 |
| Punto neutro, Xn (der.) | m | 4.311 |
| Modo 2 | | |
| A1/A2 | | 0.1728 |
| Punto neutro, Xn (izq.) | m | 0.1728 |

- Modo 1:** Este modo presenta a ambas vigas principales oscilando en fase, es decir ambas ascienden o descienden a la vez pero con distinta magnitud. Esto es producto de la asimetría de la plataforma (figs. 4.4 y 4.5).

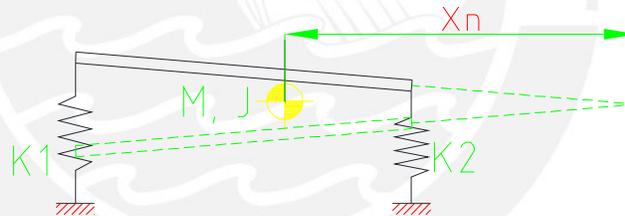


Figura 4.4. Primer modo de vibración del modelo, $f=5.18$ Hz

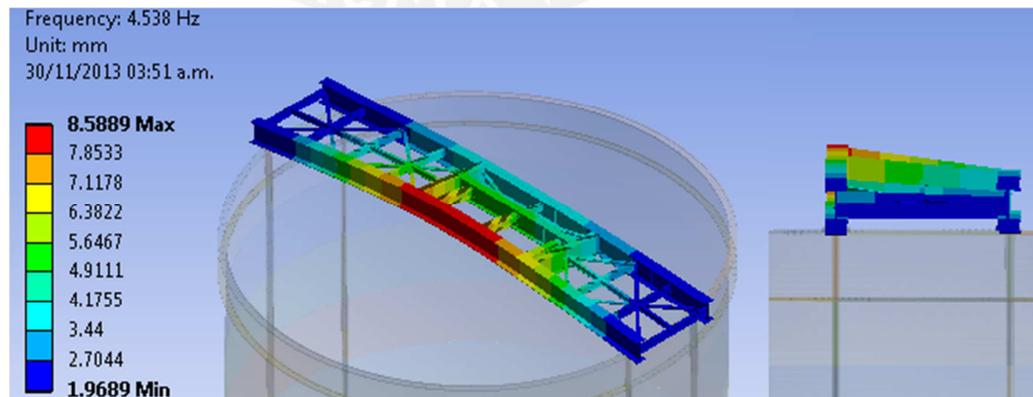


Figura 4.5. Modo de vibración a $f=4.538$ Hz mediante MEF. Error =12.5%

- **Modo 2:** Este modo de vibración presenta ambas vigas oscilando en contrafase, mientras una asciende la otra desciende. Este modo de vibración se debe también a la asimetría de la plataforma ya que esta no está centrada (figs. 4.6 y 4.7).

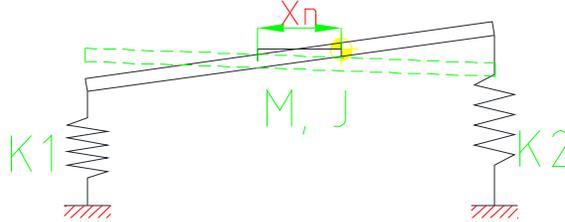


Figura 4.6. Segundo modo de vibración del modelo, $f=10.15$ Hz

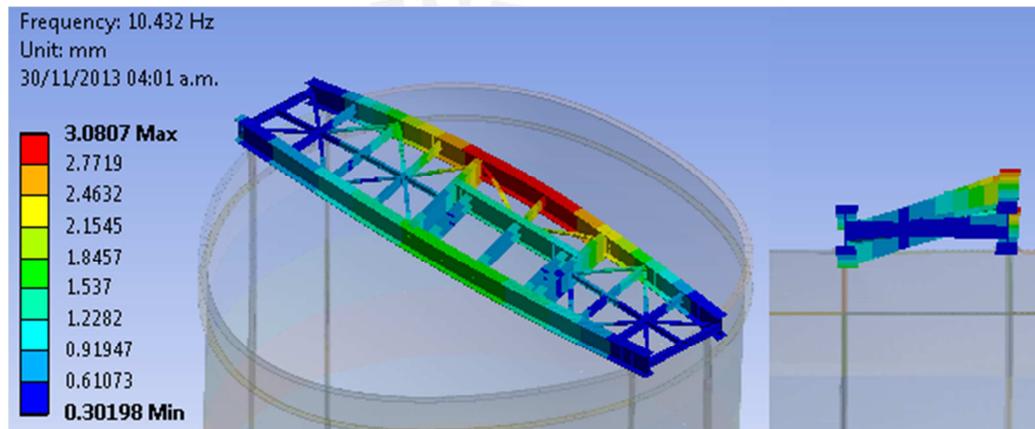


Figura 4.7. Modo de vibración a $f=10.432$ Hz mediante MEF. Error =2.78%

4.2. Frecuencias de excitación del sistema

Las frecuencias de excitación al sistema se definen de acuerdo al tipo de carga que soportará la estructura. En este caso se considerará la velocidad de operación del agitador (frecuencia 1), sus posibles múltiplos debido a la presencia de dos impulsores (frecuencia 2) y el efecto de sus tres alabes por impulsor (frecuencia 3). Se establece un rango crítico en el cual no debería aparecer ninguna frecuencia natural (tabla 4.3).

Tabla 4.3. Frecuencias críticas del sistema

| Parámetro | Unidad | Valor |
|----------------------------|--------|----------|
| Velocidad de operación | rpm | 20 |
| Numero de impulsores | und. | 2 |
| Número de alabes | und. | 3 |
| Direcciones de excitación | | X,Y,Z |
| Frecuencia de excitación 1 | Hz | 0.333 |
| Frecuencia de excitación 2 | Hz | 0.667 |
| Frecuencia de excitación 3 | Hz | 2 |
| Frecuencias críticas | Hz | 0.15 – 3 |

4.3. Análisis modal con el método de elementos finitos

Para este análisis se evaluará al conjunto tanque-plataforma, el cual en algunos casos se comportará como el modelo planteado y en otros considerará la participación del tanque en la vibración.

4.3.1 Primer modo de vibración (4.4338 Hz)

En este modo de vibración la plataforma oscila longitudinalmente a lo largo del eje “x”. Este modo de vibración depende de la rigidez de la pared del tanque, y no puede ser hallado empleado el modelo descrito anteriormente (fig. 4.8).

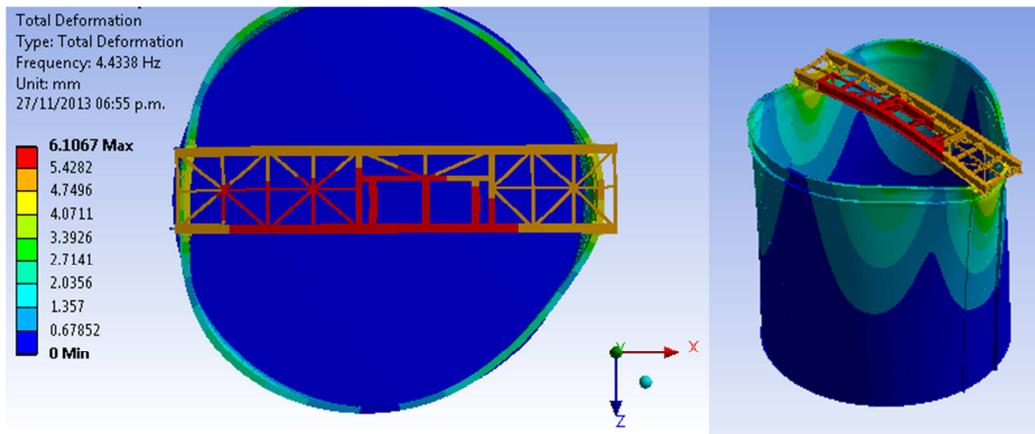


Figura 4.8. Primer modo de vibración

4.3.2 Segundo modo de vibración (f=4.5159 Hz)

En este modo de vibración la estructura presenta un modo de vibración de acuerdo al modelo descrito anteriormente con una contribución adicional de la rigidez del tanque en los apoyos. La vibración se presenta en el eje y como lo indica la figura 4.9:

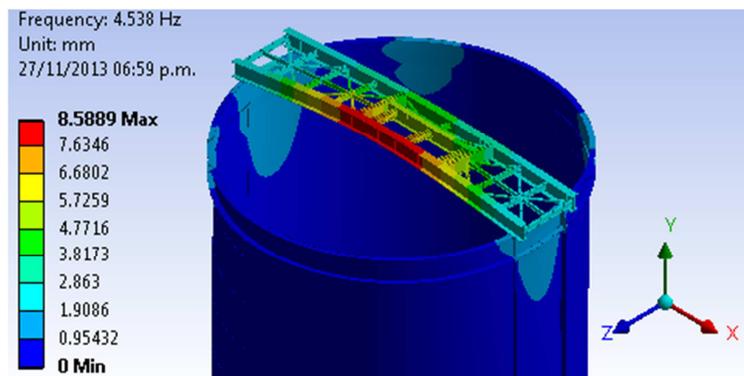


Figura 4.9. Segundo modo de vibración

4.3.3 Tercer modo de vibración ($f=6.5101$ Hz)

En este modo de vibración similar al anterior, la plataforma presenta una traslación combinada en los ejes “y” y “z”. Debido a la rigidez de la plataforma en el eje z, este modo aparece para frecuencias más altas.

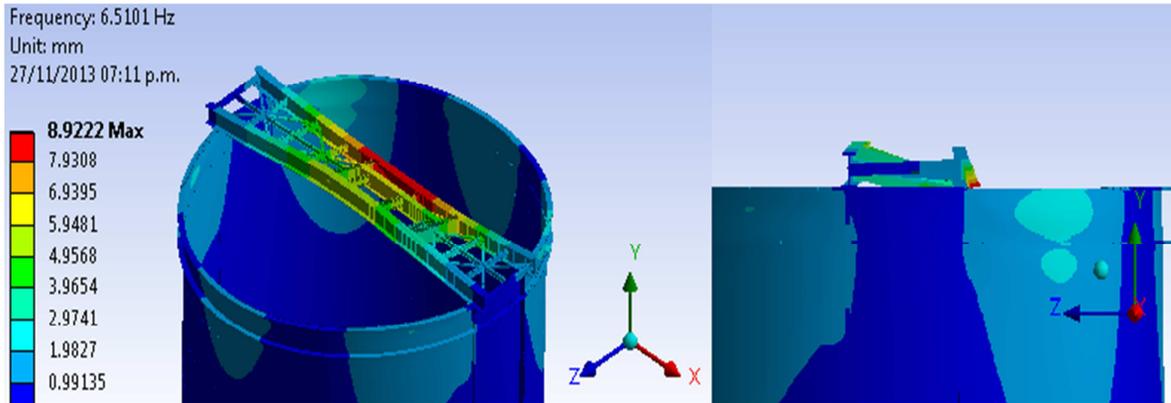


Figura 4.10. Tercer modo de vibración

4.3.4 Cuarto modo de vibración ($f= 9.4209$ Hz)

Se puede apreciar en este modo el efecto de “twist” o alabeo en la plataforma alrededor del eje “x” (figura 4.11):

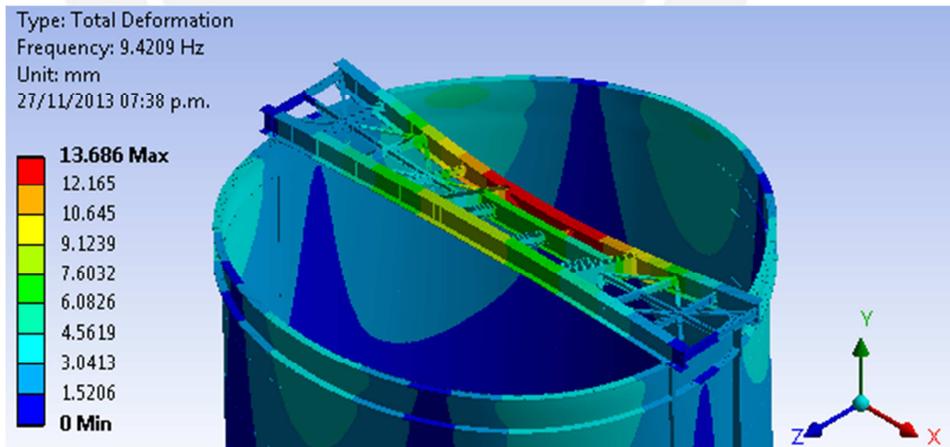


Figura 4.11. Cuarto modo de vibración

4.3.5 Quinto modo de vibración ($f= 9.4412$ Hz)

Se comienzan a apreciar a partir de esta frecuencia modos de vibración para el tanque (fig.4.12). Para mayores frecuencias aparecerán armónicos de este modo de vibración.

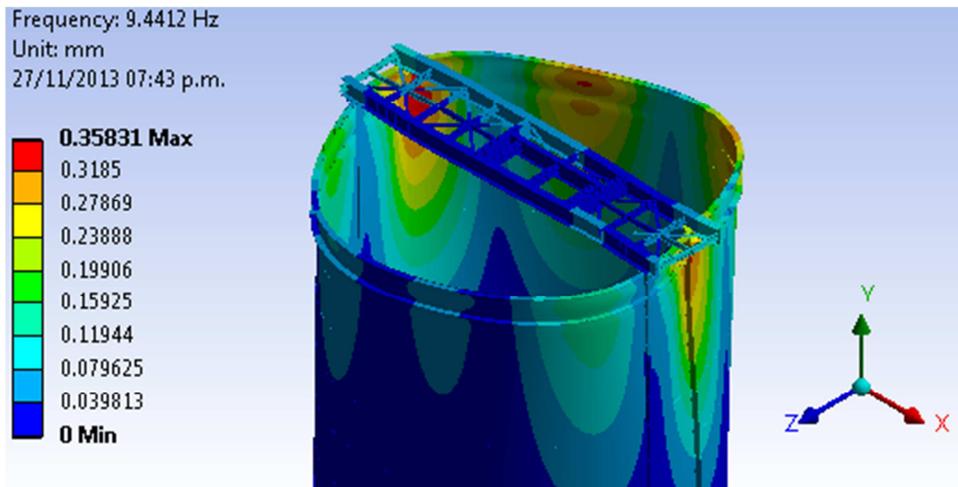


Figura 4.12. Quinto modo de vibración

4.3.6 Sexto modo de vibración ($f= 10.432\text{Hz}$)

Se aprecia la plataforma vibrando en contrafase de acuerdo a lo planteado en el modelo dinámico (fig. 4.13).

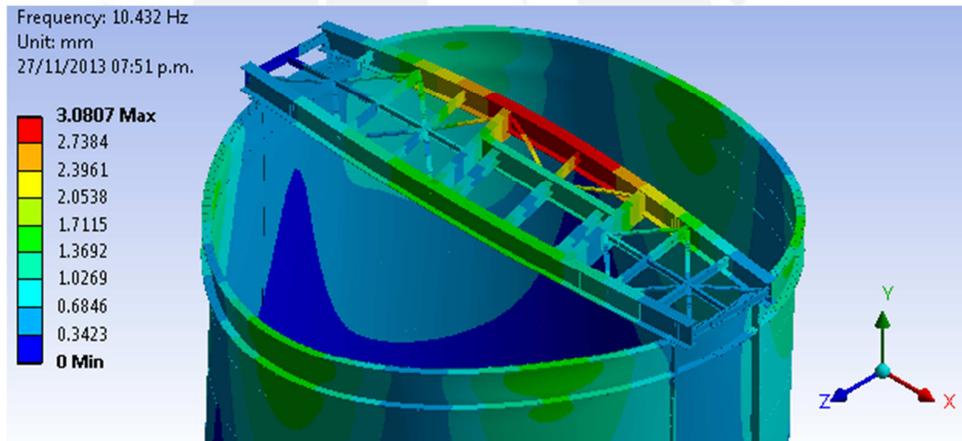


Figura 4.13. Sexto modo de vibración

4.4 Análisis de resultados

- Las frecuencias naturales se encuentran fuera y por encima del rango crítico, en consecuencia el tanque entrará en resonancia.
- Los modos 2, 3, 4 y 6 de se deben a la disposición asimétrica de la plataforma respecto al tanque y a la disposición del equipo respecto a la plataforma. Se debe en lo posible realizar un diseño simétrico ya que esto garantizará la estabilidad del conjunto.

Capítulo 5: Modificaciones a la estructura

En base a los resultados obtenidos en los capítulos anteriores se procederá a realizar una modificación a la estructura a fin de satisfacer los requerimientos y optimizar el diseño. Primero se comentara sobre las modificaciones de la estructura basándose en las no conformidades presentadas. Posteriormente se realizarán las evaluaciones con la estructura y el modelo corregido. Finalmente, se analizarán nuevamente los resultados, comparando estos con los obtenidos en el modelo anterior.

5.1. Estructura modificada

5.1.1. No conformidades observadas

En los capítulos anteriores se observaron las siguientes no conformidades:

- En la evaluación estática del tanque en el caso 1 se observó que debido a la deformación radial no uniforme de las paredes del tanque, causada por las columnas, se concentraban esfuerzos en las paredes.
- En el caso 3 de la evaluación del tanque se repite el mismo efecto al magnificar la presión debido a la carga sísmica, esta supera la resistencia admisible del material.
- En la evaluación estática de la plataforma se observa que la deflexión vertical que esta presenta no es uniforme, Esto causará un desbalance en el agitador. Además, se observa que la estructura puede aligerarse y seguir cumpliendo requerimientos de resistencia.
- En el análisis modal se generan modos de vibración que causan alabeo en la plataforma, esto debido a la configuración asimétrica del sistema.

5.1.2. Estructura modificada

En base a las no conformidades dadas se optó por realizar las siguientes modificaciones:

- Retirar las columnas que van unidas a las paredes del tanque, desde la base hasta el primer anillo de refuerzo, para evitar la concentración de esfuerzos. Solamente se mantendrán en la parte superior, que es donde refuerzan la zona de apoyo de la plataforma (fig. 5.1).

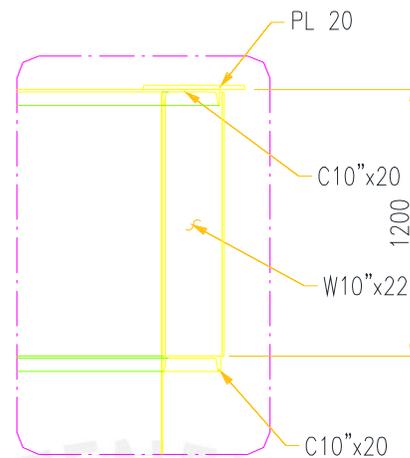


Figura 5.1. Columnas modificadas

- Se diseñará la plataforma de manera que sea simétrica respecto a su eje longitudinal. De esta manera el centro de la plataforma coincidirá con el centro del tanque. Además se ubicará al agitador en el centro de la plataforma para que la estructura esté balanceada. Adicionalmente se cambiarán las vigas principales (W30x191) por elementos más ligeros (W30x148) (fig. 5.2).

