

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Diseño y evaluación sísmica de un tanque metálico de almacenamiento de 700 m³ considerando interacción fluido–estructura.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Magister en Estructuras Civiles Sismorresistentes

Presentado por:

Ronald Eugenio Chang Lopez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

A mi madre Betty Lopez, pilar
fundamental en mi vida.

A mis hijos Alessandro y Benjamín

A mi esposa Elizabeth Vines

A mis hermanas Yussing y Tayling

A mis amigos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad.

Quiero dar gracias especiales a mi MADRE Betty López Guerrero por su incansable apoyo, dándome su fuerza y motivación incondicional, logrando llevarme hasta donde estoy ahora.

A mi director de tesis la Dra. Natividad Garcia Troncoso por su guía y aporte desinteresado en el desarrollo de la misma.

Agradezco a mi esposa Maria Elizabeth Vínces, mis hijos Alessandro y Benjamín, quienes fueron un puntal anímico para la elaboración y culminación de este proyecto de graduación; por último y no menos importante doy mi gratitud a Diana Crespo, una amiga, comadre y compañera de trabajo quien siempre se preocupó por mi formación y me incentivó durante el transcurso de mi maestría.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Ronnie Atair Arteaga Flores y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

.....

Ronald Chang Lopez

EVALUADORES

.....

Nadia Quijano MSc

PROFESOR DE LA MATERIA

.....

Samantha Hidalgo MSc

PROFESOR DE LA MATERIA

.....

Natividad Garcia Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Los tanques metálicos de almacenamiento de agua constituyen infraestructuras esenciales dentro de instalaciones industriales, particularmente cuando forman parte de sistemas contra incendios, donde su correcto funcionamiento resulta crítico antes, durante y después de la ocurrencia de un evento sísmico. En zonas con amenaza sísmica significativa, la falla estructural o funcional de este tipo de sistemas puede ocasionar consecuencias graves, no solo por la pérdida del recurso almacenado, sino también por el compromiso de la seguridad de las instalaciones, la continuidad operativa y la integridad del personal. A pesar de su importancia, en la práctica profesional es común que el análisis sísmico de tanques de almacenamiento se realice mediante enfoques simplificados, sin considerar de manera explícita los efectos de la interacción fluido–estructura ni las condiciones reales del suelo de cimentación.

Durante un evento sísmico, el fluido contenido en el tanque no se comporta como una masa rígida solidaria a la estructura, sino que interactúa dinámicamente con las paredes del tanque, generando presiones hidrodinámicas adicionales y modos de vibración diferenciados. Este comportamiento da lugar a la aparición de componentes impulsivas y convectivas del movimiento del fluido, las cuales influyen de forma determinante en la respuesta sísmica global del tanque, particularmente en la magnitud de las fuerzas laterales, los momentos volcadores y la estabilidad de la cimentación. Ignorar estos efectos puede conducir a estimaciones imprecisas de las demandas sísmicas, comprometiendo el desempeño estructural y la seguridad del sistema frente a sismos de diseño.

Adicionalmente, las condiciones geotécnicas del sitio representan un factor crítico en la respuesta sísmica del tanque. El suelo de fundación no solo actúa como elemento de soporte, sino que participa activamente en la transmisión y amplificación de las acciones sísmicas. La variabilidad de sus propiedades mecánicas puede generar asentamientos diferenciales, concentraciones de esfuerzos y cambios en las condiciones de apoyo, los cuales adquieren mayor relevancia bajo cargas dinámicas. En tanques de almacenamiento, incluso deformaciones moderadas del terreno

pueden inducir esfuerzos adicionales en la envolvente metálica y alterar la distribución de presiones de contacto, afectando la estabilidad global del sistema.

Asimismo, suelos con baja resistencia al corte, alta compresibilidad o comportamiento desfavorable frente a cargas cíclicas pueden experimentar pérdidas de rigidez durante la excitación sísmica, incrementando el riesgo de deslizamiento y volcamiento del tanque. En el caso de suelos granulares saturados, el potencial de licuación constituye un aspecto especialmente crítico, ya que la reducción de la resistencia efectiva del suelo puede provocar desplazamientos permanentes o la pérdida total de soporte de la estructura, incluso cuando el diseño estructural del tanque cumple con los criterios normativos.

En este contexto, la presente investigación se justifica por la necesidad de desarrollar un análisis integral del comportamiento sísmico de un tanque metálico de almacenamiento de agua con capacidad de 700 m³, incorporando de manera explícita la interacción fluido–estructura y considerando las condiciones del suelo de cimentación. Mediante la aplicación del modelo dinámico equivalente propuesto por Housner y por normativas como la API 650, se evalúan las componentes impulsiva y convectiva del fluido, así como las demandas sísmicas asociadas. Complementariamente, se verifica la estabilidad global del sistema mediante criterios de volcamiento, deslizamiento y presiones de contacto, tanto para condiciones de tanque lleno como para escenarios con niveles mínimos de agua.

De esta manera, la investigación contribuye a reducir la incertidumbre asociada al diseño sísmico de tanques de almacenamiento, proporcionando una metodología técnica coherente y aplicable que permite mejorar la seguridad estructural, la confiabilidad del sistema y la toma de decisiones en el diseño de infraestructuras industriales críticas en zonas sísmica

Palabras Clave: diseño, evaluación sísmica, tanque.

ABSTRACT

Steel water storage tanks constitute essential infrastructure within industrial facilities, particularly when they form part of fire protection systems, where their proper performance is critical before, during, and after the occurrence of a seismic event. In regions of significant seismic hazard, the structural or functional failure of such systems can lead to severe consequences, not only due to the loss of the stored resource but also because of the impact on facility safety, operational continuity, and personnel protection. Despite their importance, in professional practice the seismic analysis of storage tanks is often carried out using simplified approaches, without explicitly considering fluid–structure interaction effects or the actual conditions of the foundation soil.

During a seismic event, the fluid contained within the tank does not behave as a rigid mass acting integrally with the structure, but rather interacts dynamically with the tank walls, generating additional hydrodynamic pressures and distinct vibration modes. This behavior gives rise to impulsive and convective components of the fluid motion, which significantly influence the global seismic response of the tank, particularly in terms of lateral forces, overturning moments, and foundation stability. Neglecting these effects may lead to inaccurate estimates of seismic demands, thereby compromising the structural performance and safety of the system under design-level earthquakes.

In addition, the geotechnical conditions of the site represent a critical factor in the seismic response of the tank. The foundation soil not only provides structural support but also actively participates in the transmission and amplification of seismic actions. Variability in its mechanical properties may result in differential settlements, stress concentrations, and changes in support conditions, which become more critical under dynamic loading. In storage tanks, even moderate ground deformations can induce additional stresses in the steel shell and alter the distribution of contact pressures, adversely affecting the global stability of the system.

Furthermore, soils with low shear strength, high compressibility, or unfavorable behavior under cyclic loading may experience stiffness degradation during seismic excitation, increasing the risk of sliding and overturning of the tank. In the case of saturated granular soils, the potential for liquefaction constitutes a particularly critical

issue, as the reduction in effective soil strength may lead to excessive deformations, permanent displacements, or even a complete loss of structural support, regardless of adequate structural design of the tank.

Within this context, the present research is justified by the need to develop an integrated seismic analysis of a 700 m³ steel water storage tank, explicitly incorporating fluid–structure interaction effects and considering the foundation soil conditions. By applying the equivalent dynamic model proposed by Housner and adopted by international standards such as API 650, the impulsive and convective components of the fluid response and their associated seismic demands are evaluated. In addition, the global stability of the system is verified through checks for overturning, sliding, and foundation contact pressures, considering both full-tank conditions and scenarios with minimum water levels.