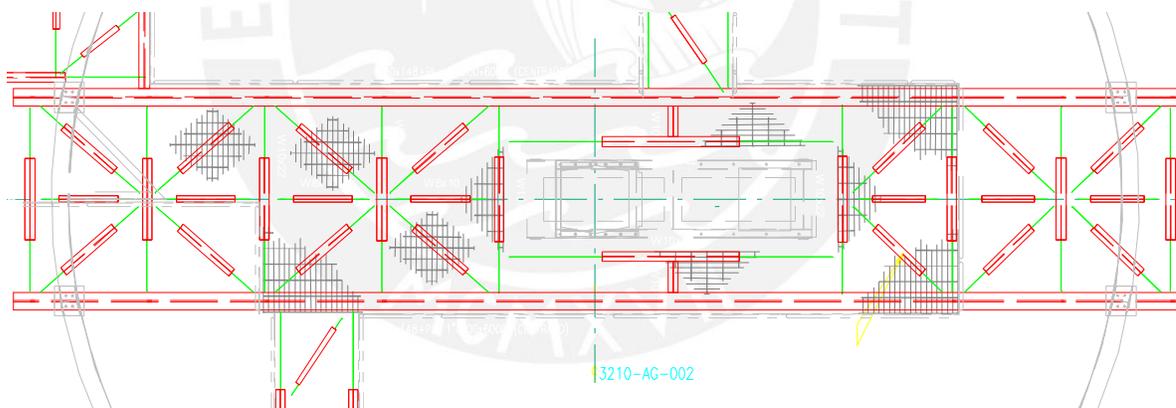


Figura 5.2. Plataforma modificada

5.2. Análisis estático del tanque

Se procede a realizar nuevamente una evaluación estructural del tanque con el modelo modificado. Solo se evaluará esta vez los casos $D+F+L+Lp$ y $D+F+L+Lp+Ex$, los cuales presentaban valores superiores al esfuerzo admisible.

5.2.1. Caso 1: D+F+L+Lp

Tabla 5.1. Resultados D+F+L+Lp

| Nivel anillo | Parámetro | Descripción | σ (MPa) | σ_{adm} (MPa) | Status |
|--------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|--------|
| Nivel 1 | σ_{max1} | Circunferencial | 115.91 | 136 | ✓ |
| Nivel 2 | σ_{max2} | Circunferencial | 127.56 | 136 | ✓ |
| Nivel 3 | σ_{max3} | Circunferencial | 108.49 | 136 | ✓ |
| Nivel 4 | σ_{max4} | Circunferencial | 100.10 | 136 | ✓ |
| Nivel 5 | σ_{max5} | Circunferencial | 91.95 | 136 | ✓ |
| Nivel 6 | σ_{max6} | Circunferencial | 62.39 | 136 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_{max7} | Circ. + Flex. | 29.31 | 136 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_{c7} | Compresión Y. | -18.16 | -41.77 | ✓ |

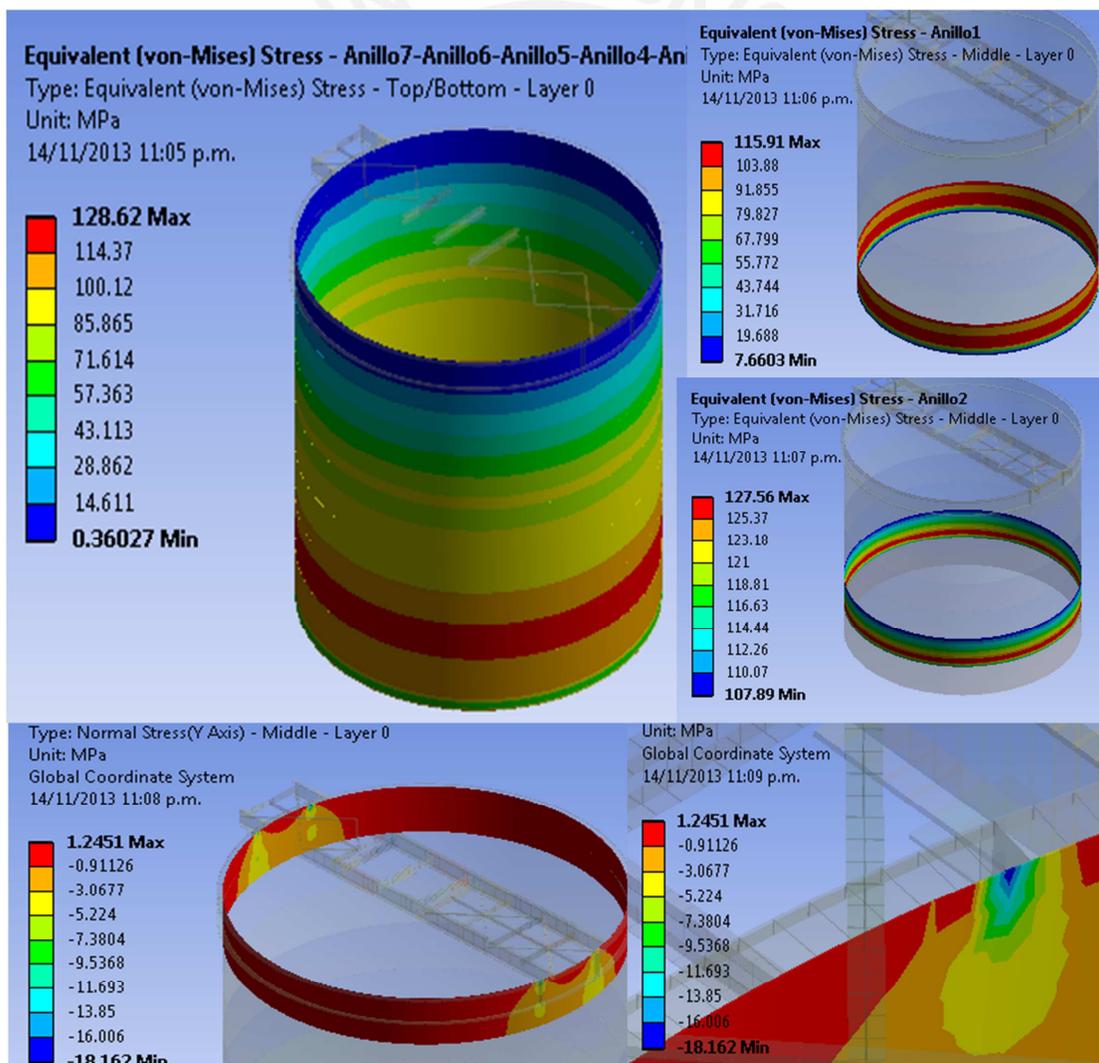


Figura 5.3. Resultados D+F+L+Lp

5.2.2. Caso 3: D+F+L+Ex

Tabla 5.2. Resultados D+F+L+Ex

| Nivel anillo | Parámetro | Descripción | σ (MPa) | σ_{adm} (MPa) | Status |
|--------------|-----------------|---------------|----------------|----------------------|--------|
| Nivel 1 | σ_{max1} | Circ.+Comp. | 160.42 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 1 | σ_{c1} | Compresión Y | -31.50 | -69.74 | ✓ |
| Nivel 2 | σ_{max2} | Circ. + Comp. | 171.42 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 3 | σ_{max3} | Circ. + Comp. | 145.93 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 4 | σ_{max4} | Circ. + Comp. | 137.50 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 5 | σ_{max5} | Circ. + Comp. | 128.53 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 6 | σ_{max6} | Circ. + Comp. | 89.90 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_{max7} | Circ. + Comp. | 45.47 | 180.88 | ✓ |
| Nivel 7 | σ_{c7} | Compresión Y | -18.95 | -41.77 | ✓ |

Tabla 5.3. Cálculo de pernos de anclaje

| Cálculo de fuerzas en la base | | | |
|---|---------|----------|-----------------|
| Parámetro | Símbolo | Valor | Unidad |
| Momento total en la base | Ms | 8.67E+10 | N.mm |
| Momento total en la base | Ms | 8.67E+07 | N.m |
| Fuerza vertical sobre la base sin considerar fluido | Wt | 9.19E+05 | N |
| Fuerza lineal vertical | wt | 5.78E+04 | N/m |
| Verificación de pernos de anclaje | | | |
| Fuerza total de levante | wab | 3.79E+05 | N/m |
| Fuerza de levante por perno | tb | 5.26E+05 | N |
| Área de cada perno | Ap | 1963.49 | mm ² |
| Esfuerzo admisible de fluencia para cada perno | Fyadm | 330 | MPa |
| Esfuerzo en el perno de anclaje | Tb | 268 | MPa |
| Verificación esfuerzos perno | | ✓ | |

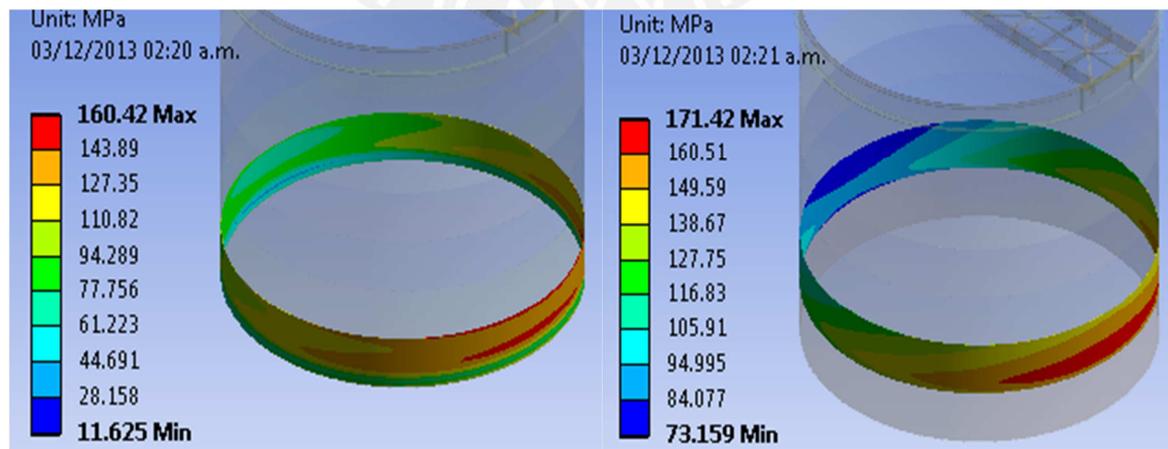


Figura 5.4. Resultados D+F+L+Ex. Esfuerzos Von Misses en primer (izq.) y segundo anillo (der.)

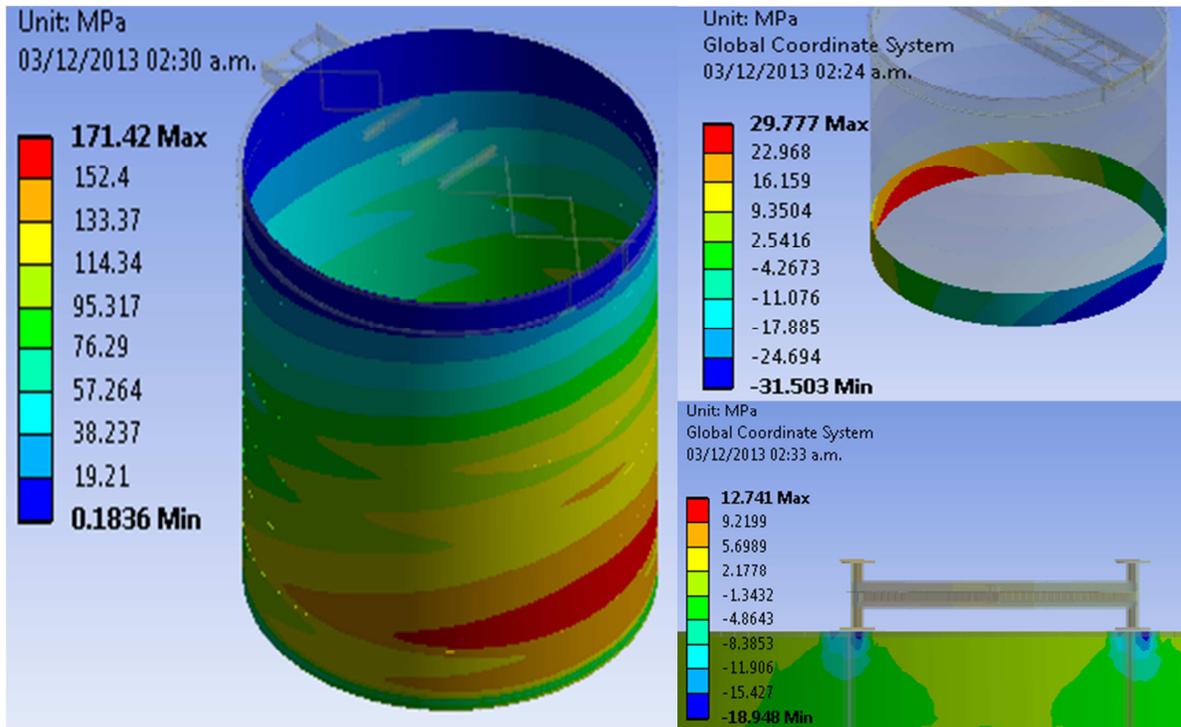


Figura 5.5. Resultados D+F+L+Ex. Esfuerzos de Von Misses(izq.) y esfuerzos normales eje Y(der.)

5.3. Análisis estático de la plataforma

Se realizó la evaluación estructural de la plataforma modificada de acuerdo a la norma. Se muestran los resultados del caso más crítico entre todas las combinaciones de carga aplicables (fig. 5.6, 5.7 y tabla 5.4).

5.3.1. Caso más crítico: 1.2D+1.6L+0.5Lp

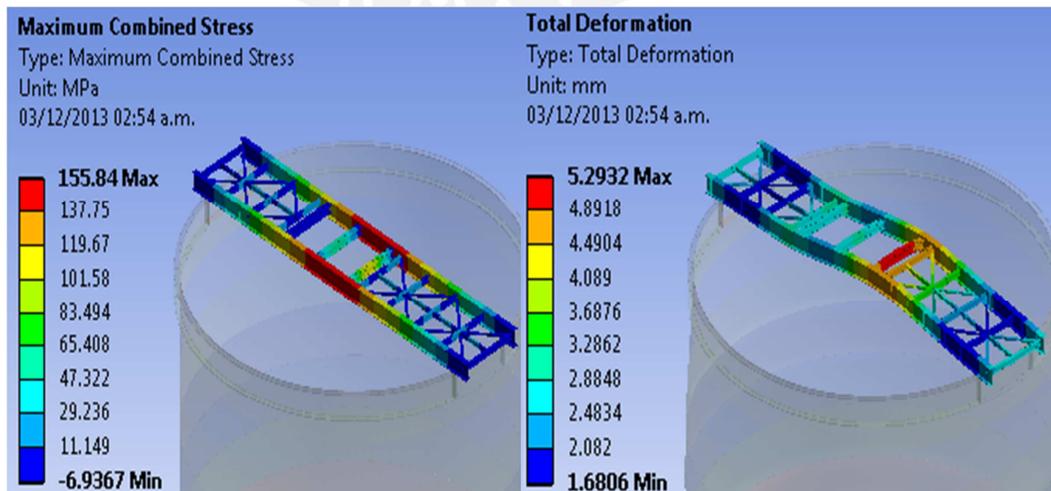


Figura 5.6. Resultados análisis plataforma 1.2D+1.6L+0.5Lp

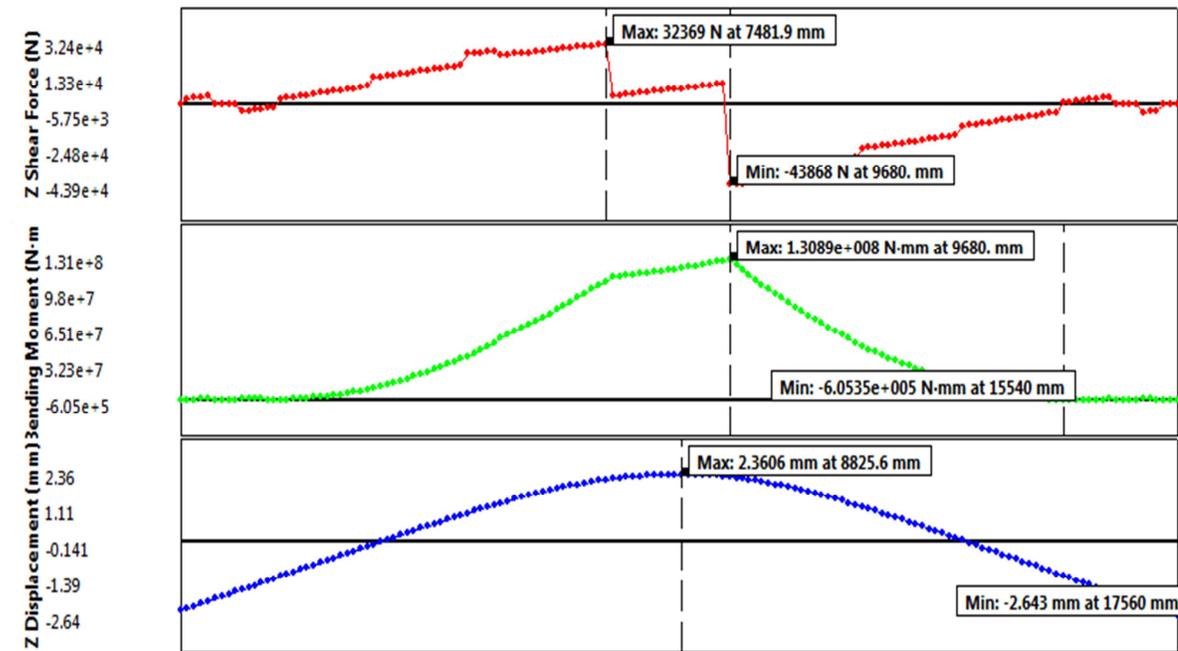


Figura 5.7. Diagrama de fuerzas internas de la viga principal. Caso 1.2D+1.6L+0.5Lp

Tabla 5.4. Resultados 1.2D+1.6L+0.5Lp

| PERFIL | Verificación | Valor requerido | Valor admisible | Factor de utilización | Factor máximo | Status |
|---------|--|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------|
| W30x148 | Momento flector (kN.m) | 13.10 | 222 | 0.06 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 21.60 | 2358.7 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 155.84 | 345 | 0.45 | 0.9 | ✓ |
| W12x87 | Momento flector (kN.m) | 7.03 | 66.72 | 0.11 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 56.92 | 726.15 | 0.08 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 119 | 345 | 0.34 | 0.9 | ✓ |
| W10x22 | Momento flector (kN.m) | 0.63 | 13.11 | 0.05 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 4.43 | 321.3 | 0.01 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 19.40 | 345 | 0.06 | 0.9 | ✓ |
| W8x10 | Momento flector (kN.m) | 0.15 | 4.38 | 0.03 | 0.9 | ✓ |
| | Corte alma (kN) | 3.24 | 187.7 | 0.02 | 0.9 | ✓ |
| | Esfuerzo máximo combinado (MPa) | 13.02 | 345 | 0.04 | 0.9 | ✓ |
| W10-W30 | Unión (kN) | 4.43 | 233.73 | 0.02 | 0.75 | ✓ |
| W8-W10 | Unión (kN) | 3.24 | 233.73 | 0.01 | 0.75 | ✓ |

5.3.2. Desplazamientos

Los desplazamientos a los que se somete la estructura en distintas condiciones de servicio se muestran en la tabla 5.5:

Tabla 5.5 Resultados desplazamientos

| Caso | Ux (mm) | Separación X mínima (mm) | Uy(mm) | Uy máx. (mm) | Verificación |
|----------|---------|--------------------------|---------|--------------|--------------|
| D | - | - | -15.867 | -20 | ✓ |
| D+F+L | - | - | -2.1639 | ±10 | ✓ |
| D+F+L+Ex | 9.3269 | 30 | -3.9671 | ±10 | ✓ |

5.4. Análisis modal del conjunto

Se realizó un análisis modal del modelo modificado. A continuación se muestran los tres primeros modos de vibración.

5.4.1. Primer modo ($f=4.1712\text{Hz}$)

Se observa un modo de vibración a flexión en el eje vertical. En este modo la plataforma vibra uniformemente debido a la simetría constructiva (fig. 5.7).

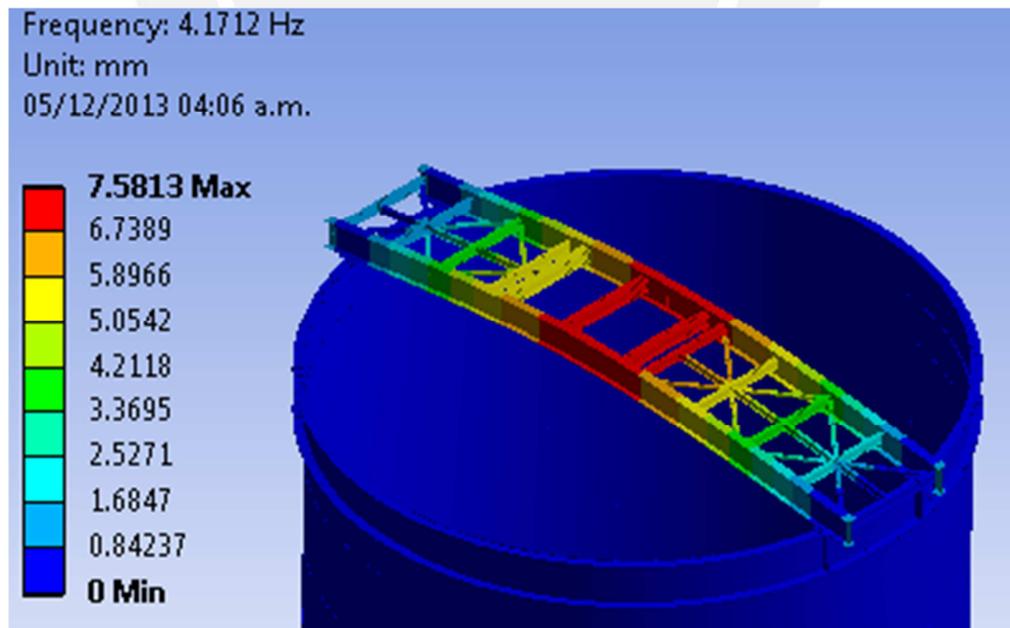


Figura 5.7. Primer modo de vibración

5.4.2. Segundo modo ($f=4.7932$ Hz)

El segundo modo de vibración corresponde a una traslación longitudinal de la plataforma (fig. 5.8).

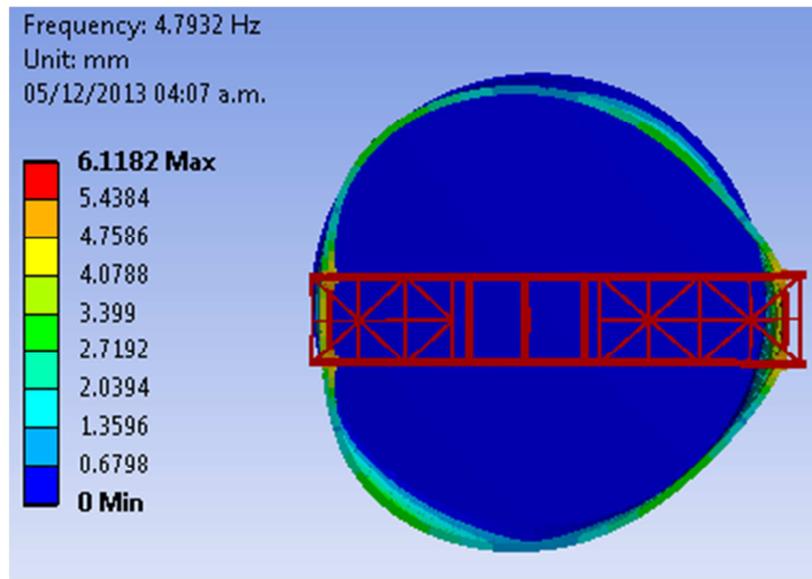


Figura 5.8. Segundo modo de vibración

5.4.3. Tercer modo ($f=5.6155$ Hz)

Este modo corresponde a una deflexión transversal de la plataforma (fig. 5.9).

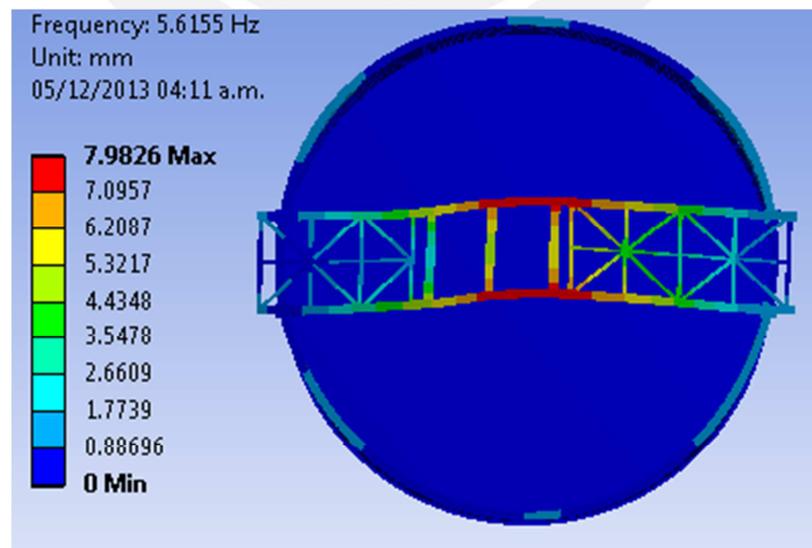


Figura 5.9. Tercer modo de vibración

5.5. Análisis de resultados

Se observa lo siguiente:

Respecto a la evaluación del tanque:

- Se suprimió el efecto de concentración de esfuerzos en las paredes al retirar las columnas del tanque. Con ello, en el caso 1, se logró disminuir el esfuerzo equivalente en las paredes de 155 MPa a 116 MPa para el primer anillo y de 140 MPa a 128 MPa para el segundo, logrando estar debajo del rango admisible (136 MPa). En el caso 3, se redujo el esfuerzo equivalente en las paredes de 196 MPa a 160 MPa para el primer anillo y de 184 MPa a 171 MPa para el segundo, logrando estar debajo del rango admisible (181 MPa).
- La ausencia de las columnas en la parte inferior no comprometió la estabilidad elástica del tanque. El esfuerzo de compresión en dirección vertical fue de 32 MPa siendo el admisible 41 MPa.

Respecto a la evaluación de la plataforma:

- Se puede apreciar que la plataforma soporta las cargas aplicadas llegando en el caso más crítico a trabajar a un 45% de su resistencia nominal, siendo el factor de resistencia admisible de 90%.
- Pese a que se aligeró la estructura, la deflexión se encuentra dentro de límites admisibles. No supera los 20mm bajo carga muerta y tampoco sobrepasa los 10mm cuando está en servicio.

Respecto al análisis modal:

- El primer modo que se genera en la plataforma es con las vigas principales sometidas a flexión en la misma fase, esto está dado por la simetría de la estructura.
- Para el primer caso la frecuencia disminuyó de 4,51 Hz a 4,17 Hz debido a la disminución de la rigidez.
- En el segundo se incrementó la frecuencia de 4,43 Hz a 4,79 Hz debido a que la plataforma se aligeró.
- Todas las frecuencias naturales se encuentran por encima del rango crítico.

Conclusiones

1. Se logró realizar una evaluación estructural del conjunto tanque-plataforma de lixiviación en base a los requerimientos de las normas API 650 y AISC 360, desarrollada aplicando el Método de los Elementos Finitos (MEF).
2. Se verifica en la evaluación estructural del diseño preliminar que no se cumplen los requerimientos de diseño.
 - Para el análisis estático del tanque, los resultados muestran que los esfuerzos en las paredes exceden en un 14% al esfuerzo admisible en el caso más crítico, esto debido a la concentración de esfuerzos por la presencia de columnas que no permitían una expansión uniforme.
 - Respecto al análisis estático de la plataforma los resultados indican que esta no falla por resistencia, ya que presenta un factor de utilización de 42% en su estado límite de esfuerzos combinados, pudiendo llegar a 90%. Respecto a la rigidez, las cargas no se distribuyen uniformemente en la plataforma lo cual se refleja en la deflexión asimétrica que esta presenta.
 - Respecto al análisis dinámico, se verifica que el diseño preliminar presenta frecuencias naturales por encima del rango crítico de excitación (0.15 Hz – 3 Hz). Se aprecia que los modos generados se deben a la disposición asimétrica del diseño preliminar.
3. Se verifica en la evaluación del diseño modificado que se cumple con todos los requerimientos de diseño.
 - En el análisis del tanque, manteniendo solo las columnas en la parte superior del tanque, se aprecia en los resultados que los esfuerzos en las paredes llegan al 95% del esfuerzo admisible para el caso más crítico. En consecuencia, no se requieren columnas de refuerzo en la parte inferior de las paredes; por otro lado, en la parte superior estas sí son necesarias ya que ayudan a distribuir el esfuerzo de compresión de las paredes en una corta longitud (en menos de un metro se reduce a un 75% de su valor máximo).
 - Los resultados del análisis estático de la plataforma muestran que esta distribuye las cargas de una manera más uniforme y no falla por resistencia. El diseño simétrico y balanceado de la plataforma permite reducir su peso en un 42% y seguir cumpliendo los requerimientos de resistencia y rigidez.

- El análisis modal del conjunto modificado, presenta frecuencias naturales mayores a las frecuencias críticas de excitación (0.15 Hz – 3 Hz). Los modos de vibración muestran que las masas en la plataforma se distribuyen correctamente. Las frecuencias naturales disminuyeron debido a que la estructura es menos rígida (4.17 Hz en adelante).
- 4. El modelo conceptual planteado, considerando las simplificaciones indicadas, es el adecuado ya que logra representar el comportamiento general del conjunto tanque-plataforma y permite cumplir los objetivos de esta evaluación. Análogamente, el modelo por elementos finitos elaborado logra representar el comportamiento del modelo conceptual. Los elementos viga y placa seleccionados para cada componente tienen los grados de libertad necesarios. Asimismo, las condiciones de borde definidas son comparables a las restricciones reales. Por último, las cargas están correctamente modeladas ya que representan condiciones reales y el error comparativo con el cálculo analítico es bajo (en general, menor al 10%).
- 5. La carga sísmica (E) modelada por el MEF en base a las normas API 650 y NTE E.030 logra una representación más detallada del método de la cortante basal, ya que modela de manera continua cargas planteadas como discretas en las normas con un bajo error de aproximación (3.93%). Además, la distribución de presiones debido a la carga sísmica en las paredes del tanque representan las ecuaciones de las normas API 650 y ACI 350.3 al igual que los esfuerzos calculados en la pared.
- 6. De acuerdo a la metodología seguida y a lo explicado anteriormente, los análisis de combinaciones de cargas brindan resultados confiables; al igual que el análisis modal.
- 7. El método LRFD aplicado en conjunto con el MEF permite realizar un análisis eficaz; ya que permite modelar cargas por separado, realizar las respectivas combinaciones de carga y evaluar distintos estados límite de manera rápida y con gran exactitud. Esto permitió conocer de manera detallada el estado de la plataforma evaluada.
- 8. La norma API 650 es una herramienta confiable en el diseño de tanques de almacenamiento y modelado de sus cargas, siempre que se tomen en cuenta las recomendaciones de diseño planteadas. Sin embargo, para condiciones especiales como en el caso de la plataforma montada sobre el tanque, no brinda información suficiente. Por ello, cualquier modificación de diseño respecto a un tanque de almacenamiento convencional deberá ser respaldada por análisis más detallado, como en el presente trabajo.

Recomendaciones

1. Para evaluaciones estructurales se recomienda seguir el procedimiento planteado en este trabajo tomando énfasis en la definición del problema, el levantamiento de información y el modelo conceptual a elaborar. Un correcto planteamiento en estas etapas asegura un modelo de elementos finitos adecuado que represente las características reales del sistema en cuestión.
2. Respecto a las normas de diseño empleadas, se deben modelar las cargas cumpliendo con lo establecido en ellas. Sin embargo, es importante el criterio para definir si se puede desprestigiar o simplificar alguna de ellas; esto con el fin de reducir tiempo computacional sin dejar de ser un modelo correcto. Estas cargas deberán ser contrastadas mediante cálculos analíticos que muestren un error relativo bajo.
3. Respecto al método de los elementos finitos (MEF) se debe seleccionar adecuadamente el tipo y tamaño del elemento finito a emplear. Esto dependerá del tipo de cargas que soportará el elemento y el tipo de resultado que se espera analizar.
4. Emplear elementos tipo viga y tipo placa para un análisis estructural cuyo fin sea estudiar el comportamiento global. Si el interés es analizar efectos locales de concentración de esfuerzo, se recomienda emplear elementos con una mayor cantidad de grados de libertad (placa y sólido, respectivamente). Sin embargo, esto requeriría mayor cantidad de recursos computacionales.
5. Tener sumo cuidado en modelar las condiciones de borde. En algunos programas se establece por defecto la condición de borde de unión tipo rígida. Se debe brindar la flexibilidad necesaria de acuerdo a las condiciones reales; caso contrario los resultados se alejarían de condiciones reales.
6. Respecto a la evaluación estructural realizada, se recomienda verificar los resultados obtenidos una vez realizado el montaje de la estructura. Esto permitirá confirmar la exactitud del modelo y sus posibles imprecisiones.
7. Debido al alcance del trabajo no se consideraron las silletas de anclaje en el modelo de elementos finitos, solo se consideraron las restricciones que imponen; no obstante se recomienda para posteriores trabajos realizar un estudio detallado de esta zona.
8. Para simplificar el análisis se modelaron todas las conexiones en un mismo plano. Sin embargo, debido a la excentricidad se generan cargas adicionales en la estructura. Para fines prácticos y conservadores se debe trabajar con factores de utilización bajos. Se recomienda considerar estos efectos para estudios posteriores.

Bibliografía

ALENCASTRE MIRANDA, Jorge

2013 Separatas del curso: Elementos finitos en el diseño mecánico. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima: 2013

ALENCASTRE MIRANDA, Jorge

2012 Separatas del curso: Vibraciones. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima: 2012

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI)

2006 Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and commentary (ACI 350.3-06). Julio 3, 2006. Farmington Hills: ACI comitee.

AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION (AISC)

2010 Specification for structural Steel buildings. Junio 22, 2010. Chicago: AISC Comitee of Specifications.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API)

2010 *Welded Tanks for Oil Storage*. 11va edición, segunda adenda. Washington D.C.: API Publishing Services.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE)

2010 Minimun design loads for buildings and other structures. Diciembre 22, 2010. Reston: American Society of Civil Engineers.

ANSYS. Inc

2013 Manual del usuario. ANSYS R14.5.7.

BARTON MARTINELLI, Augusto Enrique

2003 Evaluación de una estructura no convencional por el método de los elementos finitos. Tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

DA FONSECA LOPES, Zeferino

2011 *El método de los elementos finitos: una introducción*. Fondo Editorial Biblioteca URU. Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela, 2011.

HIBBELER, R.C.

1999 Structural Analysis. Cuarta edición. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 1999.

JIMENEZ DE CISNEROS Y FONFRÍA, Juan José

2013 *Influencia de las uniones en el comportamiento global estructural*. Seminario. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Postgrado.

MÁQUINAS Y TECNOLOGÍAS S.A.C.

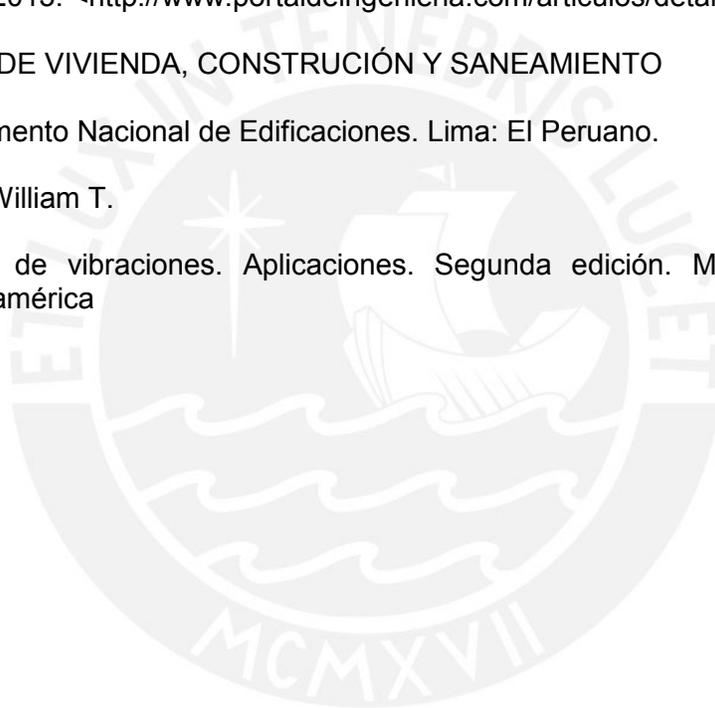
2013 Agitación y mezcla. Artículo en portal de ingeniería Pi. Fecha de consulta: 4 de mayo 2013. <<http://www.portaldeingenieria.com/articulos/detalle/9569/1/>>

MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO

2006 Reglamento Nacional de Edificaciones. Lima: El Peruano.

THOMSOM, William T.

1982 Teoría de vibraciones. Aplicaciones. Segunda edición. México: Prentice Hall Latinoamérica





ANEXO A: Cálculo de parámetros sísmicos para el tanque según API 650 [API, 2010]

Este anexo muestra de manera detallada como se determinaron los parámetros sísmicos para hallar la aceleración impulsiva y convectiva A_i y A_c respectivamente. Estos parámetros serán usados para modelar la carga sísmica de cortante basal V , Momento de volteo M_{rw} y esfuerzos en la pared. Adicionalmente se calcularán los esfuerzos admisibles de compresión para cada anillo.

A.1. Grupo de uso sísmico (SUG)

El grupo de uso sísmico está definido por la importancia de la estructura y los peligros que supondrían un derrame o falla en la estructura. Existen 3 grupos:

- **SUG III:** Tanques esenciales para funcionamiento 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.

Debido a que el tanque presenta cierto riesgo en la planta y presenta sistemas de drenaje pertenecerá al grupo de uso sísmico II (**SUG II**).