In this manner, the research contributes to reducing the uncertainty associated with the seismic design of storage tanks, providing a coherent and applicable technical methodology that enhances structural safety, system reliability, and informed decision-making in the design of critical industrial infrastructure located in seismic regions

Keywords: *Design, seismic evaluation, tank*

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| EVALUADORES | 5 |
| RESUMEN | I |
| <i>ABSTRACT</i> | III |
| ÍNDICE GENERAL..... | V |
| ABREVIATURAS..... | VIII |
| SIMBOLOGÍA..... | IX |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XIII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | XIV |
| CAPÍTULO 1..... | 16 |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 16 |
| 1.1 Introducción del proyecto de graduación..... | 16 |
| 1.2 Antecedentes..... | 17 |
| 1.3 Problemática a resolver..... | 19 |
| 1.4 Justificación | 20 |
| 1.5 Objetivos..... | 20 |
| 1.5.1 Objetivo General..... | 20 |
| 1.5.2 Objetivos Específicos | 21 |
| CAPÍTULO 2..... | 22 |
| 2 Desarrollo del proyecto..... | 22 |
| 2.1 Marco conceptual..... | 22 |
| 2.2 Especificaciones técnicas de los materiales..... | 24 |
| 2.2.1 Acero Estructural | 24 |
| 2.2.2 Hormigón..... | 25 |
| 2.2.3 Acero de refuerzo | 26 |
| 2.3 Implantación general del proyecto | 28 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 2.4 | Dimensiones de tanque de almacenamiento y cimentación | 29 |
| CAPÍTULO 3 | | 30 |
| 3Diseño de losa de cimentación y tanque de almacenamiento de agua de 700 m3 para red de sistema contra incendios | | 30 |
| 3.1 | Analisis de suelo | 30 |
| 3.2 | Analisis estructural losa macisa | 38 |
| 3.3 | Diseno de tanque metálico | 44 |
| 3.4 | Diseno de acero figurado para losa maciza | 48 |
| CAPÍTULO 4 | | 53 |
| 4 Análisis sísmico del tanque de almacenamiento de agua | | 53 |
| 4.1 | Generalidades del analisis sísmico del tanque de almacenamiento | 53 |
| 4.2 | Parametro del sitio | 53 |
| 4.3 | Modelacion del sisyema tanque - fluido | 54 |
| 4.3.1 | Modelo dinamico equivalente | 54 |
| 4.3.2 | Determinacion de las masas impulsivas y convectivas | 54 |
| 4.4 | Periodo de vibracion del sistema | 55 |
| 4.4.1 | Periodo impulsivo | 55 |
| 4.4.2 | Periodo convectivo | 56 |
| 4.5 | Fuerzas sísmicas hidrodinamicas | 56 |
| 4.5.1 | Fuerza sísmica impulsiva | 56 |
| 4.5.2 | Fuerza sísmica convectiva | 57 |
| 4.5.3 | Fuerza sísmica total | 57 |
| 4.6 | Momento sísmico volcador | 58 |
| 4.7 | Análisis sísmico cuando el tanque contiene el volumen mínimo de agua dentro del recipiente | 58 |
| 4.7.1 | Determinacion de las masas impulsivas y convectivas con volumen de agua minima | 59 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 4.8 | Periodo de vibracion de sistema con volumen mínimo de agua | 60 |
| 4.8.1 | Periodo impulsivo con volumen minima de agua | 60 |
| 4.8.2 | Periodo convectivo con volumen minima de agua..... | 61 |
| 4.9 | Fuerza sismicas hidrodinamicas con volumen de agua minimo | 62 |
| 4.9.1 | Fuerza sismica impulsiva con volumen minimo..... | 62 |
| 4.9.2 | Fuerza sismica convectiva con volumen minimo..... | 62 |
| 4.9.3 | Fuerza sismica total con volumen minimo..... | 63 |
| 4.10 | Momento sismico volcador con volumen minomo | 63 |
| CAPÍTULO 5..... | | 65 |
| 5 Verificacion de estabilidad sismica..... | | 65 |
| 5.1 | Análisis de verificacion de volcamiento y deslizamiento..... | 65 |
| 5.1.1 | Verificacion de volcamiento | 65 |
| 5.1.2 | Verificacion de deslizamiento. | 67 |
| 5.2 | Presiones de contacto en la base de la losa | 68 |
| 5.3 | Verificacion de estabilidad sismica..... | 68 |
| 5.4 | Análisis de verificacion al volcamiento y deslizamiento cuando el tanque contiene el volumen mínimo de agua dentro del recipiente | 69 |
| 5.4.1 | Verificacion de volcamiento con el volumen minomo | 69 |
| 5.4.2 | Verificacion de deslizamiento con el volumen minimo..... | 71 |
| 5.5 | Presiones de contacto en la base de la losa con volumen minimo | 72 |
| 5.6 | Verificacion de estabilidad sismica para el tanque con el volumen mínimo..... | 72 |
| CAPÍTULO 6..... | | 74 |
| 6 Conclusiones y Recomendaciones..... | | 74 |
| 6.1 | Conclusiones..... | 74 |
| 6.2 | Recomendaciones | 75 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 78 |

ABREVIATURAS

| | |
|--------|---|
| ASTM | American society for testing materials |
| ACI | American Concrete Institute |
| ASCE | American Society of Civil Engineers |
| AWS | American Welding Society |
| API | American Petroleum Institute |
| AWWA | American Water Works Association |
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| IBC | International Code Council |
| MIDUVI | Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda |
| NFPA | National Fire Protection Association |
| USDA | Departamento de agricultura de los Estados Unidos |
| SSPC | Society for Protective Coatings |
| NACE | National Association of Corrosion Engineers |

SIMBOLOGÍA

| | |
|-------------|---|
| < | Menor que |
| > | Mayor que |
| + | Más (positivo) |
| = | igual |
| % | Porcentaje |
| Ø | Diámetro |
| C | Carbono |
| cm | Centímetro |
| Cu | Cobre |
| CPT | Prueba de penetración de cono |
| D | Diámetro |
| E | Módulo de elasticidad |
| e | espesor |
| Esr | Modulo de elasticidad |
| F_c | Fuerza sísmica convectiva |
| FS_{dest} | Factor de seguridad de deslizamiento |
| FS_{volc} | Factor de seguridad de volcamiento |
| Fy | Esfuerzo de fluencia |
| Fu | Esfuerzo mínimo de ruptura |
| Fe | hierro |
| F_i | Fuerza sísmica impulsiva |
| F_{total} | Fuerza sísmica total |
| Fyr | Límite de fluencia |
| f'c | resistencia a la compresión especificada del material |
| g | gravedad |
| G | Modulo de elasticidad al esfuerzo cortante |
| GPa | Giga pascales |
| H | altura |
| h_i | Altura impulsiva |
| h_c | Altura convectiva |

| | |
|---------------------|--------------------------------------|
| KN | Kilo newton |
| kg/m ³ | Kilogramo por metro cubico |
| kg/cm ² | Kilogramo por metro cuadrado |
| KN-m | Kilo newton por metro |
| m | Metro |
| Mn | Manganeso |
| mm | Milímetro |
| m ² | Metros cuadrados |
| m ³ | Metros cúbicos |
| m_i | Masa impulsiva |
| m_c | Masa convectiva |
| m_L | Masa total |
| M_r | Momento resistente |
| M_s | Momento sísmico volcador |
| Min | Mínimo |
| Max | Máximo |
| MPa | Mega pascales |
| N | Newton |
| No. | numero |
| P | Fosforo |
| Pa | Pascales |
| R | radio |
| R ² | Radios cuadrados |
| R_f | Resistencia por fricción |
| S | Azufre |
| Si | Silicio |
| SQRT | raíz cuadrada |
| $S_a(T_i)$ | Aceleración espectral impulsiva |
| $S_a(T_c)$ | Aceleración espectral convectiva |
| s | Segundo |
| T_i | Periodo impulsivo |
| T_c | Periodo convectivo |
| tonf/m ² | Toneladas fuerzas por metro cuadrado |