A.2. Parámetros de movimiento del terreno

Para sitios no definidos por la ASCE 7, como el caso de Perú existen procedimientos específicos de sitio como la Norma Técnica de Edificaciones E0.30: Diseño Sismorresistente [MVCS, 2006]. En esta norma se encuentra un factor denominado **factor Zona** (ver tabla 1.6) el cual en este caso vendría a ser la aceleración pico del terreno S_p . Entonces se tiene:

$$S_p = 0.4 g$$

Entonces se pueden determinar los siguientes parámetros.

$$S_s = 2.5 S_p = 1g \quad (\text{Ec. A.1})$$

$$S_1 = 1.25 S_p = 0.5g \quad (\text{Ec. A.2})$$

Dónde:

- S_s es la máxima aceleración sísmica, 5% amortiguada de periodos cortos (0.2s) asociada al periodo impulsivo, (%g).
- S_1 es la máxima aceleración sísmica, 5% amortiguada de periodos de 1s asociada al periodo convectivo, (%g).

Estos parámetros serán modificados debido al tipo de suelo en el sitio. De acuerdo al informe final de condiciones Geotécnicas del proyecto, se determina que la clasificación del terreno según IBC (International Building Code) corresponde a un terreno **tipo D** (suelo rígido). Conociendo este dato se obtienen los coeficientes de sitio basados en aceleración (F_a) y velocidad (F_v).

Tabla A.1. Valor de F_a en función del terreno

| Site Class | Mapped Maximum Considered Earthquake 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 | a | a | a | a | a |

^aSite-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.

Tabla A.2. Valor de F_v en función del terreno

| Site Class | Mapped Maximum Considered Earthquake Spectral Response Accelerations at 1 Sec Periods | | | | |
|------------|---|-------------|-------------|-------------|----------------|
| | $S_1 \leq 0.1$ | $S_1 = 0.2$ | $S_1 = 0.3$ | $S_1 = 0.4$ | $S_1 \geq 0.5$ |
| 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 | a | a | a | a | a |

^aSite-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.

Se tiene entonces:

$$F_a = 1.1$$

$$F_v = 1.5$$

A.3. Periodo estructural de vibración

Como se explicó en el capítulo 3 la estructura vibrará con 2 periodos distintos. Parte del fluido vibrará junto a la estructura con el periodo impulsivo de vibración y la otra parte del fluido vibrará con el periodo convectivo.

El periodo impulsivo (T_i) se calcula con la siguiente expresión.

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \frac{C_i H}{\sqrt{t_u/D}} \sqrt{\frac{\rho}{E}} = 0.2295 \text{ s} \quad (\text{Ec. A.3})$$

Dónde:

- C_i es un coeficiente extraído de gráficas (Figura A.1.) en función de H/D.
- H es la altura de diseño, m.
- D es el diámetro del tanque, m.
- t_u es el espesor de pared equivalente, mm.
- ρ es la densidad del fluido, kg/m^3 .
- E es el módulo de elasticidad del material, MPa.

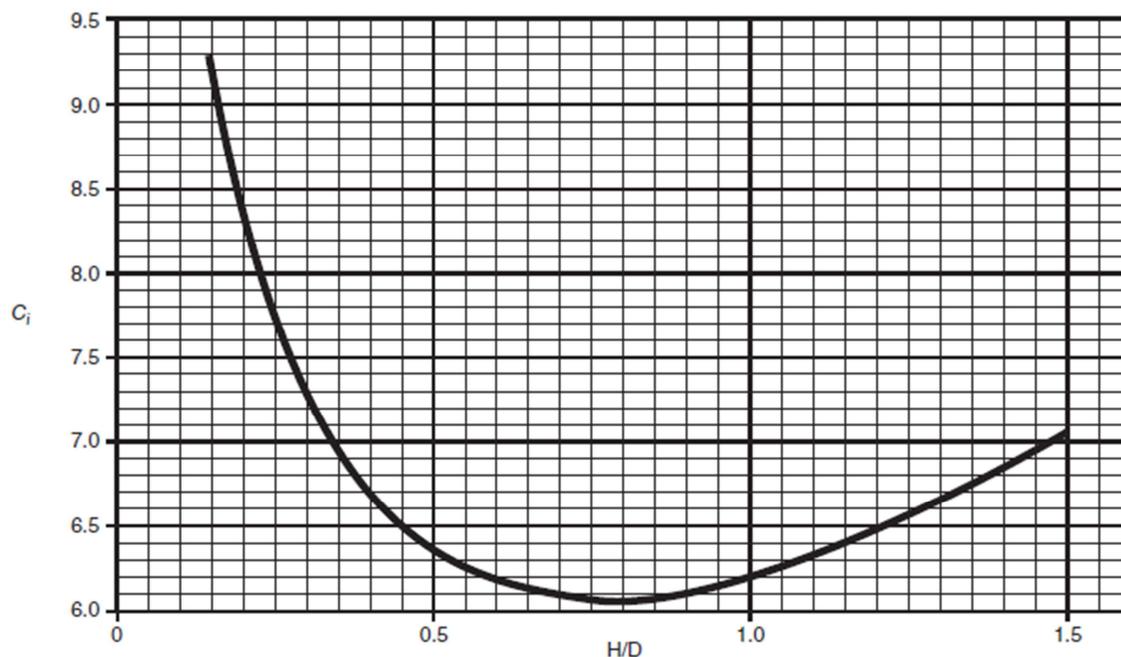


Figura A.1. Coeficiente de modificación del periodo impulsivo [API, 2010]

El periodo convectivo (T_c) se calcula empleando las siguientes expresiones:

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh \frac{3.68H}{D}}} = 0.5783 \quad (\text{Ec. A.4})$$

$$T_c = 1.8K_s\sqrt{D} = 4.1508 \text{ s} \quad (\text{Ec. A.5})$$

A.4. Aceleraciones espectrales de diseño

Las aceleraciones espectrales de diseño para las componentes impulsiva (A_i) y convectiva (A_c) se calcularán a continuación. Se empleará un periodo de transición T_L para movimientos de grandes periodos igual a 4s. Se debe determinar el factor de modificación para cargas impulsivas (R_{wi}) y convectivas (R_{wc}) (tabla A.3), y el factor de importancia (I) (tabla A.4):

Tabla A.3. Factor de modificación de respuesta para métodos ASD [API, 2010]

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

Tabla A.4. Factor de importancia (I) [API, 2010]

| Seismic Use Group | I |
|-------------------|------|
| I | 1.0 |
| II | 1.25 |
| III | 1.5 |

Se emplearán las expresiones extraídas de la norma:

$$A_i = 2.5QF_aS_p \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) \quad (\text{Ec. A.6})$$

$$A_c = 2.5KQF_aS_p \frac{T_s T_L}{T_c^2} \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \quad (\text{Ec. A.7})$$

Dónde:

- $I = 1.25$: coeficiente de importancia (SUG II).
- $R_{wi} = 4$: coeficiente de reducción de fuerza para el modo impulsivo según ASD.
- $R_{wc} = 2$: coeficiente de reducción de fuerza para el modo convectivo según ASD.
- $Q = 1$: factor de escala para zonas no definidas por ASCE 7.
- $K = 1.5$: coeficiente de ajuste de la aceleración espectral.
- $T_s = (F_v S_1) / (F_a S_s) = 0.6818 \text{ s}$

Se obtiene:

$$A_i = 0.3438g; \quad A_c = 0.1632g$$

A.5. Masas impulsiva y convectiva

Como se mencionó parte de la masa vibrará de manera impulsiva (W_i) y la otra parte de manera convectiva (W_c). Para determinar este porcentaje de masa se calcula primero la masa total del contenido (W_p):

$$W_p = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 H g \rho = 45719685 \text{ N} = 4588 \text{ t} \quad (\text{Ec. A.8})$$

Dónde:

- $D = 15.9 \text{ m}$ es el diámetro del tanque
- $H = 16.3 \text{ m}$ es la altura de diseño
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ es la aceleración de la gravedad
- $\rho = 1440 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del fluido

$$W_i = \left(1 - 0.218 \frac{D}{H}\right) W_p; \quad D/H \leq 1.33 \quad (\text{Ec. A.9})$$

$$W_i = 35997380 \text{ N} = 3613 \text{ t}$$

$$W_c = 0.230 \frac{D}{H} \tanh \frac{3.67H}{D} W_p = 10246414 \text{ N} = 1028 \text{ t} \quad (\text{Ec. A.10})$$

Los **centros de acción para las fuerzas laterales** efectivas X_i y X_c se calculan empleando las siguientes expresiones:

$$X_i = \left(0.5 - 0.094 \frac{D}{H}\right) H; \quad X_c = \left(1 - \frac{\cosh \frac{3.67H}{D} - 1}{\frac{3.67H}{D} \sinh \frac{3.67H}{D}}\right) H \quad (\text{Ec. A.11, A.12})$$

$$X_i = 6.6554 \text{ m}; \quad X_c = 12.164 \text{ m}$$

A.6. Determinación de esfuerzos admisibles de compresión

El esfuerzo admisible de compresión F_c dependerá para cada nivel del tanque de las dimensiones que tenga la pared, siendo especialmente importante el espesor t . De esta manera el esfuerzo admisible toma los siguientes valores:

- Si $\frac{GHD^2}{t^2} \geq 44$: $F_c = 83t/D$ (Ec. A.13)

- Si $\frac{GHD^2}{t^2} < 44$: $F_c = \frac{83t}{(2.5D)} + 7.5\sqrt{GH} < 0.5F_y$ (Ec. A.14)

Dónde:

- **G** es la gravedad específica
- **H** es la altura de diseño, en m
- **D** es el diámetro del tanque, en m
- **t** es el espesor del nivel, en mm
- **F_y** es el esfuerzo de fluencia del material, en MPa

Se evalúan las cargas de compresión en los anillos 1, 2 y 7. Donde 1 representa al anillo inferior y 7 al superior. Los esfuerzos admisibles para estos 3 anillos son los siguientes (tabla A.5):

Tabla A.5. Esfuerzos admisibles de compresión

| Anillo | F _c (MPa) |
|---------------|----------------------|
| Primer nivel | 69.74 |
| Segundo nivel | 61.39 |
| Séptimo nivel | 41.76 |

ANEXO B: Determinación de estados límite de resistencia [AISC, 2010]

Este anexo muestra el proceso desarrollado para determinar los estados límite que fueron verificados en el presente trabajo para el análisis estático de la plataforma. Se partirá primero por definir las propiedades de la sección de cada perfil evaluado y posteriormente se determinan los estados límite de acuerdo a estos tipos de sección.

B.1. Propiedades de la sección

Para definir las propiedades de la sección se requiere conocer las dimensiones de los elementos empleados y sus características mecánicas principales. Las tablas B.1 y B.2 muestran estas características.

Tabla B.1. Características de los perfiles a emplear

| Característica | Valor | Unidad |
|---------------------------------|------------|--------|
| Norma de los perfiles | ASTM A6/6M | |
| Material a emplear | ASTM A992M | |
| Módulo de elasticidad (E) | 200000 | MPa |
| Módulo de corte (G) | 77200 | MPa |
| Fluencia del material (F_Y) | 345 | MPa |
| Esfuerzo máximo (F_U) | 450 | MPa |

Tabla B.2. Dimensiones de los perfiles evaluados

| ELEMENTO | PERFIL | Ancho ala (bf) (mm) | Peralte (h) (mm) | Espesor ala (tf) (mm) | Espesor alma (tw) (mm) | Radio redondeo (r) (mm) |
|--------------------------------|---------|---------------------|------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| Viga principal diseño original | W30x191 | 381 | 777.87 | 30.16 | 17.46 | 22.23 |
| Viga transversal plataforma | W10x22 | 146.05 | 257.17 | 9.53 | 6.35 | 14.29 |
| Vigueta longitudinal | W8x10 | 101.6 | 200.02 | 4.76 | 4.76 | 12.7 |
| Vigas refuerzo de plataforma | W30x132 | 266.7 | 768.35 | 25.4 | 15.88 | 22.23 |
| Vigas soporte de agitador | W12x87 | 307.97 | 317.5 | 20.64 | 12.7 | 22.23 |
| Arriostre | WT4x9 | 133.35 | 103.18 | 7.94 | 6.35 | 12.7 |
| Viga principal nuevo diseño | W30x148 | 266.7 | 777.87 | 30.16 | 15.88 | 22.23 |

En la norma AISC 360 [AISC, 2010] se brindan tablas que permiten determinar la relación límite ancho/espesor tanto para cargas de compresión como de flexión. Con ello se logra determinar el tipo de perfil, ya que se determinan los tipos de elementos de acuerdo al tipo de carga. Para los perfiles seleccionados se muestra un extracto de esta en las tablas B.3 y B.4:

Tabla B.3. Relación Ancho/espesor para elementos sometidos a cargas axiales de compresión

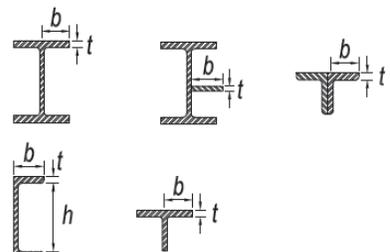
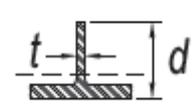
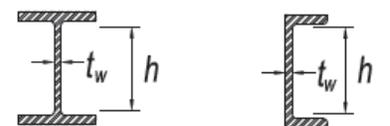
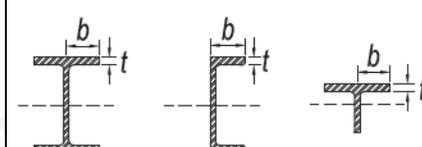
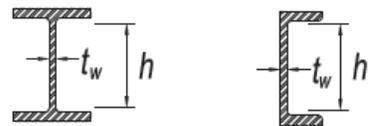
| Relación ancho/espesor: Elementos en compresión sometidos a carga axial de compresión | | | | | |
|---|-------------|---|---|-----------------------------|---|
| Caso | Descripción | Ratio ancho-espesor | Ratio límite ancho-espesor λ_r (no esbelto/esbelto) | Ejemplos | |
| Elementos no rigidizados | 1 | Alas de perfiles I rolados, placas proyectadas de perfiles I, alas de perfiles T o 2 perfiles L continuamente unidos, alas de perfiles tipo C | b/t | $0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ |  |
| | 4 | Almas de perfiles T | d/t | $0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ |  |
| Elementos rigidizados | 5 | Almas de vigas I doblemente simétricas, Almas de perfiles tipo C | h/t_w | $1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ |  |

Tabla B.4. Relación Ancho/espesor para elementos sometidos a cargas axiales de flexión

| Relación ancho/espesor: Elementos en compresión sometidos a cargas de flexión | | | | | | |
|---|------|--|---------------------|---|--|---|
| | Caso | Descripción | Ratio ancho-espesor | Ratio límite ancho-espesor | | Ejemplos |
| | | | | λ_p (compacto/ no compacto) | λ_r (no compacto/ esbelto) | |
| Elementos no rigidizados | 10 | Alas de perfiles I rolados, perfiles C y perfiles T | b/t | $0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | $1 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ |  |
| | 14 | Almas de perfiles T | d/t | $0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | $1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ |  |
| Elementos rigidizados | 15 | Almas de vigas I doblemente simétricas, Almas de perfiles tipo C | h/t _w | $3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | $5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ |  |

En base a estos resultados se presentan en la tabla B.5 las características de los perfiles evaluados:

Tabla B.5. Propiedades de los perfiles

| PERFIL | Ratio b/t | Ratio h/t _w (d/t) | Compresión | | Flexión | | | | Compresión | | Flexión | |
|---------|--------------|------------------------------------|--|--|---|--|--|--|------------|------|---------|------|
| | | | Valor límite ala (λ _r) | Valor límite alma (λ _r) | Ala | | Alma | | ala | alma | ala | alma |
| | | | | | Valor límite ala (λ _p) | Valor límite ala (λ _r) | Valor límite alma (λ _p) | Valor límite alma (λ _r) | | | | |
| W30x191 | 6.32 | 41.10 | 13.48 | 35.87 | 9.15 | 24.08 | 90.53 | 137.2 | NE | E | C | C |
| W10x22 | 7.66 | 37.50 | 13.48 | 35.87 | 9.15 | 24.08 | 90.53 | 137.2 | NE | E | C | C |
| W8x10 | 10.67 | 40.02 | 13.48 | 35.87 | 9.15 | 24.08 | 90.53 | 137.2 | NE | E | NC | C |
| W30x132 | 5.25 | 45.19 | 13.48 | 35.87 | 9.15 | 24.08 | 90.53 | 137.2 | NE | E | C | C |
| W12x87 | 7.46 | 21.75 | 13.48 | 35.87 | 9.15 | 24.08 | 90.53 | 137.2 | NE | NE | C | C |
| WT4x9 | 8.40 | 15.00 | 13.48 | 18.06 | 9.15 | 24.08 | 20.22 | 24.80 | NE | NE | C | C |
| W30x148 | 4.42 | 47.09 | 13.48 | 35.87 | 9.15 | 24.08 | 90.53 | 137.2 | NE | E | C | C |

- E: Esbelto
 - NE: No esbelto
 - C: compacto
 - NC: No compacto

Una vez definidas las propiedades de los perfiles se procede a determinar los estados límite para cada perfil.

B.2. Estados límite de elementos sometidos a flexión

El momento flector de diseño, $\Phi_b M_n$, se determina de la siguiente manera:

$$\Phi_b = 0.9$$

Este será el factor de resistencia empleado para elementos sometidos a flexión; significa que este perfil no podrá soportar un momento mayor al 90% de su valor nominal M_n soportar un momento mayor al 90% de su valor nominal M_n .

El factor de modificación C_b para elementos sometidos a pandeo lateral-torsional se determina de la siguiente manera:

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \tag{Ec. B.1}$$

Dónde:

M_{max} es el máximo momento flector del diagrama

M_A, M_B, M_C son los momentos al 25%, 50% y 75% de la longitud

Para casos de curvatura simple que son los que se aplican a este trabajo, este valor estará entre será mayor que 1, para un análisis más conservativo se tomará este valor como 1.

$$C_b = 1$$

B.2.1. Perfiles doblemente simétricos con alas y alma compactos con flexión en su eje mayor

El estado límite para estos perfiles será el menor entre fluencia y pandeo lateral-torsional.

- **Fluencia**

$$M_n = M_p = F_y Z_x \quad (\text{Ec. B.2})$$

Dónde:

- M_p es el momento plástico del perfil.
- F_y es el esfuerzo de fluencia del material.
- Z_x es el módulo plástico de la sección respecto a su eje mayor.

En este caso no se trabajará en el rango plástico, solamente en el rango elástico. Por tal motivo se trabajará con el módulo elástico de la sección S_x . Así:

$$M_n = F_y S_x \quad (\text{Ec. B.3})$$

- **Pandeo lateral-torsional**

Primero se determina las longitudes efectivas límite L_p y L_r :

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (\text{Ec. B.4})$$

$$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 F_y}{E}\right)^2}} \quad (\text{Ec. B.5})$$

$$r_{ts}^2 = \frac{I_y h_o}{2 S_x} \quad (\text{Ec. B.6})$$

Dónde:

- $c=1$ para vigas doblemente simétricas
- r_y es el radio de giro respecto al eje menor (mm)
- J es el módulo de torsión de la sección (mm⁴)
- h_o es la distancia entre centroides de las alas (mm)
- I_y respecto al eje menor (mm⁴)

La longitud libre de giro entre puntos donde el perfil está restringido de girar es L_b . La resistencia nominal a flexión se evaluará con uno de los 3 casos siguientes:

- Si $L_b \leq L_p$, el estado límite de pandeo lateral-torsional no aplica.
- Si $L_p < L_b \leq L_r$:

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (\text{Ec. B.7})$$

- Si $L_b > L_r$:

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (\text{Ec. B.8})$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J_c}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \quad (\text{Ec. B.9})$$

B.2.2. Estado límite para elementos doblemente simétricos sometidos a flexión con alma compacta y alas no compactas o esbeltas

La resistencia nominal a flexión del perfil a evaluar será el menor de los siguientes estados.

- **Pandeo lateral-torsional**

La resistencia a flexión nominal (M_n) por el estado límite de pandeo lateral-torsional se evaluará de acuerdo a la sección B.2.1.

- **Pandeo local del ala a compresión**

Para secciones con alas no compactas (NC):

$$M_n = M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad (\text{Ec. B.10})$$

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (\text{Ec. B.11})$$

Dónde:

- b_f es el ancho del ala
- t_f es el espesor del ala
- $\lambda_{pf} = \lambda_p$, es la esbeltez límite para un ala compacta, ver tabla B.5
- $\lambda_{rf} = \lambda_r$, es la esbeltez límite para un ala no compacta, ver tabla B.5

B.2.3. Resultados de resistencia nominal a flexión para los perfiles de la plataforma

En base a los estados límites evaluados anteriormente, se muestra en la tabla B.6 los valores de resistencia nominal de los elementos sometidos a flexión.

Tabla B.6. Resultados, resistencia a flexión admisible

| Perfil | | W30x191 | W30x132 | W12x87 | W10x22 | W8x10 | W30x148 |
|---|-----------------|----------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|
| Ala / Alma | | C / C | C / C | C / C | C / C | NC / C | C / C |
| Verificaciones | | Y, LTB | Y, LTB | Y, LTB | Y, LTB | Y, LTB | Y, LTB |
| Factor ϕ | | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Puntos de restricción considerados | | Apoyos extremos plataforma | Apoyo vigas W30 | Vigas soporte W30 | Vigas principales W30 | Vigas transversales W10 | Apoyos extremos plataforma |
| C_b | | 1.14 | 1.14 | 1.52 | 1.32 | 1.14 | 1.14 |
| Propiedades de sección y material | | | | | | | |
| Módulo elástico S_x | mm ³ | 9.83E+06 | 6.23E+06 | 1.93E+06 | 3.80E+05 | 1.27E+05 | 7.14E+06 |
| Módulo plástico Z_x | mm ³ | 1.11E+07 | 7.16E+06 | 2.16E+06 | 4.27E+05 | 1.45E+05 | 8.19E+06 |
| Módulo elástico S_y | mm ³ | 1.47E+06 | 6.10E+05 | 6.51E+05 | 6.51E+04 | 1.74E+04 | 7.10E+05 |
| Módulo plástico Z_y | mm ³ | 2.26E+06 | 9.57E+05 | 9.90E+05 | 1.00E+05 | 2.71E+04 | 1.11E+06 |
| I_x | mm ⁴ | 3.75E+09 | 2.36E+09 | 3.03E+08 | 4.98E+07 | 1.20E+07 | 2.78E+09 |
| I_y | mm ⁴ | 2.78E+08 | 8.05E+07 | 1.01E+08 | 4.95E+06 | 8.34E+05 | 9.44E+07 |
| J | mm ⁴ | 8.17E+06 | 3.86E+06 | 1.98E+06 | 1.05E+05 | 1.45E+04 | 6.05E+06 |
| Esfuerzo de fluencia | MPa | 345 | 345 | 345 | 345 | 345 | 345 |
| Módulo de elasticidad | MPa | 200000 | 200000 | 200000 | 200000 | 200000 | 200000 |
| h_o | mm | 747.71 | 742.95 | 296.86 | 247.64 | 195.26 | 747.71 |
| b_f | mm | | | | | 101.6 | |
| t_f | mm | | | | | 4.76 | |
| VERIFICACIÓN FLUENCIA | | | | | | | |
| Momento máximo fluencia elástica | kN.m | 3390 | 2150 | 667 | 131 | 43.8 | 2460 |
| Momento máximo fluencia plástica | kN.m | 3820 | 2470 | 746 | 147 | 50 | 2830 |
| VERIFICACIÓN PANDEO LATERAL TORSIONAL | | | | | | | |
| L_b | mm | 15119 | 5180 | 1930 | 3050 | 1770 | 15119 |
| r_y | mm | 8.79E+01 | 5.72E+01 | 7.80E+01 | 3.38E+01 | 2.14E+01 | 5.79E+01 |
| L_p | mm | 3.72E+03 | 2.42E+03 | 3.31E+03 | 1.43E+03 | 9.07E+02 | 2.45E+03 |
| c | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| r_{ts} | mm | 102.873347 | 69.318212 | 87.8375978 | 40.1745404 | 25.3165839 | 70.3053683 |
| L_r | mm | 267878.049 | 180501.819 | 228725.689 | 104612.884 | 65923.356 | 183072.347 |
| Mn | kN.m | 4260 | 2790 | $L_b < L_p$ | 193 | 56.6 | 3120 |
| VERIFICACIÓN PANDEO LOCAL ALA A COMPRESIÓN | | | | | | | |
| λ | | | | | | 1.07E+01 | |
| λ_{pf} | | | | | | 9.15E+00 | |
| λ_{rf} | | | | | | 2.41E+01 | |
| Mn | kN.m | | | | | 48.1 | |
| Resistencia nominal Mn | kN.m | 3390 | 2150 | 667 | 131 | 43.8 | 2460 |
| Resistencia de diseño a flexión $\phi_r M_n$ | kN.m | 3050 | 1930 | 601 | 118 | 39.4 | 2220 |

B.3. Estado límite de elementos sometidos a corte

La resistencia al corte de diseño será:

$$V_d = \Phi_v V_n \quad (\text{Ec. B.12})$$

Donde el factor de resistencia al corte Φ_v será:

$$\Phi_v = 0.9$$

B.3.1. Resistencia al corte del alma

La resistencia nominal al corte de los perfiles sometidos a corte en el alma, para los estados límite de fluencia y pandeo por corte es la siguiente:

$$V_n = 0.6F_y A_w C_v \quad (\text{Ec. B.13})$$

Dónde:

- C_v es el coeficiente de corte
- $A_w = t_w \cdot h_w$ es el área del alma
- t_w es el espesor del alma
- h_w es el peralte del alma

Para perfiles rolados en I donde: $\frac{h_w}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$C_v = 1$$

B.3.2. Resistencia nominal al corte de los perfiles evaluados

La tabla B.7 muestra la resistencia nominal al corte de los perfiles evaluados.

Tabla B.7. Resistencia nominal al corte de perfiles evaluados

| Perfil | | W30x191 | W30x132 | W12x87 | W10x22 | W8x10 | W30x148 |
|--------------------------------------|-----------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|
| Características de la sección | | | | | | | |
| Altura alma h | mm | 717.55 | 717.55 | 276.22 | 244.47 | 190.5 | 717.55 |
| Espesor alma t_w | mm | 17.46 | 15.88 | 12.7 | 6.35 | 4.76 | 15.88 |
| Ancho del ala b_f | mm | 381 | 266.7 | 307.97 | 146.05 | 101.6 | 266.7 |
| Espesor del ala t_f | mm | 30.16 | 25.4 | 20.64 | 9.53 | 4.76 | 30.16 |
| b | mm | 190.5 | 133.35 | 153.985 | 73.025 | 50.8 | 133.35 |
| F_y | MPa | 345 | 345 | 345 | 345 | 345 | 345 |
| h/t_w | | 41.10 | 45.19 | 21.75 | 38.50 | 40.02 | 45.19 |
| $2.24(E/F_y)^{1/2}$ | | 53.93 | 53.93 | 53.93 | 53.93 | 53.93 | 53.93 |
| Corte en el alma | | | | | | | |
| A_w | mm ² | 12528 | 11395 | 3508 | 1552 | 907 | 11395 |
| C_v | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| V_n | kN | 2593 | 2359 | 726 | 321 | 188 | 2359 |
| Φ_v | | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| $\Phi_v V_n$ | kN | 2334 | 2122 | 654 | 289 | 169 | 2123 |

B.4. Estado límite de elementos bajo esfuerzos combinados

El factor de resistencia para elementos sometidos a esfuerzos combinados es:

$$\phi_T = 0.9$$

La resistencia nominal para elementos sometidos a esfuerzos combinados será la menor entre los estados límite de fluencia normal y al corte.

Para el estado límite de fluencia bajo esfuerzos normales

$$F_n = F_y \quad (\text{Ec. B.14})$$

Para el estado límite de fluencia bajo esfuerzos cortantes

$$F_n = 0.6F_y \quad (\text{Ec. B.15})$$

Todos los perfiles evaluados son del mismo material y por lo tanto su resistencia nominal será:

Tabla B.8. Resistencia nominal de elementos bajo cargas combinadas

| | | |
|--|------------|------------|
| Factor de resistencia ϕ_T | 0.9 | |
| Material | ASTM A992 | |
| F_y | 345 | MPa |
| F_n esfuerzos normales | 345 | MPa |
| F_n bajo corte | 207 | MPa |

B.5. Estado límite de uniones atornilladas

En las uniones atornilladas se deberán verificar estados límite de falla para los tornillos y los elementos que forman parte de la unión. Estas uniones se consideran a corte y como se muestra en las formas constructivas no transmiten momentos.

B.5.1. Materiales

Para la construcción de uniones atornilladas se emplearon pernos de acero ASTM A325M, el material de las placas de apoyo será de acero ASTM A36M. La tabla B.9 muestra las propiedades de los materiales.

Tabla B.9 Propiedades de los materiales de la unión atornillada

| | | |
|---|------------|-----|
| Tornillos | | |
| Material | ASTM A325M | |
| Resistencia a tracción F_{nt} | 620 | MPa |
| Resistencia a corte fuera de la rosca F_{nv} | 457 | MPa |
| Resistencia a corte dentro de la rosca F_{nv} | 372 | MPa |
| Diámetro de pernos a emplear D | 20 | mm |
| Placas de apoyo | | |
| Material | ASTM A36M | |
| Esfuerzo máximo F_u | 400 | MPa |

B.5.2. Resistencia al corte de pernos

La resistencia de diseño al corte de una unión estructural atornillada será:

$$R_d = \Phi R_n; \quad \Phi = 0.75 \quad (\text{Ec. B.16})$$

La resistencia nominal R_n será:

$$R_n = F_{nv} A_b \quad (\text{Ec. B.17})$$

Donde A_b será el área de la sección del tornillo sometida a corte.

B.5.3. Resistencia de los elementos de apoyo de la unión atornillada

Para agujeros estándar:

$$R_n = 1.5l_c t F_u \leq 3.0dt F_u \quad (\text{Ec. B.18})$$

Para agujeros alargados:

$$R_n = 1.0l_c t F_u \leq 2.0dt F_u \quad (\text{Ec. B.19})$$

Donde:

- l_c es la distancia libre entre el borde del agujero y el borde del material a evaluar
- d es el diámetro nominal del perno
- t es el espesor del material a evaluar

B.5.4. Resistencia nominal de uniones atornilladas evaluadas

La tabla B.10 muestra la resistencia nominal de las uniones atornilladas evaluadas.

Tabla B.10 Resistencia nominal de las 3 uniones atornilladas evaluadas.

| Unión | | W8-W10 | W10-W30 | W30-W30 |
|---|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| Diámetro de pernos (d) | mm | 20 | 20 | 20 |
| Rosca en plano de corte | | Si | Si | Si |
| Esfuerzo nominal a corte F_{nv} | MPa | 372 | 372 | 372 |
| Número de pernos por unión (n) | | 2 | 2 | 5 |
| Resistencia de perno | | | | |
| Diámetro agujero | mm | 22 | 22 | 22 |
| Largo Slot | mm | 50 | 50 | 50 |
| Espesor alma perfil (t_w) | mm | 4.76 | 6.35 | 15.88 |
| Área perno | mm ² | 314.16 | 314.16 | 314.16 |
| Resistencia nominal a corte (Rn) | kN | 116.87 | 116.87 | 116.87 |
| Resistencia de apoyo en viga | | | | |
| Distancia entre borde y orificio (l_c) | mm | 40 | 40 | 40 |
| Esfuerzo máximo F_u | MPa | 450 | 450 | 450 |
| Resistencia nominal Rn extremo agujero | kN | 128.52 | 171.45 | 428.76 |
| Resistencia de Placas de apoyo | | | | |
| Placas empleadas | | 2 | 2 | 2 |
| Espesor placa | mm | 9 | 9 | 9 |
| Distancia entre borde y orificio (l_c) | mm | 40 | 40 | 40 |
| Esfuerzo máximo F_u | MPa | 400 | 400 | 400 |
| Resistencia nominal agujero (Rn) | kN | 432 | 432 | 432 |
| Resistencia nominal slot (Rn) | kN | 288 | 288 | 288 |
| Rn = Rn.min x n | kN | 233.73 | 233.73 | 584.34 |

ANEXO C: Especificaciones técnicas del agitador



| Slurry Agitators Schedule of Technical Information | | |
|---|---------------------------|------------------------|
| 5800-TI-0007 | | |
| Inmaculada Project | | |
| PAGE 1 of 3 | | 1519236020-DS |
| Equipment No | 10-04-AG-001 through 007 | |
| Equipment Description | Leach Tank Agitators | |
| Manufacturer | SPX-LIGHTNIN | |
| Model No. / Designation | 783Q150 | |
| Impeller: | | |
| Type: | Axial | |
| Model (Top & Bottom): | A510 | |
| Number per Agitator | 2 | |
| Number Blades/Impeller | 3 | |
| Diameter of Impeller | 4826 | mm |
| D/T Ratio | 0.3 | |
| Force Number (per impeller) | N/A | |
| Pumping Flow Number (per impeller) | N/A | |
| Power Number (per impeller) | N/A | |
| Tip Speed | 300 | m/min |
| Rubber Lining Type/Hardness | 40 +/- 5 Durometer | |
| Wear Liner Type/Thickness - Blade | 6mm | |
| Wear Liner Type/Thickness - Blade Tip | 12mm | |
| Thickness - Shaft | 6mm | |
| Thickness - Hub | 6mm | |
| Impeller connection -provide details | Welded Hub / Bolted Blade | |
| Shaft Outside Diameter | 324 | mm |
| Shaft Inside Diameter | 302 | mm |
| Shaft Material: | Carbon Steel | |
| Stabiliser Fins Fitted | Yes | |
| Clearance from Bottom of Tank | 4826 | mm |
| Top impeller pumping direction | Down | |
| Bottom impeller pumping direction | Down | |
| Distance off bottom of bottom impeller | 4826 | mm |
| Distance off bottom of top impeller | 10,541 | mm |
| Agitator Shaft Coupling | | |
| Type: | Rigid-Rigid Coupling | |
| Size: | 597 | mm |
| Schedule: | N/A | |
| Mechanical Operating Parameters | | |
| Installed Power | 112 | KW |
| Demand Power | 88 | KW (Normal operating) |
| Shaft Speed | 20 | RPM (Normal operating) |
| | N/A | RPM (Maximun) |
| | N/A | RPM (Minimun) |
| | 30.7 | RPM (Critical) |
| Normal Shaft Speed as a % of critical | 66 | % |
| Motor | | |
| Manufacturer | ABB | |
| Model | Custom | |
| Type/ Frame | 449T | |
| No. Poles | 6 | |
| Speed | 1200 | RPM |
| Enclosure IP Rating | 56 | |
| Drive Belts | | |
| Type | N/A | |
| No. off | N/A | |
| Pulleys | | |
| Drive Size | N/A | |
| Driven Size | N/A | |

| Slurry Agitators Schedule of Technical Information | | |
|--|---------------------|---------|
| 5800-TI-0007 | | |
| Inmaculada Project | | |
| PAGE 2 of 3 | | |
| Taperlock | | |
| Drive Size | N/A | mm |
| Driven Size | N/A | mm |
| Gearbox | | |
| Type | 783 Size | |
| Manufacturer | SPX-LIGHTNIN | |
| Ratio | 58.88 | |
| Rated Power | 180 | KW |
| Design Power | 112 | KW |
| Rated Torque | 53,405 | Nm |
| Design Torque | 53,405 | Nm |
| AGMA life at rated conditions – Input Gear | > 100,000 | Hrs B10 |
| AGMA life at rated conditions – Intermediate Gear | > 100,000 | Hrs B10 |
| AGMA life at rated conditions – Output Gear | > 100,000 | Hrs B10 |
| Limiting components(s) | | |
| Thermal Rating | > MHP | KW |
| Total Mass Empty | 6,879 | Kg |
| Dry Well on Output Shaft | Yes | |
| Gear Lubrication Details – Oil Type | Mineral Oil | |
| – Quantity | Per IOM | |
| Bearing Lubrication Method | Grease or Oil | |
| External Lube Cooling Unit Fitted | No | |
| Type of Cooling Unit | N/A | |
| Cooling Unit Installed Power | N/A | KW |
| Supplier's Recommendations | | |
| Number of Baffles | 3 | |
| Orientation of Baffles | 120 | deg |
| Baffle Width | 1,321 | mm |
| Baffle Length/Distance Off Wall | 16,789 / 445 | mm |
| Limit Ring | No | |
| Weights | | |
| Shaft (inc Impellers) | 6905 | Kg |
| Gearbox (without oil) | 6,879 | Kg |
| Gearbox (with oil) | | Kg |
| Installed Weight (Total assembly) | 13,784 (no oil) | Kg |
| Freight Weight | | Kg |
| Design Loads | | |
| Vertical Load | 217,963 | N |
| Bending Moment | 204,390 | Nm |
| Torque | 84,400 | Nm |
| Limit ring – If required, the supplier to advise the of the loads the ring would need to withstand | N/A | |
| Surface Treatment: | | |
| Surface preparation | Enamel Paint | |
| Prime coat type/dry film thickness | 500 | µm |
| Top coat type/dry film thickness | 3,000 | µm |
| Colour | LIGHTNIN Green | |
| Method/Material to coat blade bolts | Patch kit | |
| Rubber Lining Grade/Thickness | 40 +/- 5 Duro / 6mm | |
| Shaft | 6mm | |
| Blades | 6mm | |
| Blade Tips | 12mm | |
| Rubber Fixing Method | Vulcanization | |
| Degree of Shop Assembly - Provide Details | | |

| | |
|--|---|
| | Slurry Agitators Schedule of Technical Information |
| | 5800-TI-0007 |
| | Inmaculada Project |
| | PAGE 3 of 3 |
| Degree of Sop Assembly – Provide Details | |
| If channel bases supplied then motor and gearboxes will be aligned and mounted on base Shafts and blades will be checked for fit against templates but due to size will not be assembled | |
| | |
| Degree of Shop Testing - Provide Details | |
| Items will be checked for fit against templates and drawings | |
| | |
| Degree of Assembly for Delivery - Provide Details | |
| As per shop assembly | |

**FALK[®] FLUID COUPLING
RECOMMENDED FLUIDS**

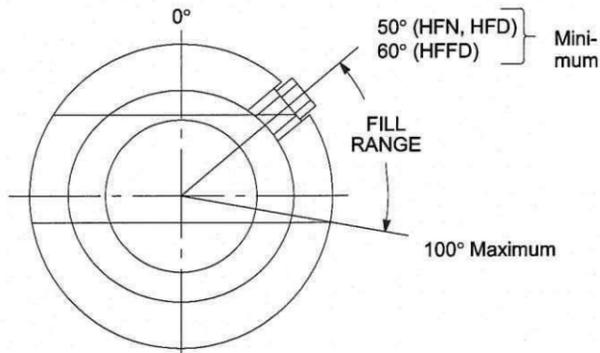
1.1 RECOMMENDED FLUIDS

Required Fluid Properties

- ISO Viscosity Grade 46
- Viscosity at 104° F (40° C) 46 cSt
215 SSU
- Viscosity Index equal to or greater than 105
- Pour Point must be 5° F lower than minimum starting temperature
- Flash Temperature 400° F (204° C)
- Specific Gravity 0.87
- Antioxidant & Anti-Foaming Additives

| Manufacturer | Fluid |
|--|----------------------------|
| For Ambient Temperatures Greater Than +20° F (-7° C) | |
| Amoco Oil Co. | American Industrial Oil 46 |
| Exxon Co. USA | Teresstic 46 |
| Gulf Oil Corp. | Harmony 46 |
| Mobil Oil Corp. | DTE Medium |
| Shell Oil Corp. | Tellus 46 |
| Texaco Inc. | Rando 46 |
| Texaco Inc. | Regal R & O 46 |
| Union Oil Co. of Calif. | Unax VG 46 |
| For Ambient Temperatures Greater Than -20° F (-29° C) | |
| Amoco Oil Co. | American Industrial Oil 46 |
| Mobil Oil Corp. | Mobilfluid 423 |
| Texaco Inc. | Rando 46 |
| Union Oil Co. of Calif. | Unax VG 46 |
| For Ambient Temperatures Greater Than -50° F (-46° C) | |
| Mobil Oil Co. | SHC 624 |

1.2 FLUID FILL – The quantity of fluid can be approximated from the table below. The amount of fluid required is established by the fill angle during installation.



| Coupling Type | 185 | 235 | 270 | 320 | 370 | 420 | 480 | 584 | 660 | 760 |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|------|
| Fluid Fill (Fluid Ounces) | 24-33 | 50-65 | 78-88 | 113-142 | 207-239 | 283-340 | 484-507 | 725-897 | 1369-1504 | 1792 |

LIGHTNIN

| |
|----------------------------|
| FLUID COUPLING DATA |
|----------------------------|

ORDER NO.: 1519236 Line 20

Manufacturer: Falk

Model Designation: 1584HFN20

Motor Speed: 1200

Motor H.P.: 150

Operating Slip: 2.3

Fill Number: N/A

Fill Angle: 66

Refer to IT-3759 for filling fluid type.