| | |
|-------------------|------------------------------------|
| tonf/m^3 | Toneladas fuerzas por metro cubico |
| ton | Tonelada |
| μ | Coefficiente de fricción |
| V | Volumen |
| ν | Relación de poisson |
| W | Peso |
| W/m | Peso por metro |
| W_L | Peso liquido |
| α | Coefficiente de dilatación |
| ρ | Densidad |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Varillas corrugadas listas para su uso..... | 29 |
| Figura 2.2 Ubicacion del tanque de almacenamiento | 33 |
| Figura 3.1 Pruebas CPT..... | 34 |
| Figura 3.2 Grafico de capas en plaxis 2D | 35 |
| Figura 3.3 Analisis em etapa inicial..... | 36 |
| Figura 3.4 Análisis en la colocación de relleno y sobrecarga..... | 36 |
| Figura 3.5 Analisis de retiro de sobrecarga..... | 37 |
| Figura 3.6 Analisis de aplicacion de cargas | 37 |
| Figura 3.7 Analisis final de consolidacion..... | 38 |
| Figura 3.8 Analisis de consolidacion por sobrecrga | 38 |
| Figura 3.9 Analisis de aplicacion de carga | 38 |
| Figura 3.10 Analisis por consolidacion al 90% | 39 |
| Figura 3.11 Analisis de asentamiento para losa de 40 cm | 39 |
| Figura 3.12 Grafico de desplazamiento..... | 40 |
| Figura 3.13 Asentamientos vs esfuerzos | 41 |
| Figura 3.14 Asentamientos em el retiro de la sobrecarga | 42 |
| Figura 3.15 Asentamientos proyectados | 42 |
| Figura 3.16 Asentamientos obtenidos plaxis 2D | 45 |
| Figura 3.17 Reaccion del suelo actuando sobre la losa de cimentacionen SAFE.... | 45 |
| Figura 3.18 VALORES K EM AMBAS LOSAS MACIZAS | 46 |
| Figura 3.9 Esfuerzos del suelo em losa de cimentacion bajo crga de servicio para losa de 40 cm | 46 |
| Figura 3.20 Momento flector y cortante para losa de 40 cm | 47 |
| Figura 3.21 Esfuerzos del suelo em losa de cimentacion bajo cargas de servicio para losa de 70 cm..... | 47 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.22 Momento flector y cortante para losa de 70 cm | 48 |
| Figura 3.23 Plano de tanque agua de sci..... | 54 |
| Figura 3.24 Vista en planta de cimentacion y tanque..... | 56 |
| Figura 3.25 Vista em corte de cimentacion | 57 |
| Figura 3.26 Posicionamiento de varillas longitudinales y verticales superior | 57 |
| Figura 3.27 Posicionamiento superior de la armadura de hierro a 90 grados | 58 |
| Figura 3.28 Posicionamiento superior de la armadura de hierro a 0 grados | 59 |
| Figura 3.29 Posicionamiento de varillas longitudinales y verticales inferiores | 60 |
| Figura 3.30 Posicionamiento inferior de la armadura de hierro a 90 grados | 61 |
| Figura 3.31 Posicionamiento inferior de la armadura de hierro a 0 grados | 61 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Composición química ASTM A36 | 25 |
| Tabla 2.2 Propiedades ASTM A36 | 25 |
| Tabla 2.3 Propiedades y características de varilla corrugada | 27 |
| Tabla 2.4 Datos técnicos de varillas corrugadas | 28 |
| Tabla 2.5 Dimensiones volumetricas del tanque y cimentación | 29 |
| Tabla 3.1 Espesores de la pared del tanque | 44 |
| Tabla 3.2 Datos de las vigas | 45 |
| Tabla 3.3 Datos de la columna | 45 |
| Tabla 3.4 Resultados del tanque metálico | 46 |
| Tabla 4.1 Resumen de valores de masa | 55 |
| Tabla 4.2 Resumen de valores de periodos | 56 |
| Tabla 4.3 Resumen de valores de masa | 60 |
| Tabla 4.4 Resumen de valores de periodos | 61 |

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción del proyecto de graduación

Los tanques metálicos de almacenamiento cumplen un rol fundamental en diversas infraestructuras industriales, hidráulicas y energéticas, ya que permiten garantizar el suministro continuo de fluidos esenciales. En zonas de alta actividad sísmica, estas estructuras presentan una elevada vulnerabilidad frente a acciones sísmicas, debido a la interacción dinámica entre el fluido almacenado y la estructura contenedora, lo cual puede generar esfuerzos adicionales no despreciables durante un evento sísmico como lo detalla Housner[1].

Históricamente, los daños observados en tanques metálicos sometidos a sismos son; levantamiento del fondo, falla de anclajes y derrames del fluido donde se ha evidenciado, la necesidad de considerar de manera adecuada la interacción fluido–estructura en las todas las etapas de los diseños y estimaciones sísmicas. La omisión de este fenómeno puede conducir a estimaciones no realistas de las demandas sísmicas, comprometiendo la estabilidad y seguridad de la estructura.

En este contexto, el presente estudio tiene como propósito primordial el diseño y la evaluación sísmica de un tanque metálico de almacenamiento con una capacidad de 700 m³, considerando explícitamente la interacción fluido–estructura. Para ello, se emplean criterios y procedimientos establecidos en normativas internacionales vigentes como API650 [2], así como metodologías analíticas y numéricas que permiten representar el comportamiento dinámico del sistema tanque–fluido ante solicitaciones sísmicas.

El estudio busca aportar una evaluación técnica confiable del comportamiento sísmico del tanque, analizando las fuerzas hidrodinámicas, los modos de vibración y los posibles mecanismos de falla, con el fin de garantizar un diseño estructural seguro y eficiente considerando normativas ASCE [3]. Asimismo, los resultados obtenidos servirán como referencia para futuros proyectos de tanques metálicos

ubicados en zonas sísmicas, contribuyendo al mejor entendimiento de la importancia de la interacción fluido–estructura en el diseño sismorresistente

1.2 Antecedentes

La relevancia de los tanques de almacenamiento en sistemas industriales radica en garantizar la seguridad, eficiencia y continuidad operativa de una empresa con sus procesos, almacenando de forma segura materias primas y productos terminados, evitando interrupciones, controlando inventarios y manteniendo la calidad mediante aislamiento o materiales especiales, siendo esenciales en sectores como el energético, químico y alimentario para la gestión de fluidos y sólidos.

Dentro de las funciones por las cuales los tanques de almacenamientos son claves o de gran importancia son las siguientes:

- Disponibilidad y Continuidad: Aseguran un suministro constante de insumos y la acumulación de productos, permitiendo que los procesos no se detengan por falta de material.
- Seguridad: Contienen sustancias peligrosas, corrosivas o inflamables de manera segura, previniendo fugas y derrames al ambiente, a menudo con sistemas de contención secundaria.
- Conservación de la Calidad: Mantienen las condiciones ideales de temperatura (isotérmicos) o pureza, vital para productos sensibles como en la industria alimentaria o farmacéutica.
- Gestión de Inventario: Permiten el acopio de grandes volúmenes de materia prima y productos finales, optimizando la logística.
- Procesamiento: Se usan como parte de procesos como la dosificación, mezclado o fermentación de sustancias, en los sectores donde es aplicable.
- Resistencia y Adaptabilidad: Fabricados con materiales como acero al carbono, acero inoxidable, resisten corrosión y condiciones climáticas con una buena protección de aplicación de anclaje de pintura.
- Variedad de Aplicaciones: Desde almacenamiento de agua para incendios hasta químicos complejos en la industria.