For complete installation, operation and maintenance instructions, refer to the fluid coupling instructions in the **LIGHTNIN**® Instruction Manual.

REVISION DATE: 10/17/2012
REVISED

LIGHTNIN®
MIXERS AND AERATORS

© LIGHTNIN INST. NO.: 1519236020-FC

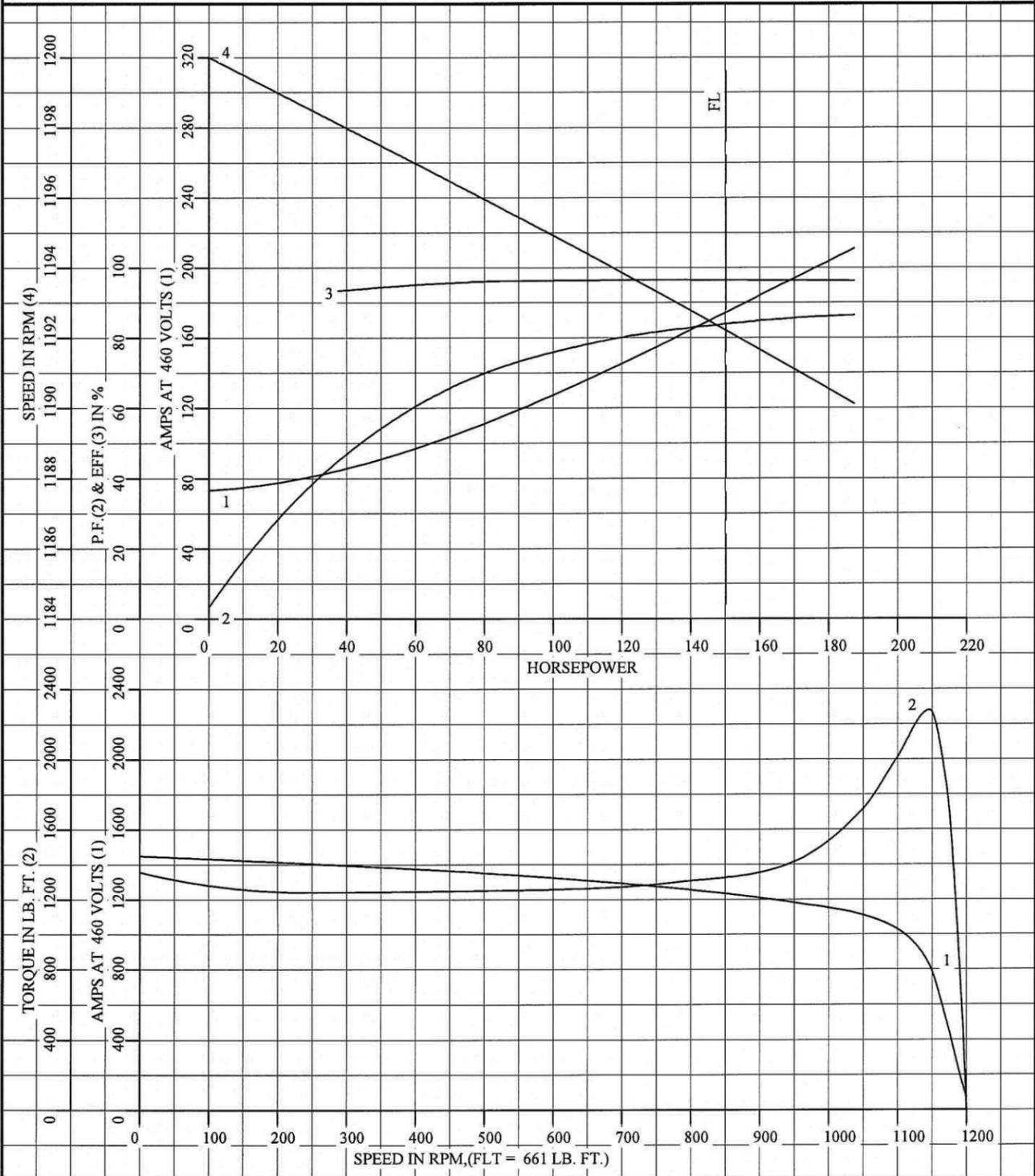
1979

PAGE 1 OF 1

1519236020-MD

| | | | | | | |
|--|--------------|--|-----------------------|--|-----------------|-------|
| REL. S.O. | FRAME | HP | TYPE | PHASE/ HERTZ | RPM | VOLTS |
| | 449T | 150 | P | 3/60 | 1190 | 460 |
| AMPS | DUTY | AMB °C/ INSUL. | S.F. | NEMA DESIGN | CODE LETTER | ENCL. |
| 174 | CONT | 40/F | 1.15 | A | J | FCXE |
| E/S | ROTOR | TEST S.O. | TEST DATE | STATOR RES.@25 °C OHMS (BETWEEN LINES) | | |
| 401688 | 418143-83-RE | --- | --- | .0215 | | |
| PERFORMANCE | | | | | | |
| LOAD | HP | AMPERES | RPM | % POWER FACTOR | % EFFICIENCY | |
| NO LOAD | 0 | 73.4 | 1200 | 3.18 | 0 | |
| 1/4 | 37.5 | 83.8 | 1198 | 44.9 | 93.3 | |
| 2/4 | 75.1 | 108 | 1196 | 68.0 | 95.9 | |
| 3/4 | 112 | 139 | 1194 | 78.7 | 96.4 | |
| 4/4 | 150 | 174 | 1192 | 83.9 | 96.4 | |
| 5/4 | 187 | 211 | 1190 | 86.4 | 96.2 | |
| SPEED TORQUE | | | | | | |
| | | RPM | TORQUE % FULL LOAD | TORQUE LB.-FT. | AMPERES | |
| LOCKED ROTOR | | 0 | 205 | 1357 | 1450 | |
| PULL UP | | 240 | 188 | 1242 | 1407 | |
| BREAKDOWN | | 1147 | 345 | 2280 | 819 | |
| FULL LOAD | | 1192 | 100 | 661 | 174 | |
| <p>AMPERES SHOWN FOR 460. VOLT CONNECTION. IF OTHER VOLTAGE CONNECTIONS ARE AVAILABLE, THE AMPERES WILL VARY INVERSELY WITH THE RATED VOLTAGE</p> <p>REMARKS: TYPICAL DATA</p> | | | | | | |
|  <p>A MEMBER OF THE ABB GROUP</p> | | DR. BY <u>P.B. GREENE</u> CK. BY <u>K.W. KANOUFF</u> APP. BY <u>K.W. KANOUFF</u> DATE <u>06/08/00</u> | | A-C MOTOR PERFORMANCE E08396-F-Z001 DATA ISSUE DATE 06/08/00 | | |

| | | | |
|------------------|-------------------|----------------|---------------------------|
| REL S.O. | RPM 1190 | S.F. 1.15 | ROTOR 418143-83-RE |
| FRAME 449T | VOLTS 460 | NEMA DESIGN A | TEST S.O. TYPICAL DATA |
| HP 150 | AMPS 174 | CODE LETTER J | TEST DATE --- |
| TYPE P | DUTY CONT | ENCLOSURE FCXE | STATOR RES. @ 25 °C .0215 |
| PHASE/HERTZ 3/60 | AMB °C/INSUL 40/F | E/S 401688 | OHMS (BETWEEN LINES) |



AMPERES SHOWN FOR 460 VOLT CONNECTION, IF OTHER VOLTAGE CONNECTIONS ARE AVAILABLE, THE AMPERES WILL VARY INVERSELY WITH THE RATED VOLTAGE.



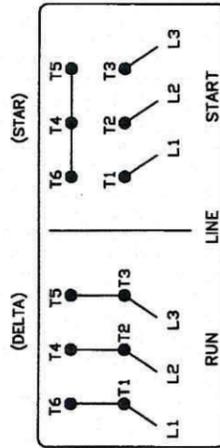
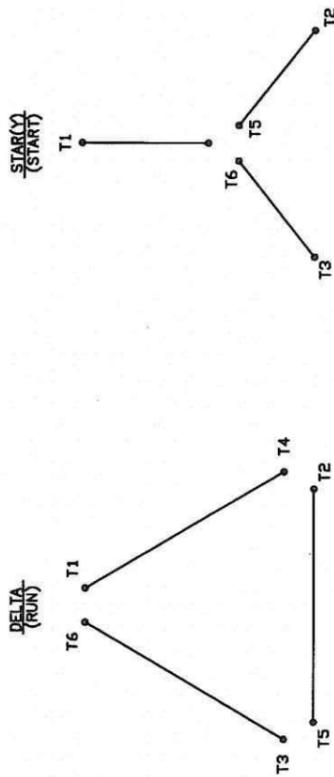
DR. BY P.B. GREENE
 CK. BY K.W. KANOUFF
 APP. BY K.W. KANOUFF
 DATE 06/08/00

A-C MOTOR PERFORMANCE CURVES
 E08396-F-Z001
 ISSUE DATE 06/08/00

416820-008

**A-C MOTOR
CONNECTION DIAGRAM**

STANDARD 6 LEAD Y START - DELTA RUN



(N. P. 1767-DC)

416820-008

| | |
|------------------------------------|--|
| REV. DESC: CORRECT VIEW ON DRAWING | BALDOR |
| REV. LTR: C | CONNECT DIAGRAM STD 6 LEAD Y START DELTA RUN |
| FILE: \RAG\00001\808 | SH 1 of 1 |
| MTL: - | BY: RAGRA |
| TDR: 00000579787 | |
| VERSION: 03 | |
| REVISED: 01:18:33 03/29/2011 | |

L449T

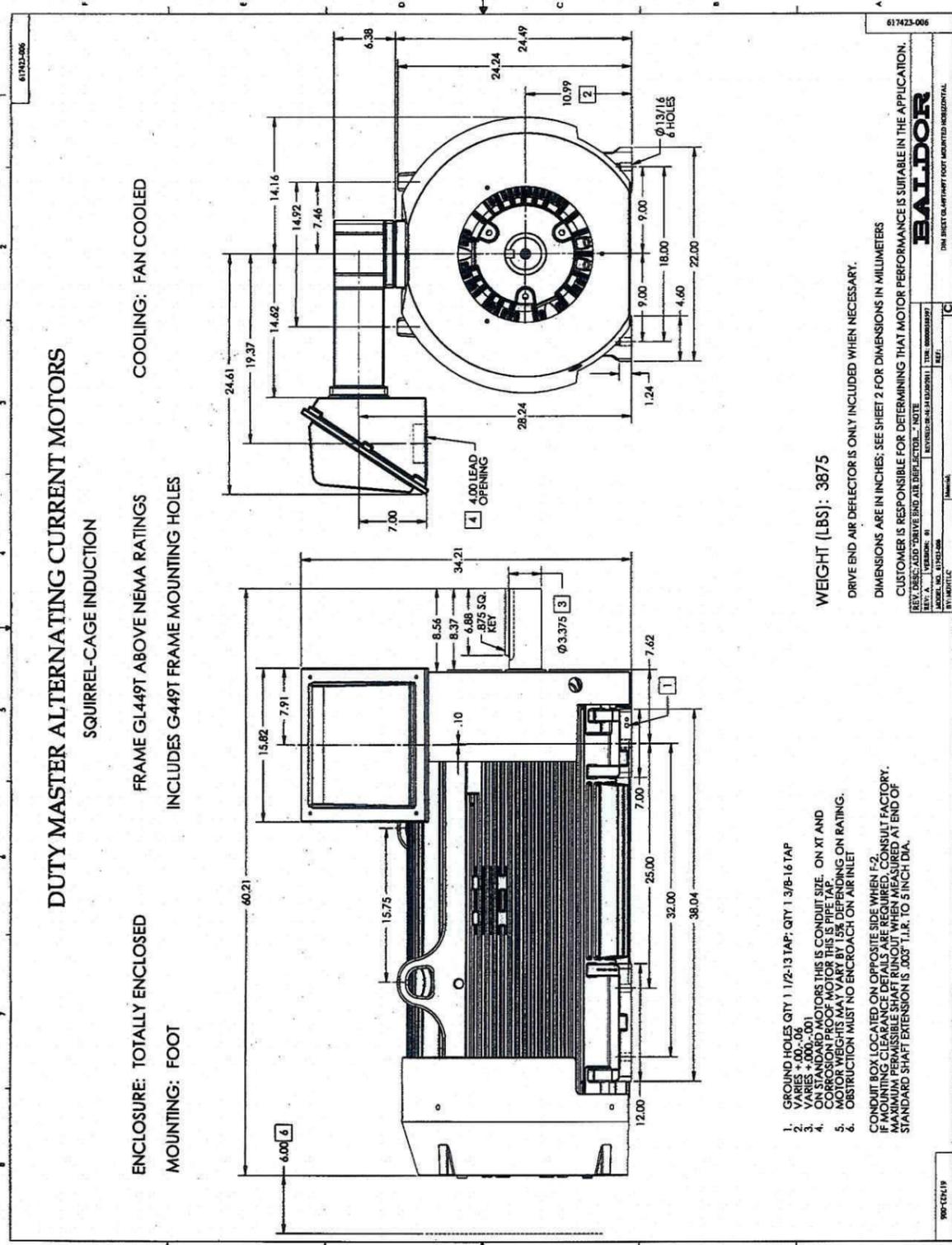
BALDOR • RELIANCE

DUTY MASTER ALTERNATING CURRENT MOTORS
SQUIRREL-CAGE INDUCTION

ENCLOSURE: TOTALLY ENCLOSED
MOUNTING: FOOT

FRAME G1449T ABOVE NEMA RATINGS
INCLUDES G449T FRAME MOUNTING HOLES

COOLING: FAN COOLED



1. GROUND HOLES QTY 1 1/2: 13 TAP; QTY 1 3/8: 16 TAP
2. VARIES +.00 - .04
3. ON STANDARD MOTORS THIS IS CONDUIT SIZE. ON XT AND CORROSION PROOF MOTOR THIS IS PIPE TAP.
4. CONDUIT MUST BE INSTALLED WITH PROPER CLEARANCE ON RATING.
5. OBSTRUCTION MUST NOT ENCRUST ON AIR INLET
6. CONDUIT BOX LOCATED ON OPPOSITE SIDE WHEN F-2. IF MOUNTING CLEARANCE DETAILS ARE REQUIRED, CONSULT FACTORY. MAXIMUM PERMISSIBLE SHAFT RUNOUT WHEN MEASURED AT END OF STANDARD SHAFT EXTENSION IS .005" I.R. TO 5 INCH DIA.

WEIGHT (LBS): 3875

DRIVE END AIR DEFLECTOR IS ONLY INCLUDED WHEN NECESSARY.

DIMENSIONS ARE IN INCHES; SEE SHEET 2 FOR DIMENSIONS IN MILLIMETERS

CUSTOMER IS RESPONSIBLE FOR DETERMINING THAT MOTOR PERFORMANCE IS SUITABLE IN THE APPLICATION.

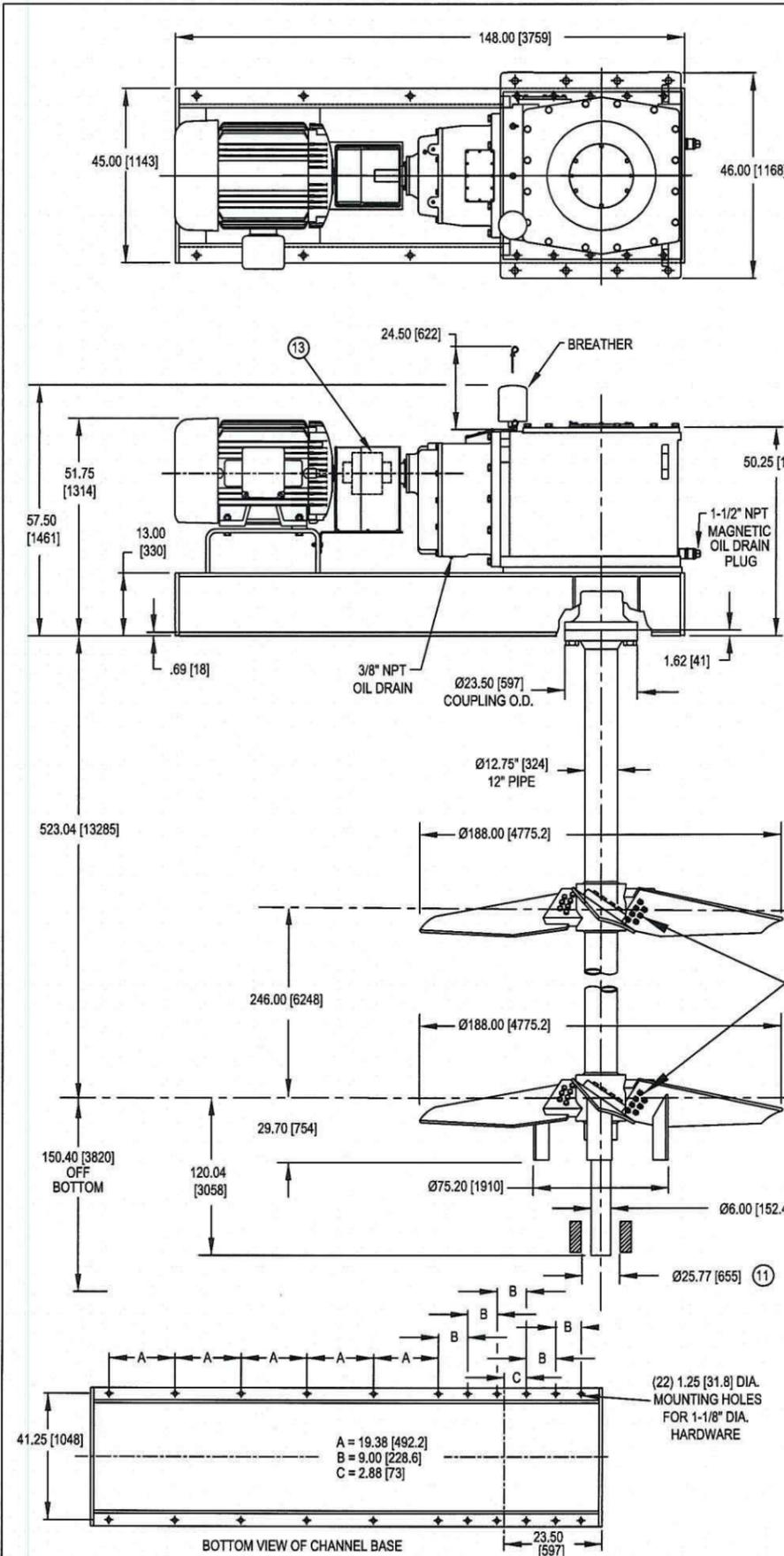
REV. DATE: ADD DRIVE END AIR DEFLECTOR - NOTE
REV. A 1/28/80 IN 617423-006 (REVISED 06-24-80) (REV. 0000000000)
BY: MDT/CLC
DATE: 1/28/80

BALDOR

DIMENSIONS ARE IN INCHES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

BALDOR
A MEMBER OF THE ABB GROUP

DATE: 12/06/2005



NOTES:

- ① MATERIAL OF IN-TANK MIXER PARTS IS CARBON STEEL WITH NATURAL RUBBER COVERING. A FIELD PATCH KIT IS INCLUDED FOR THE BLADE / HUB HARDWARE. REFER TO INSTALLATION INSTRUCTIONS 1519236-RC1 & RC1 2. THE FIELD PATCH KIT MUST BE INSTALLED OVER THE IMPELLER HARDWARE. FAILURE TO INSTALL THE FIELD PATCH KIT MAY VOID MIXER WARRANTY.
- ② ALL DIMENSIONS ARE IN INCHES [mm]. DIMENSIONS ARE FOR REFERENCE ONLY.
- ③ MOTOR DATA:
H.P.: 150 R.P.M.: 1200 DUTY: SEVERE
VOLTS: 460 PHASE: 3 HZ: 60
ENCLOSURE: TEFC FRAME: 449T
- ④ IMPELLER DATA:
TYPE: A510E/A510E QUANTITY OF BLADES: 3/3
R.P.M.: 20
IMPELLERS ARE NOT ADJUSTABLE FROM POSITION SHOWN. THE IMPELLER BLADES ARE BOLTED AND ARE REMOVABLE.
- ⑤ TOTAL MIXER WEIGHT IS 29,870 lbs [13531 kg]
- ⑥ MIXER MOUNTING DESIGN DATA:
VERTICAL DOWNWARD LOAD: 77,700 LBS. [345765 N]
TORQUE: 706,000 IN.-LBS. [79767 N*m]
BENDING MOMENT: 844,000 IN.-LBS. [95359 N*m]
DESIGN LOADS ARE GREATER THAN ACTUAL LOADS BY A SUITABLE FACTOR, CONSISTENT WITH CONSTRUCTION CODES AND LIGHTNIN EXPERIENCE. LIGHTNIN WARRANTIES AND GUARANTEES EXTEND FOR THOSE ITEMS FURNISHED BY IT. ALL OTHER EQUIPMENT AND DESIGNS ARE THE RESPONSIBILITY OF OTHERS.
- ⑦ MINIMUM OPENING REQUIRED TO PASS DISASSEMBLED MIXER PARTS IS 52.00" [1321 mm] DIAMETER.
- ⑧ CLEARANCE REQUIRED FOR REMOVAL OF OIL LEVEL GAUGE.
- ⑨ MINIMUM CLEARANCE REQUIRED IN MOUNTING STRUCTURE
- ⑩ AS COMMON PRACTICE, THE MIXER SUPPORT STRUCTURE IS CONSTRUCTED OF TWO STEEL BEAMS WITH LATERAL AND END BRACING. FOR THIS INSTALLATION THE RECOMMENDED MINIMUM BEAM SIZE IS W24x176 WHEN INSTALLING LATERAL AND END BRACING. CONTINUOUS WELDS ARE PREFERRED OVER SKIP WELDS. THE SUPPORT BEAM SIZE IS BASED ON A.I.S.C. DESIGN GUIDELINES AND ON THE LIGHTNIN DEFLECTION CRITERIA CONSIDERING THE LIVE LOADS IMPOSED BY THE UNIT.
- ⑪ LIMIT RING DESIGN BY LIGHTNIN. RING FURNISHED BY OTHERS. HORIZONTAL DESIGN LOAD ON LIMIT RING IS 5,100 LBS.
- ⑫ TAG NO. / SERVICE:
10-08-AG-001 THRU 007 / LEACH TANKS
04

FIELD PATCH KIT REQUIRED
SEE NOTE 1

ALL EQUIPMENT DESIGN AND APPLICATION DATA SHOWN HEREIN AND RELATED KNOW-HOW IS CONFIDENTIAL AND THE PROPERTY OF THE LIGHTNIN GROUP OF COMPANIES. NO USE OR DISCLOSURE THEREOF MAY BE MADE WITHOUT OUR WRITTEN PERMISSION.



GENERAL ARRANGEMENT

FOR: **MINERA SUYAMARCA S.A.C.**
S.O. NO.: 1519236 ITEM NO.: 20
CUST. P.O. NO.: 1020000511 QUANTITY: 7
TAG NO.: SEE NOTE 12 V.D.N.:
MIXER MODEL: 783Q150 RATIO: 58.88:1
SERIAL NO.: 1000002793986-3992

CERTIFIED BY: _____

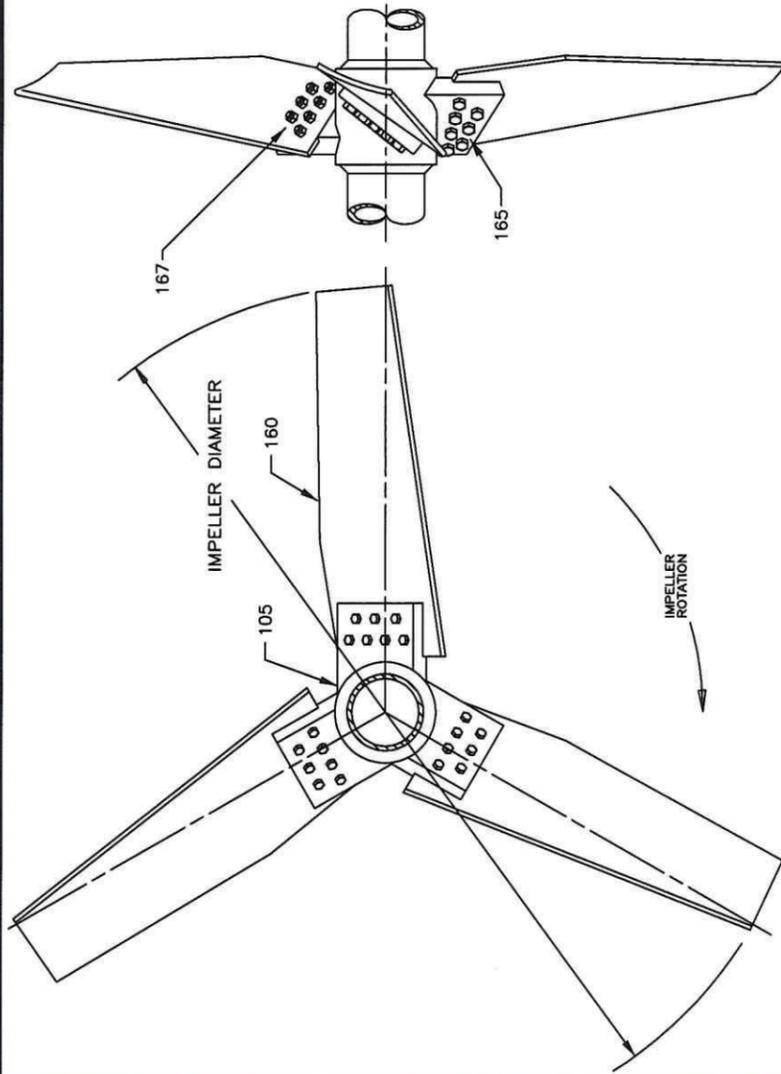
DATE: _____

© LIGHTNIN
2012

DRAWING NO.: 1519236000020-A

| ITEM | PART NAME |
|------|-------------------------|
| 105 | SHAFT AND HUB ASSEMBLY |
| 160 | BLADE |
| 165 | HEX. HD. CAP SCREW (**) |
| 167 | HEX. NUT (**) |

WHEN ORDERING PARTS SPECIFY ITEM NO., PART NAME, DRAWING NO., AND PROJECT NO.
 (**) QUANTITY OF HARDWARE SHOWN IS NOT NECESSARILY QUANTITY FURNISHED.



IMPELLER INSTRUCTIONS:
 1. MATE THE THREE BLADES (CONVEX SIDE UP) ON THE HUB EARS. INSTALL THE HARDWARE HEX NUT (167) AND HEX HEAD CAP SCREWS (165).
 2. IT IS ESSENTIAL THAT THE HARDWARE SECURING THE BLADES TO THE HUB IS TIGHTENED TO THE PROPER TORQUE VALUE (212 FT-LBS. LUBRICATED).
 3. IT IS GOOD PRACTICE TO RETIGHTEN ALL BOLTED CONNECTIONS AFTER THE EQUIPMENT HAS BEEN IN OPERATION. IT IS RECOMMENDED THAT ALL HARDWARE BE CHECKED FOR TIGHTNESS 12 HOURS AFTER ASSEMBLY AND AT EACH SCHEDULED SHUT DOWN THEREAFTER.
 4. REFER TO 1519236-RC1 & RC1 2 FOR RUBBER COVERING INSTRUCTIONS.
 5. NATURAL RUBBER COVERING: DUROMETER HARDNESS 40 +/-5. COVERING THICKNESS: 6mm WITH ADDITIONAL 6mm ON LEADING EDGES AND TIPS.

SPX. Lightnin & Florty
 ISO 9001 CERTIFIED

ALL EQUIPMENT DESIGN AND APPLICATION DATA SHOWN HEREIN AND RELATED KNOW-HOW ARE CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY AND REMAIN THE PROPERTY OF SPX CORPORATION. NO USE OR DISCLOSURE THEREOF MAY BE MADE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF SPX CORPORATION.

DRAWING TITLE
A510E IMPELLER ASSEMBLY - COVERED

DRAWING NUMBER
1519236020-C

| REV | DATE | BY | REVISION DESCRIPTION |
|-----|------|----|----------------------|
| | | | |

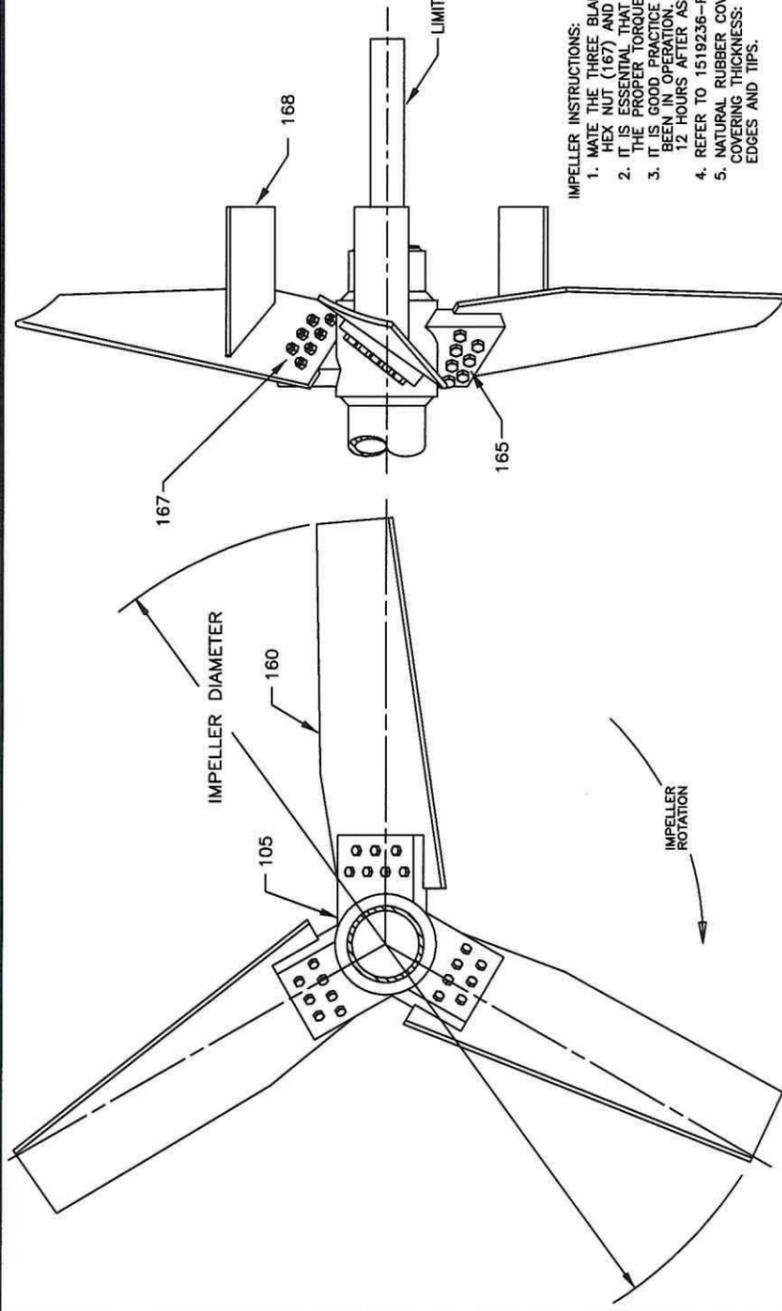
P.O. NO.: 1020000511 CUSTOMER: MINERA SUYAMARCA S.A.C.
 TAG NO.: 10-04-AG-001 - 007 LEACH TANKS
 LIGHTNIN SALES NO.: 1519236 DRAWN BY: TOML DATE: 9/7/2012
 LIGHTNIN PROJ. NO.: 20 CERTIFIED: DATE:

VDN:

| ITEM | PART NAME |
|------|-------------------------|
| 105 | SHAFT AND HUB ASSEMBLY |
| 160 | BLADE & FIN ASSEMBLY |
| 165 | HEX. HD. CAP SCREW (**) |
| 165 | HEX. NUT |
| 168 | STABILIZER FIN |

WHEN ORDERING PARTS SPECIFY ITEM NO., PART NAME, DRAWING NO., AND PROJECT NO.

(**) QUANTITY OF HARDWARE SHOWN IS NOT NECESSARILY QUANTITY FURNISHED.



IMPELLER INSTRUCTIONS:

1. MATE THE THREE BLADES (CONVEX SIDE UP) ON THE HUB EARS. INSTALL THE HARDWARE HEX NUT (167) AND HEX HEAD CAP SCREWS (165).
2. IT IS ESSENTIAL THAT THE HARDWARE SECURING THE BLADES TO THE HUB IS TIGHTENED TO THE PROPER TORQUE VALUE (212 FT-LBS. LUBRICATED)
3. IS. GOOD PRACTICE TO TIGHTEN ALL BOLTED CONNECTIONS AFTER THE EQUIPMENT HAS BEEN IN OPERATION FOR 12 HOURS AFTER ASSEMBLY AND AT EACH SCHEDULED SHUT DOWN THEREAFTER.
4. REFER TO 1519236-RC1 & RC1 2 FOR RUBBER COVERING INSTRUCTIONS.
5. NATURAL RUBBER COVERING: DUROMETER HARDNESS 40 +/-5. COVERING THICKNESS: 6mm WITH ADDITIONAL 6mm ON LEADING EDGES AND TIPS.