En resumen, un tanque industrial no es solo un contenedor, sino un componente crítico que asegura la viabilidad económica, la seguridad y el cumplimiento normativo de una operación industrial.

Dentro del uso que se emplean los tanques de almacenamientos, uno de gran importancia y relevancia es el de almacenamiento de agua para una red del sistema contra incendios.

En función al tipo de industria, niveles de producción y tipos de productos que comercialice, se determina la capacidad que requiere el tanque, debido que es de vital importancia garantizar un suministro de agua inmediato, constante y con la presión adecuada para extinguir fuegos en sus etapas iniciales, asegurando la protección de vidas y bienes, y cumpliendo con normativas, ya que no dependen del suministro municipal intermitente y son clave para la seguridad en industrias y edificios.

Para un correcto análisis en el proyecto y dimensionamiento de los tanques metálicos de almacenamientos, hay que tomar en consideración puntos significativos, como son:

- Disponibilidad inmediata: Aseguran agua al instante para bomberos y sistemas automáticos (rociadores).
- Suministro constante: Proporcionan un flujo suficiente durante la duración del incendio, sin depender de la red externa.
- Cumplimiento normativo: Son esenciales para cumplir con estándares internacionales (NFPA) con criterios específicos de operación y capacidad [4].
- Protección de activos: Salvaguardan industrias, infraestructuras y propiedades de pérdidas mayores.
- Independencia de la red: Funcionan incluso si el suministro de agua potable falla o tiene baja presión.
- Optimización del sistema: Permiten dimensionar las bombas y tuberías eficientemente para la demanda específica

1.3 Problemática a resolver

Las infraestructuras destinadas al almacenamiento de agua en instalaciones industriales cumplen un rol esencial dentro de los métodos de seguridad y protección, especialmente cuando se encuentran asociadas a redes contra incendios. En entornos con actividad sísmica significativa, el desempeño de estas estructuras adquiere una relevancia aún mayor, ya que su funcionamiento continuo es determinante para mitigar riesgos secundarios derivados de un evento sísmico. No obstante, el comportamiento de los tanques metálicos sometidos a acciones sísmicas responde a un sistema complejo en el que interactúan de forma dinámica la estructura, el fluido almacenado, el suelo y el hormigón [5].

Durante la excitación sísmica, el movimiento del fluido genera respuestas dinámicas que modifican sustancialmente los estados de esfuerzos y desplazamientos en el tanque. La presencia de modos de vibración diferenciados, asociados al movimiento solidario de parte del fluido y al oleaje del volumen libre, introduce demandas adicionales que no pueden ser representadas adecuadamente mediante modelos simplificados. Estas demandas influyen tanto en la respuesta global del tanque como en la estabilidad de su sistema de apoyo.

A su vez, el comportamiento del suelo constituye un factor determinante en la respuesta del conjunto. Las características geotécnicas del terreno influyen en la transmisión de las aceleraciones sísmicas, en la capacidad de amortiguación del sistema y en la redistribución de presiones bajo la cimentación. Variaciones en la rigidez, resistencia o condiciones de saturación del suelo pueden alterar de forma significativa la respuesta estructural, generando deformaciones diferenciales o desplazamientos permanentes que afectan el desempeño del sistema.

En este escenario, la evaluación del comportamiento sísmico de tanques de almacenamiento requiere un enfoque que integre de manera coherente los distintos componentes del sistema. La ausencia de este enfoque puede traducirse en estimaciones poco representativas para un eficiente diseño de hormigón, con implicaciones directas en la seguridad estructural y la confiabilidad operativa según los códigos de diseño de concreto [6]. Por ello, resulta fundamental desarrollar análisis que permitan comprender y cuantificar la respuesta del sistema tanque–

fluido–suelo, aportando criterios técnicos que respalden decisiones de diseño más seguras y eficientes, acordes con las exigencias normativas y las condiciones reales de operación.

1.4 Justificación

De acuerdo con el International Building Code, las estructuras deben diseñarse considerando acciones sísmicas compatibles con el nivel de amenaza del sitio [7]. Así en la etapa de fabricación del tanque metálico de almacenamiento se analiza por su eficiencia estructural, versatilidad constructiva y adecuado desempeño frente a acciones sísmicas, especialmente en zonas de elevada amenaza sísmica. Es de gran importancia entender la respuesta sísmica debido que los tanques metálicos presentan una elevada relación resistencia–peso, lo que permite estructuras más livianas en comparación con tanques de hormigón, reduciendo las fuerzas sísmicas inducidas y facilitando su diseño sismorresistente como analiza Housner et al. (1997) [8].

Desde la perspectiva constructiva, los tanques metálicos ofrecen rapidez de fabricación e instalación, ya que sus elementos pueden prefabricarse y ensamblarse en obra mediante procesos de soldadura controlados, garantizando calidad y uniformidad en los espesores. Esta característica los convierte en una solución eficiente para proyectos que requieren tiempos de ejecución reducidos o ampliaciones futuras de capacidad.

Desde la perspectiva económica y de operación, los tanques metálicos permiten facilidad de inspección, reparación y reforzamiento, prolongando su vida útil mediante tratamientos de preparación superficial adecuado y aplicaciones de recubrimientos anticorrosivos. Esto representa una alternativa costo–efectiva a largo plazo.

1.5 Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento y la seguridad sísmica de un tanque metálico de almacenamiento de 700 m³, mediante su diseño y análisis estructural

considerando la interacción fluido - estructura, con el propósito de asegurar que la estructura cumpla los criterios de desempeño, estabilidad y servicio cuando es sometida a acciones sísmicas

1.5.2. Objetivos Específicos

- Definir las características geométricas y mecánicas del tanque metálico de 700 m³, mediante la identificación de su configuración geométrica, materiales, sistema de apoyo y condiciones de operación, con el fin de establecer un modelo representativo que permita un análisis sísmico confiable.
- Determinar las acciones actuantes sobre el tanque, a través del cálculo de cargas gravitacionales, hidrostáticas y sísmicas, conforme a la normativa vigente, para la evaluación de la demanda estructural que actúa sobre el sistema.
- Realizar el análisis sísmico del tanque metálico, empleando métodos de análisis estático equivalente que consideren la interacción fluido–estructura, con el propósito de caracterizar la respuesta sísmica del sistema tanque–fluido y evaluar su estabilidad global y local ante solicitaciones sísmicas, mediante las verificaciones de volcamiento y deslizamiento.

CAPÍTULO 2

2 Desarrollo del proyecto

2.1 Marco conceptual

Dentro del análisis de tanques, existen diferentes a considerar, por lo que varían en función de algunas características como se detalla en AWWA D100 [9].

1. Según el material de fabricación

a. Tanques de Acero

- i. Acero al carbono: muy usados para agua, combustibles, aceites y químicos no corrosivos
- ii. Acero inoxidable: ideales para alimentos, bebidas, fármacos y productos químicos corrosivos
- iii. Ventajas: elevada resistencia mecánica y durabilidad.
- iv. Desventajas: precio elevado y necesidad de protección anticorrosiva.

b. Tanques de hormigón

- i. Concreto: utilizados para agua potable, aguas residuales y tanques contra incendio.
- ii. Pueden ser enterrados o elevados.
- iii. Ventajas: larga vida útil y buena estabilidad térmica.
- iv. Desventajas: menor movilidad y mayor tiempo de construcción

2. Según la forma y el diseño

a. Tanques cilíndricos verticales

- i. Los más utilizados en industria y servicios
- ii. Facilitan la limpieza y el control del nivel

b. Tanques cilíndricos horizontales

- i. Comunes en combustibles y almacenamiento móvil.
- ii. Ideales cuando la altura es limitada.

c. Tanques rectangulares

- i. Frecuentes en plantas de tratamiento de agua residuales y procesos industriales
- 3. Según el tipo de techo
 - a. Tanque de techo fijo
 - i. Para líquidos no volátiles (agua, diésel, aceites).
 - ii. Bajo mantenimiento
 - b. Tanque de techo móvil
 - i. Reducen evaporación y emisiones
 - ii. Usados para combustibles y líquidos volátiles
- 4. Según su ubicación
 - a. Tanque elevado
 - i. Permiten suministro por gravedad
 - ii. Muy usados en sistemas de agua potable
 - b. Tanque apoyado en superficie
 - i. Más económicos y fáciles de mantener.
 - c. Tanque subterráneo
 - i. Para combustibles o agua en zonas con limitaciones de espacio.

En base a las características mencionadas, el tanque que se analizará para el proyecto, será el siguiente:

- a) Tipo de material: Acero al carbono
- b) Tipo de forma: cilíndrico vertical
- c) Tipo de techo: fijo
- d) Ubicación: apoyado sobre la superficie.

Estas características de selección, se basan a condiciones naturales del área donde se construirá el tanque de almacenamiento, debido que, por las cualidades del terreno, no puede escogerse un tanque subterráneo, ya que los costos serían muy elevados, debido a la metodología que se emplearía.

El líquido a ser almacenado será agua, y el uso que se empleara es para el suministro de la red del sistema contraincendios, requiriendo una capacidad de 700 m³.

2.2 Especificaciones técnicas de los materiales

Los materiales y sus características técnicas constituyen un aspecto fundamental dentro del diseño y la ejecución de obras de ingeniería, ya que permiten garantizar el adecuado desempeño estructural, la durabilidad y la seguridad de los elementos constructivos. La correcta selección y caracterización de los materiales asegura que las estructuras respondan de manera confiable frente a las acciones de servicio y, especialmente, ante sollicitaciones sísmicas, conforme a los criterios establecidos.

En el presente proyecto se emplean materiales ampliamente utilizados en obras estructurales, tales como el hormigón, el acero estructural y las varillas corrugadas de refuerzo, cuyas propiedades mecánicas y físicas influyen directamente en el comportamiento global del sistema.

En la siguiente apartado o sección se mencionan las características técnicas de los materiales que formaran parte del estudio.

2.2.1. Acero Estructural

El acero estructural constituye el material principal del tanque de almacenamiento, destacándose por su alta resistencia, ductilidad y capacidad de disipación de energía, características especialmente relevantes en zonas sísmicas.

Para el diseño de elementos en acero estructural, las propiedades más relevantes a considerar incluyen: el límite de fluencia, la resistencia última a tracción, resistencia, deformación, la ductilidad, la capacidad de elongación, la tenacidad, la soldabilidad, la dureza y la composición química del material, etc.

El acero estructural a emplearse es conforme a la especificación ASTM A36/A36M (ASTM International, 2020) [10], el cual presenta un comportamiento dúctil adecuado para aplicaciones estructurales. Según normativas API 650, el tipo de acero a emplearse por su excelente combinación de bajo costo, buena soldabilidad,

resistencia adecuada y ductilidad, permite fabricar recipientes versátiles y confiables para almacenar líquidos.

La composición química del Acero ASTM A36 se especifica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 – Composición química ASTM A36

| Elementos | Contenido |
|----------------|---------------|
| Carbono - C | 0.25 - 0.29 % |
| Cobre - Cu | 0.20% |
| Hierro - Fe | 98.00% |
| Manganeso - Mn | 1.03% |
| Fosforo - P | 0.04% |
| Silicio - Si | 0.28% |
| Azufre - S | 0.05% |

A continuación, se presenta las propiedades del acero al carbono tipo ASTM A36:

Tabla 2.2 – Propiedades ASTM A36

| Descripción | Simbolo | Unidad | Cantidad |
|--|----------|--------------------|-----------------------|
| Modulo de elasticidad | E | Gpa | 200 |
| Modulo de elasticidad al esfuerzo cortante | G | GPa | 79 |
| Relacion de poisson | v | - | 0.3 |
| Coefficiente de dilatacion termica | α | /°C | 11.7×10^{-6} |
| Densidad | ρ | kg/m ³ | 7850 |
| Esfuerzo de fluencia minimo garantizado | Fy | kg/cm ² | 2531 |
| Esfuerzo minimo de ruptura en tension | Fu | kg/cm ² | 4077 |

2.2.2. Hormigón

El hormigón se utiliza principalmente en elementos de cimentación y soporte, debido a su elevada resistencia a la compresión. Los elementos de hormigón armado se diseñan conforme a los requisitos establecidos por el ACI 318 [11]

El hormigón que se considera para la losa maciza que soportara la carga del tanque de agua, debe de tener una alta resistencia a la compresión, por lo cual se considera que el hormigón con una resistencia de 280 kg/cm² (28 MPa) cumple con las características para el análisis de carga. Este tipo de hormigón debe de ofrecer buena durabilidad, uniformidad y facilidad de colocación, y tener características como permeabilidad controlada y una consistencia que permita bombear la mezcla desde la parte inicial hasta la final; para lograrlo se debe de

analizar los agregados que sean limpios y considerar cantidades adecuadas para mantener la composición del hormigón.

Las materias primas para la elaboración del hormigón son los siguientes:

Agregados (finos o gruesos), cemento (usualmente es Pórtland), agua de calidad adecuada (limpia) y cuando el proyecto lo requiere, uso de aditivos químicos.

Importante es tener considerado que el hormigón a aplicarse será visto, por el cual debe de tener un curado homogéneo y controlado donde el personal debe de centrarse en mantener la humedad y la temperatura para que el hormigón desarrolle su máxima resistencia y evitar fisuras, adicional para complementar atributos de beneficios, se deberá cubrir la losa con cubiertas plásticas, y arena mojada, con el objetivo de retener la humedad en la zona, hasta su nuevo riego de agua.

El curado es de suma importancia para que el hormigón en el tiempo previsto que son 28 días, llegue a la resistencia de diseño, ya que la falta de curado adecuado reduce drásticamente su resistencia y se observarían grietas superficiales o profundas que perjudican drásticamente a la trabajabilidad del hormigón.

Resistencia nominal a la compresión a los 28 días: $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ para la losa de cimentación.

2.2.3. Acero de refuerzo

Los lingotes de acero laminadas en caliente con corrugaciones para asegurar una alta adherencia al hormigón, las formulaciones de las materias primas son minerales que forman barras laminadas microaleadas, el cual genera una buena ductilidad y con ello permite absorber energía.

Dentro de las características indispensables que posee las varillas corrugadas son las siguientes:

- La superficie presenta corrugaciones transversales, los cuales permite aumentar la adherencia con el concreto.
- La ductilidad, debido que permite doblarse y deformarse sin fracturarse, crucial para zonas sísmicas y para la construcción de estribos a las medidas necesarias.
- La resistencia a la tensión, definida por su grado.