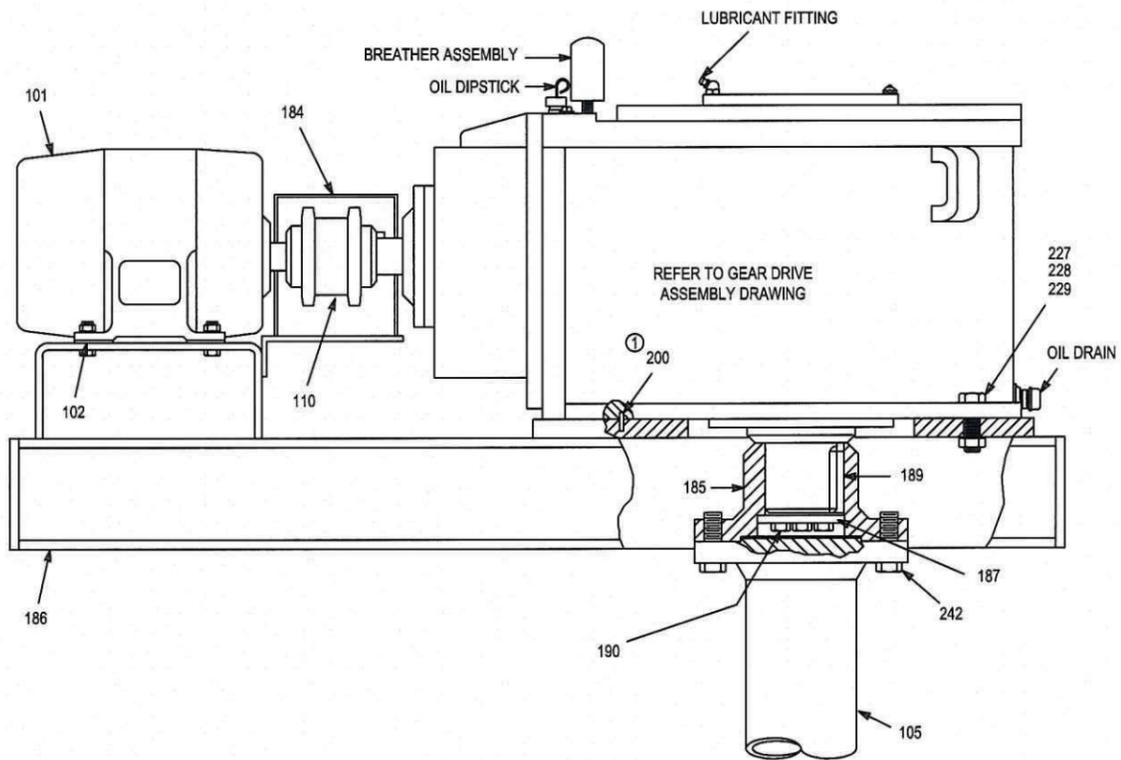


ALL EQUIPMENT DESIGN AND APPLICATION DATA SHOWN HEREIN AND RELATED KNOWHOW ARE CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY AND REMAIN THE PROPERTY OF SPX CORPORATION. NO USE OR DISCLOSURE THEREOF MAY BE MADE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF SPX CORPORATION.

| | |
|--------------------------------------|-----|
| DRAWING TITLE | |
| LOWER A510E IMPELLER ASS.Y - COVERED | |
| DRAWING NUMBER | REV |
| 1519236020-D | |

| REV | DATE | BY | REVISION DESCRIPTION |
|---|------|----------------|-----------------------------------|
| | | | |
| P.O. NO.: 1020000511 | | | CUSTOMER: MINERA SUYAMARCA S.A.C. |
| TAG NO.: 10-04-AG-001 - 007 LEACH TANKS | | | |
| LIGHTNIN SALES NO.: 1519236 | | DRAWN BY: TOML | DATE: 9/7/2012 |
| LIGHTNIN PROJ. NO.: 20 | | CERTIFIED: | DATE: |

VDN:



WHEN ORDERING PARTS, SPECIFY:
MODEL & SERIAL NUMBER, ITEM
NUMBER AND DRAWING NUMBER

| | |
|-----|--------------------------------|
| 242 | HEX HEAD CAP SCREW |
| 229 | HEX NUT |
| 228 | LOCKWASHER |
| 227 | HEX HEAD CAP SCREW |
| 200 | LOCATING PINS (2) (1) |
| 190 | HEX HEAD CAP SCREW - NYLOK (3) |
| 189 | KEY |
| 187 | THRUST PLATE |
| 186 | MIXER MOUNTING BASE |
| 185 | REMOVABLE COUPLING |
| 184 | COUPLING GUARD |
| 110 | HIGH SPEED FLEXIBLE COUPLING |
| 105 | LOWER SHAFT |
| 102 | SHIM SET - MOTOR |
| 101 | MOTOR |

① REDUCER TO CHANNEL BASE LOCATING PINS
(ITEM 200) SHOWN OUT OF POSITION.

| ITEM | PART NAME |
|---|----------------|
| VDN: | |
| CUSTOMER: MINERA SUYAMARCA S.A.C. | |
| P.O. NO.: 1020000511 | |
| TAG NO.: 10-04-AG-001 - 007 LEACH TANKS | |
| LIGHTNIN SALES NO.: 1519236 | |
| LIGHTNIN PROJ. NO.: 20 | |
| DRAWN BY: TOML | DATE: 9/7/2012 |
| CERTIFIED: | DATE: |

| | | | |
|--|---|-----|---|
|  |  | |  |
| | | |  |
| <p>ALL EQUIPMENT DESIGN AND APPLICATION DATA SHOWN HEREIN AND RELATED KNOW-HOW ARE CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY AND REMAIN THE PROPERTY OF SPX CORPORATION. NO USE OR DISCLOSURE THEREOF MAY BE MADE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF SPX CORPORATION.</p> | | | |
| DRAWING TITLE | | | |
| MACHINE ASSEMBLY | | | |
| DRAWING NUMBER | | REV | |
| 1519236020-B | | | |



96013
Revised 10-10
Section 20

Shock and Vibration Switch – VS2 Series



Features

- Designed to Detect Shock/Vibration in 3-Planes of Motion
- Fully Adjustable
- Includes Magnetic Latching Feature
- Manual or Electric Reset



Description

The VS2 Series switches are shock sensitive mechanisms for shutdown of engine or electric motor powered equipment. These switches use a magnetic latch to ensure reliable operation. Explosion-proof "EX" models for hazardous locations are available.

Applications

Ideal for use on engines, pumps, compressors, heat exchangers and pumping units, the VS2 Series can be used anywhere shutdown protection from damaging shock/vibration is desired. Switches are field adjustable to sensitivity required in each application.

Specifications

VS2 and VS2C

Case: Equal to NEMA 3R. Suitable for non-hazardous areas.
VS2: Base mount
VS2C: C-clamp mount, includes 45 ft. (13.7 m) 2-conductor cable, and 5 cable clamps.

Contacts: SPDT-double make leaf contacts, 5A @ 480 VAC.

Shipping Weight:
VS2: 2 lb 8 oz. (1.1 kg)
VS2C: 7 lb (3.2 kg)

Shipping Dimensions:
VS2: 8-1/4 x 9-1/4 x 5 in. (210 x 235 x 127 mm)
VS2C: 12 x 7 x 5-1/2 in. (305 x 178 x 140 mm)

VS2EX

Case: Base mount, explosion-proof aluminum alloy housing; meets NEMA 7/IP54 specifications; Class I, Division 1, Groups C & D; UL and CSA listed.

Snap-switches: 2-SPDT snap-switches; 5A @ 480 VAC; 2A resistive, 1A inductive, up to 30 VDC.

Normal Operating Temperature: -40 to 140°F (-40 to 60°C).

Shipping Weight: 4 lb 8 oz. (2 kg)

Shipping Dimensions: 8-1/4 x 9-1/4 x 5 in. (210 x 235 x 127 mm)

VS2EXR

Case: Same as VS2EX.

Snap-switch: 1-SPDT snap-switch and reset coil; 5A @ 480 VAC; 2A resistive, 1A inductive, up to 30 VDC.

Remote Reset: 115 VAC or 24 VDC (specify).

Shipping Weight: 5 lb 8 oz. (2.2 kg)
Shipping Dimensions: 8-1/4 x 9-1/4 x 5 in. (210 x 235 x 127 mm)

VS2EXRB

Case: Explosion-proof aluminum alloy housing; rated Class I, Division 1, Group B hazardous areas.

Snap-switch: 1-SPDT snap-switch with reset coil (option available for 2-SPDT switches); 5A @ 480 VAC; 2A resistive, 1A inductive, up to 30 VDC.

Remote Reset: 115 VAC or 24 VDC (specify).

Shipping Weight: 17 lb 8 oz. (7.9 kg)
Shipping Dimensions: 12 x 12 x 10 in. (305 x 305 x 254 mm)

Basic Operation

Pushing the reset button moves the tripping latch into a magnetically held position. A shock/vibration will move the magnet beyond this holding position, thus freeing the spring loaded tripping latch to transfer the contacts and shutdown the machinery (see dimensional diagrams in the following pages for visual representation of parts).

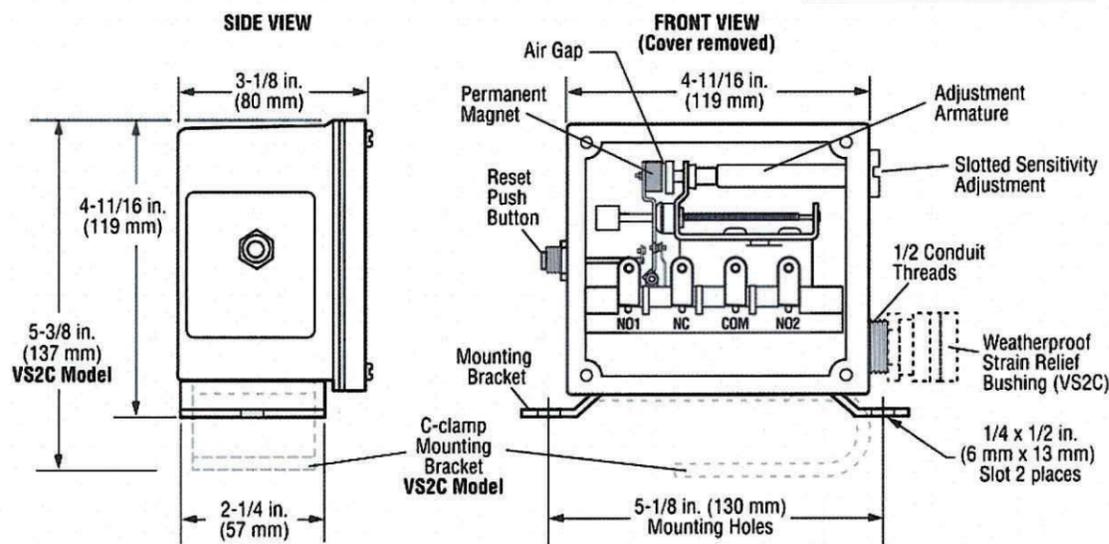
Remote Reset Option (VS2EXR and VS2EXRB)

The remote reset option includes a built-in electric solenoid which allows reset of tripped unit from a remote location. Available for 115 VAC or 24 VDC.

Dimensions

VS2 and VS2C

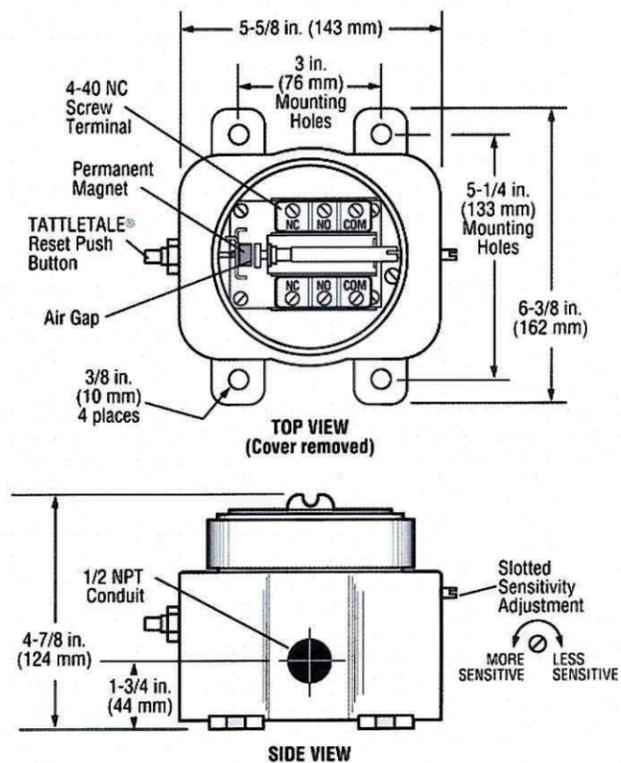
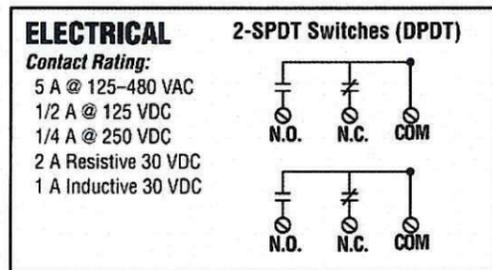
The VS2 and VS2C are designed for use in non-hazardous locations. They have leaf type SPDT, double make contacts that can be used for shutdown and/or alarm. They have a slotted sensitivity adjustment located on the side of the case (see drawing below).



VS2EX

- NEMA 7/IP54 Specifications
- Snap-switch Contacts
- TATTLETALE® Reset Button

Model VS2EX is housed in an explosion-proof enclosure with threaded cover. This enclosure is CSA and UL listed for Class I, Division 1, Groups C & D hazardous locations. In place of the leaf type contacts, 2-SPDT snap-switches are used in this model. Sensitivity is externally adjustable and, when tripped, the VS2EX gives a TATTLETALE® indication on the reset button. It is constructed to meet NEMA 7 specifications.



Warranty - A limited warranty on materials and workmanship is given with this FW Murphy product. A copy of the warranty may be viewed or printed by going to <http://www.fwmurphy.com/warranty>

VS2EXR

- Remote Reset Feature
- NEMA 7 Specifications
- Snap-switch Contacts
- TATTLETALE® Reset Button

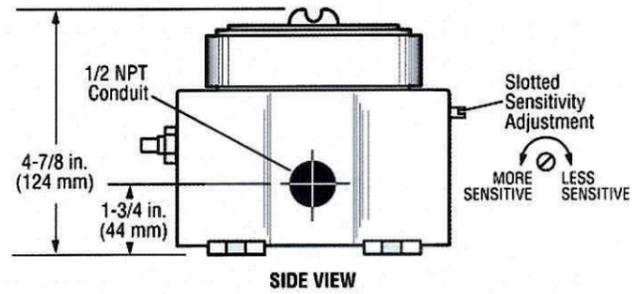
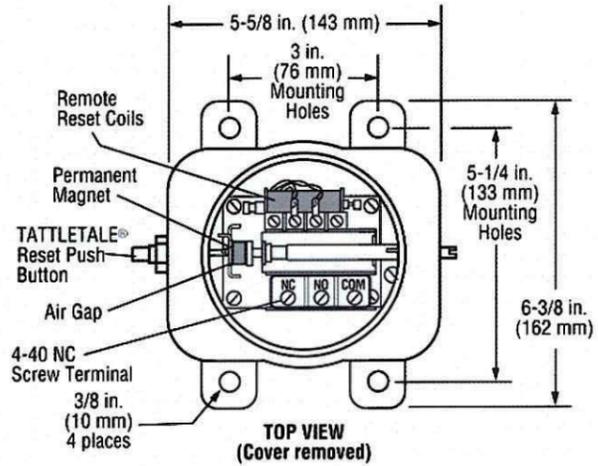
Model VS2EXR features an electric remote reset feature in addition to the TATTLETALE® reset button. The VS2EXR uses only one SPDT snap-switch and is CSA and UL listed for Class I, Division 1, Groups C & D hazardous locations. It is constructed to meet NEMA 7 specifications.



| ELECTRICAL | |
|-----------------------------|--|
| Contact Rating: | |
| 5 A @ 125-480 VAC | |
| 1/2 A @ 125 VDC | |
| 1/4 A @ 250 VDC | |
| 2 A Resistive 30 VDC | |
| 1 A Inductive 30 VDC | |
| Remote Reset Rating: | |
| 115 VAC or 24 VDC (Specify) | |
| 350 mA AC/DC | |

Remote Reset

SPDT Snap-switch



VS2EXRB

- For Group B Locations
- Snap-switch Contacts
- DPDT Feature Optional

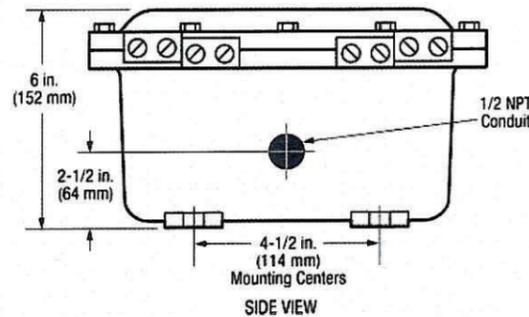
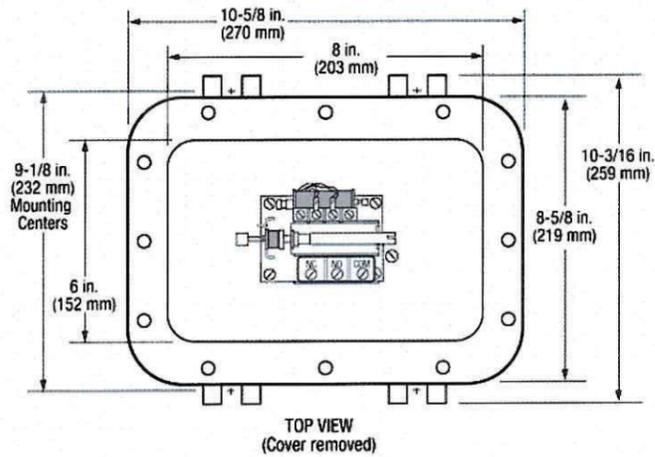
Model VS2EXRB is constructed for use in Class I, Division 1, Group B, hazardous locations. It has, as standard, a SPDT snap-switch and an electric remote reset. Option is available for DPDT snap-switch

| ELECTRICAL | |
|-----------------------------|--|
| Contact Rating: | |
| 5 A @ 125-480 VAC | |
| 1/2 A @ 125 VDC | |
| 1/4 A @ 250 VDC | |
| 2 A Resistive 30 VDC | |
| 1 A Inductive 30 VDC | |
| Remote Reset Rating: | |
| 115 VAC or 24 VDC (Specify) | |
| 350 mA AC/DC | |

Remote Reset

SPDT Snap-switch

Option SPDT Snap-switch (DPDT)



Service Parts

When ordering service parts, specify both part number and description in listing below.

PART NO. DESCRIPTION

VS2 and VS2C

- 20-00-0030 Movement assembly
- 20-00-0031 Glass and gasket assembly
- 20-00-0032 Reset push button assembly
- 20-05-0021 Mounting clamp (VS2C)
- 20-00-0261 Cable clamp assembly (1 each) (VS2C)
- 20-05-0465 2-Conductor electrical cable, 45 feet (13.7 meters) (VS2C)
- 20-00-0137 5 clamps and 45 feet (13.7 meters) of cable (VS2C)

VS2EX

- 20-01-0091 Movement assembly
- 20-05-0087 Cover
- 00-00-0309 Cover gasket
- 20-01-0090 Snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) prior to September 1, 1995.*
- 20-00-0288 Snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) for models manufactured on September 1, 1995 or later.*
- 20-00-0289 C-clamp conversion mounting kit

VS2EXR

- 20-00-0262 Movement assembly
- 20-05-0087 Cover
- 00-00-0309 Cover gasket
- 20-01-0090 Snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) prior to September 1, 1995.*
- 20-00-0288 Snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) for models manufactured on September 1, 1995 or later.*
- 20-00-0049 Reset solenoid assembly (115 VAC)
- 20-00-0234 Reset solenoid assembly (24 VDC)
- 20-00-0289 C-clamp conversion mounting kit

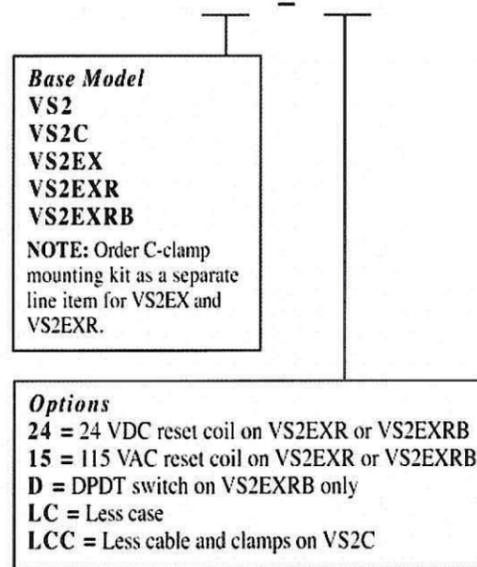
VS2EXRB

- 20-01-0090 Snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) prior to September 1, 1995.*
- 20-00-0288 Snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) for models manufactured on September 1, 1995 or later.*
- 20-00-0057 Inside snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) for model VS2EXRB-D prior to September 1, 1995.*
- 20-00-0058 Outside snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) for model VS2EXRB-D prior to September 1, 1995.*
- 20-00-0287 Outside snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) for model VS2EXRB-D manufactured on September 1, 1995 or later.*
- 20-00-0290 Inside snap-switch and insulator kit (1 switch per kit) for model VS2EXRB-D manufactured on September 1, 1995 or later.*
- 20-05-0077 Adjustment shaft
- 20-00-0262 Movement assembly
- 20-00-0049 Reset solenoid assembly (115 VAC)
- 20-00-0234 Reset solenoid assembly (24 VDC)

* Models with date 0895 and before use old switch. Dated 0995 after, use straight snap-switch arm, no rollers.

How to Order

To order your VS2 Series model use the diagram below.
Part number example: **VS2EXR-24**







ANEXO E: Planos del diseño modificado