Figura 2.1 – Varillas corrugadas listas para su uso

Las varillas corrugadas empleadas como refuerzo del hormigón deben de cumplir con valores mínimos de resistencia y ductilidad según la especificación ASTM A615 [12] como se presenta en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 – propiedades y características de la varilla corrugada

| | | PROPIEDADES | UNIDADES | VALOR | |
|--|---|---|---|----------------------------|------------|
| PROPIEDADES MECÁNICAS | TRACCIÓN | Limite de Fluencia (Fy) | Min | MPa (kgf/cm ²) | 420 (4200) |
| | | | Max | MPa (kgf/cm ²) | 540 (5400) |
| | | Resistencia a la Tracción (Fu) | Min | MPa (kgf/cm ²) | 550 (5500) |
| | | Alargamiento mínimo en L _a =200 mm | d ≤ 20 | % | 14 |
| | | | 22 ≤ d ≤ 36 | | 12 |
| d > 40 | 10 | | | | |
| (F _u ' / F _y ' ≥ 1.25) | | La resistencia a la tracción real debe ser igual o mayor a 1,25 veces el límite de fluencia real registrado en el ensayo de la probeta. | | | |
| SOLDABILIDAD | De acuerdo a AWS D1.4. (mediante restricciones de composición química): C.E. ≤ 0,55% CARBONO EQUIVALENTE: C.E. = C + %Mn/6 + %Cu/40 + %Ni/20 + %Cr/10 - %Mo/50 - %V/10 | | | | |
| ETIQUETADO | ETIQUETADO | <ul style="list-style-type: none"> Fabricante Grado del acero (42) Varilla Microaleada laminada en caliente Identificación del lote | <ul style="list-style-type: none"> Diámetro nominal de varilla Longitud nominal de varilla Cantidad o masa (kilogramos) Norma NTE INEN 2167 | | |
| | MARCADO | <ul style="list-style-type: none"> Fabricante Diámetro nominal | <ul style="list-style-type: none"> Letras AS (Acero soldable) Letras MA (Microaleada) | | |

En concordancia de los criterios de diseño aplicados, se emplearán varillas corrugadas de acero de refuerzo en los diámetros que se determinen mediante el análisis estructural, con el objetivo de trabajar conjuntamente con el hormigón y resistir adecuadamente las acciones y solicitaciones actuantes, garantizando el correcto comportamiento estructural y el funcionamiento seguro del tanque de almacenamiento.

El acero de refuerzo empleado en el diseño son varillas corrugadas ASTM-A 615 con los siguientes datos técnicos relevantes, mostrados en la tabla 2.4

Tabla 2.4 – Datos técnicos de varillas corrugadas

| Descripcion | Simbolo | Unidad | Cantidad |
|-----------------------|---------|--------|----------|
| Limite de fluencia | Fyr | kg/cm2 | 4200 |
| Modulo de elasticidad | Esr | kg/cm2 | 2100000 |

2.3. Implantación general del proyecto

El proyecto donde se desarrollará, tiene un suelo donde predominan los suelos aluviales (llanura aluvial), ricos en sedimentos como lodos, limos, arcillas y arenas, lo que los hace muy fértiles y aptos para cultivos como el arroz, aunque su textura arcillosa puede limitar el drenaje. Geológicamente la zona tiene suelos formados sobre materiales sedimentarios recientes y antiguos (rocas volcánicas, lutitas, calizas), incluyendo Entisoles (jóvenes) y suelos con influencia volcánica, característicos de la costa del Ecuador.

Características Principales:

- **Llanura Aluvial:** La zona plana está compuesta por suelos depositados por ríos, que son fértiles y aptos para la agricultura.
- **Textura Variable:** Puede haber suelos con textura arenosa, arcillosa (barros) o limosa, según el depósito de sedimentos.
- **Suelos Aluviales Fluviales:** Son comunes en la costa, con buena fertilidad, pero pueden ser arenosos, arcillosos (ideales para arroz) o hidromórficos (exceso de agua).
- **Influencia Volcánica:** Aunque se está en la costa, la geología subyacente incluye rocas volcánicas antiguas, que influyen en la composición del suelo.

Tipos de Suelos según Clasificación USDA:

En el Ecuador continental y en zonas cercanas, se encuentran clasificaciones más detalladas, que probablemente se apliquen en sus diferentes sectores:

- **Entisoles:** Suelos jóvenes sin desarrollo de horizontes, típicos de zonas aluviales y valles.
- **Inceptisoles:** Con desarrollo incipiente de horizontes.
- **Alfisolos:** Suelos con horizonte arcilloso, generalmente fértiles.

- **Vertisoles:** Suelos arcillosos que se expanden y contraen con la humedad.
- **Andisoles:** Suelos derivados de depósitos volcánicos (no tan dominantes en la zona costera inmediata, pero presentes en la región).

En resumen, los suelos de Durán son principalmente aluviales, variando en textura (arcillosos, limosos) por su formación fluvial, y se integran en clasificaciones como los Entisoles debido a su juventud y depósitos sedimentarios

Para la preparación del análisis del tanque es de gran relevancia ya que las mediciones y controles se basan a su ubicación y composición de la mezcla del terreno.

2.4. Dimensiones del tanque de almacenamiento y cimentación

Para satisfacer el volumen de agua que requiere el sistema contra incendios, se establecen las medidas denotadas en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 – Dimensiones volumétrica del tanque y cimentación

| Descripcion | Unidad | Cantidad |
|-----------------------------|--------|----------|
| Diametro de tanque metalico | m | 13.20 |
| Diametro de la cimentacion | m | 16.00 |
| Altura de tanque metalico | m | 5.20 |

Con las dimensiones detalladas, se cubre la capacidad de 700 m³ requeridas para el correcto funcionamiento y abastecimiento del sistema.

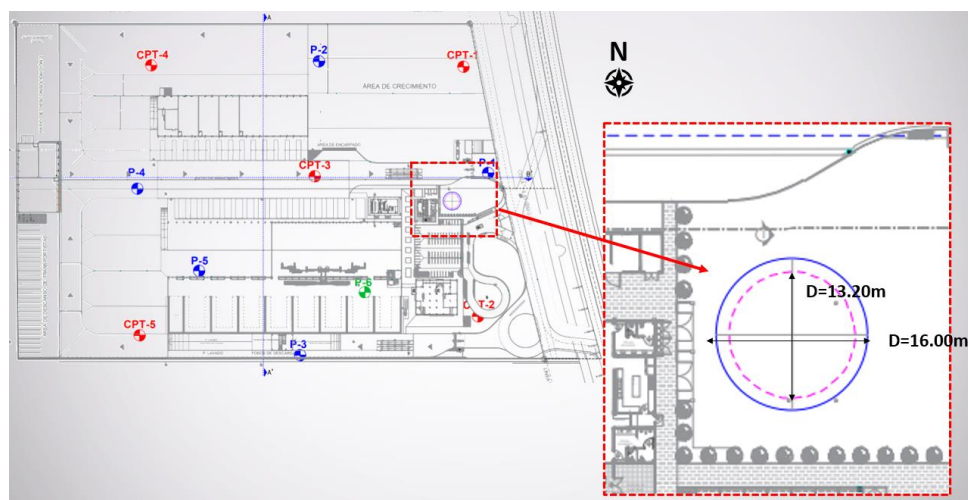


Figura 2.2 – ubicación del tanque de almacenamiento

proceso y asegurar el comportamiento deseado del suelo antes de la construcción final, como la figura 3.2 que muestra niveles de capas y columna de materiales.

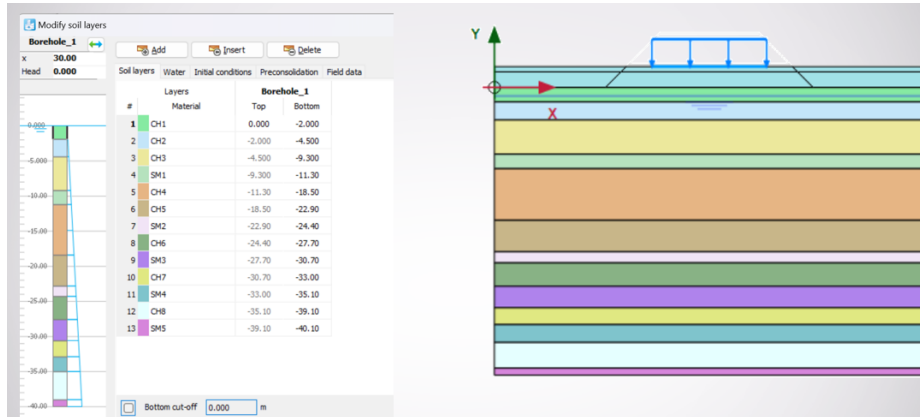


Figura 3.2 – Gráfico de capas en PLAXIS 2D

Se analizan los esfuerzos en cada etapa del proceso como son:

- Etapa inicial
- Colocación de relleno para sobrecargas
- Retiro de sobrecargas
- Aplicación de cargas del proyecto
- Final de la consolidación

A continuación, se muestran las imágenes de la revisión mediante aplicación del software, en las diferentes etapas mencionadas.

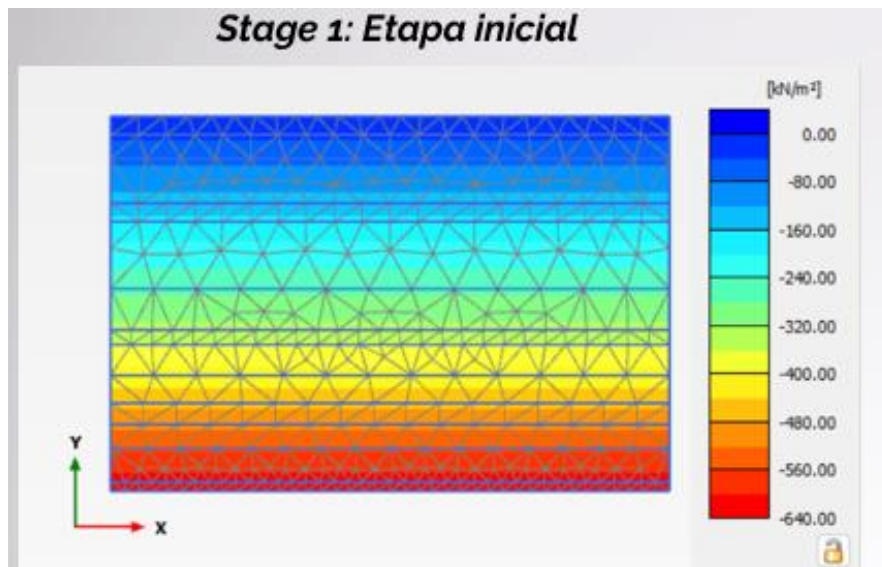


Figura 3.3 – Análisis en etapa inicial

La caracterización del suelo de relleno se realizó en base al ensayo de compactación de Proctor Modificado acorde a la norma ASTM D1557 [15]. Así mismo los límites de Atterberg del suelo se determinaron mediante ensayos de laboratorio acorde a la norma ASTM D4318 [16]

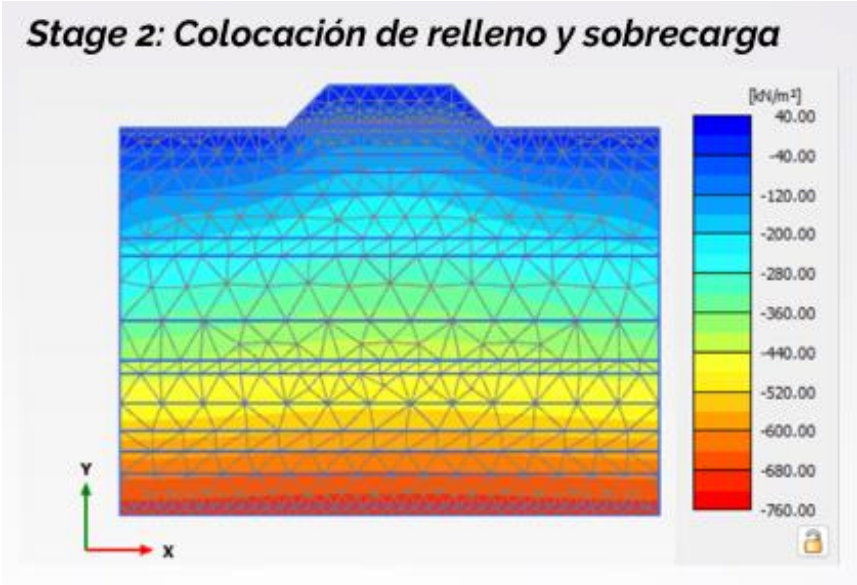


Figura 3.4 – análisis con colocación de relleno

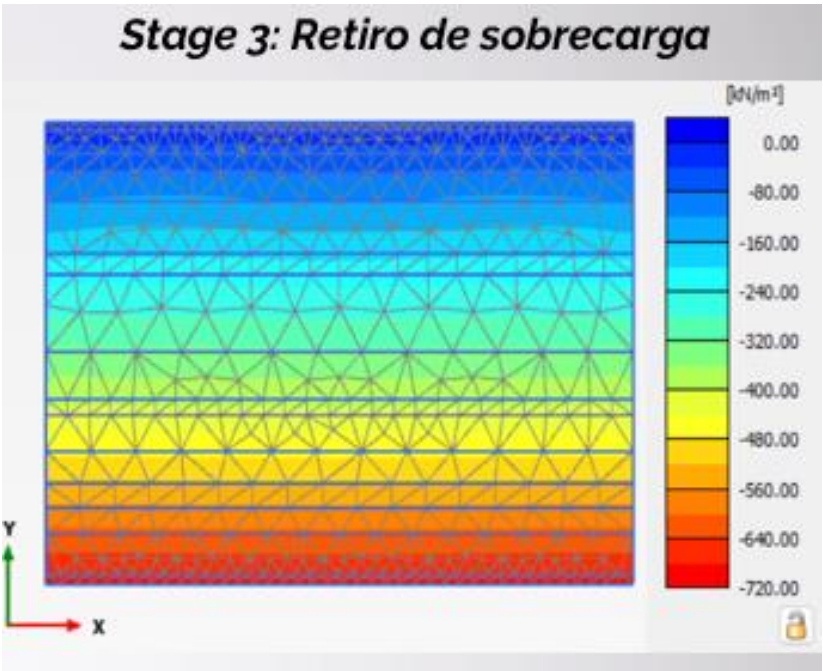


Figura 3.5 – Análisis de retiro de sobrecarga

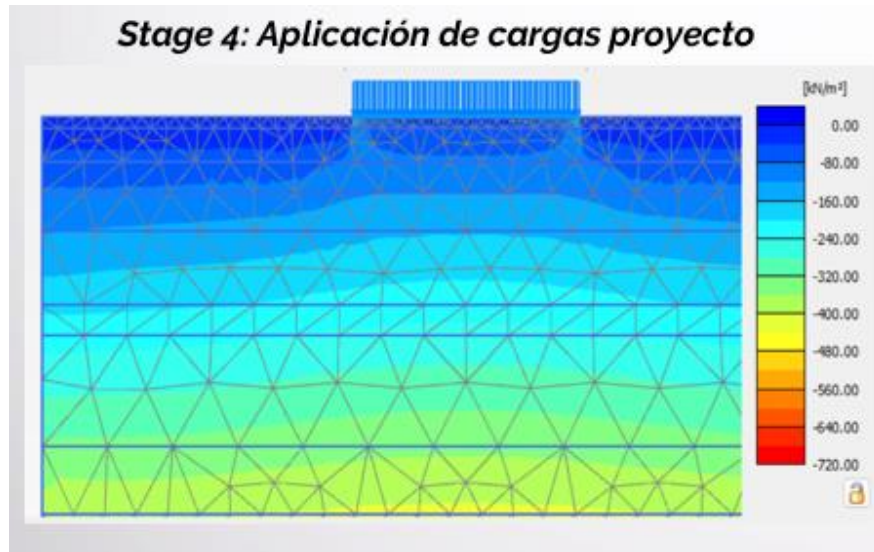


Figura 3.6 – Análisis de aplicación de cargas

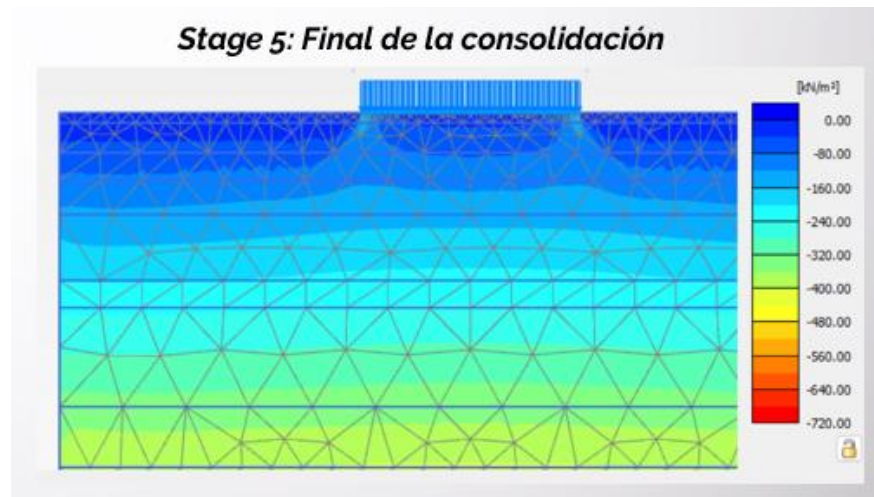


Figura 3.7 – Análisis final de consolidación

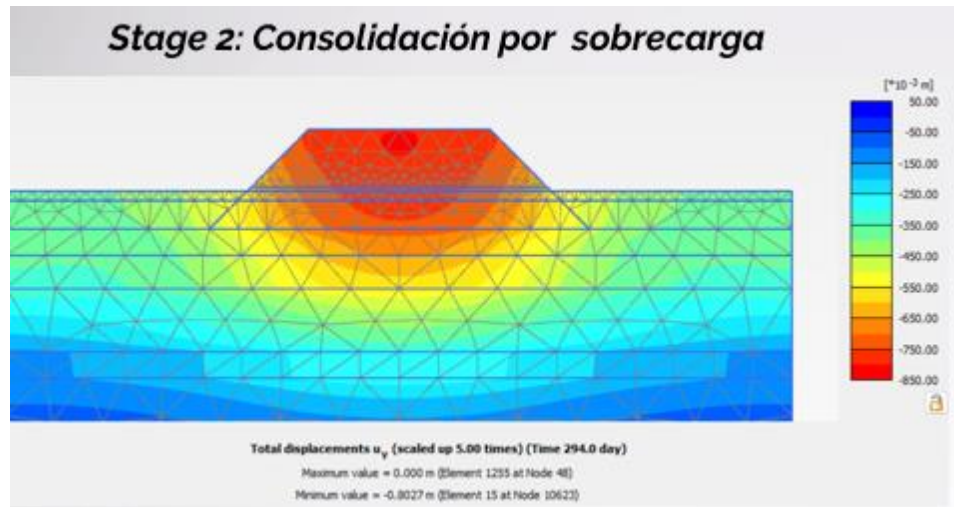


Figura 3.8 – Análisis de consolidación por sobrecarga

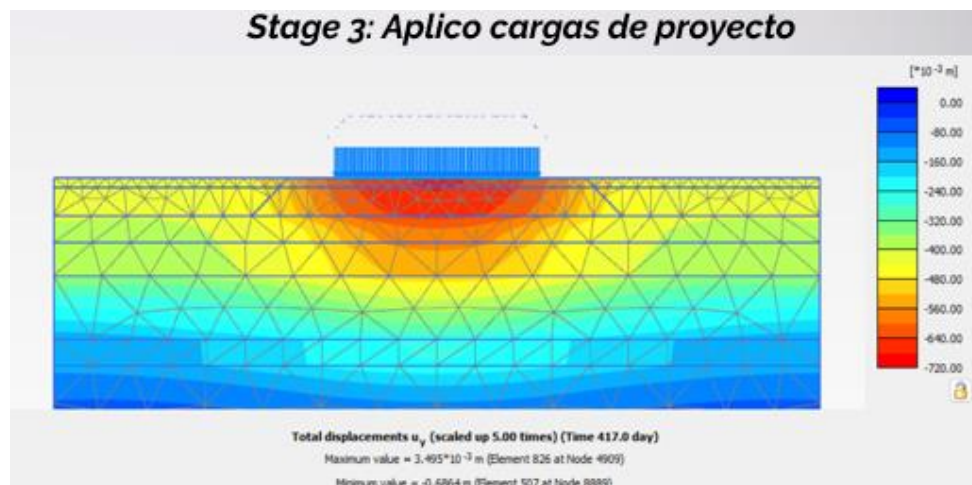


Figura 3.9 – Análisis de aplicación de cargas

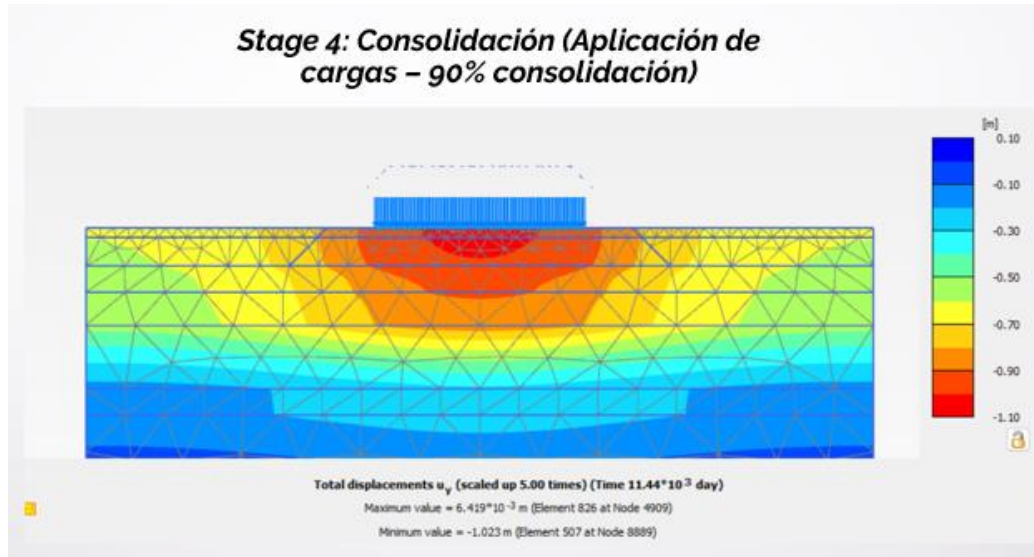


Figura 3.10 – Análisis por consolidación al 90%

En el siguiente grafico 3.11 se pueden analizar los valores de asentamientos, analizando la losa maciza de 40 cm.

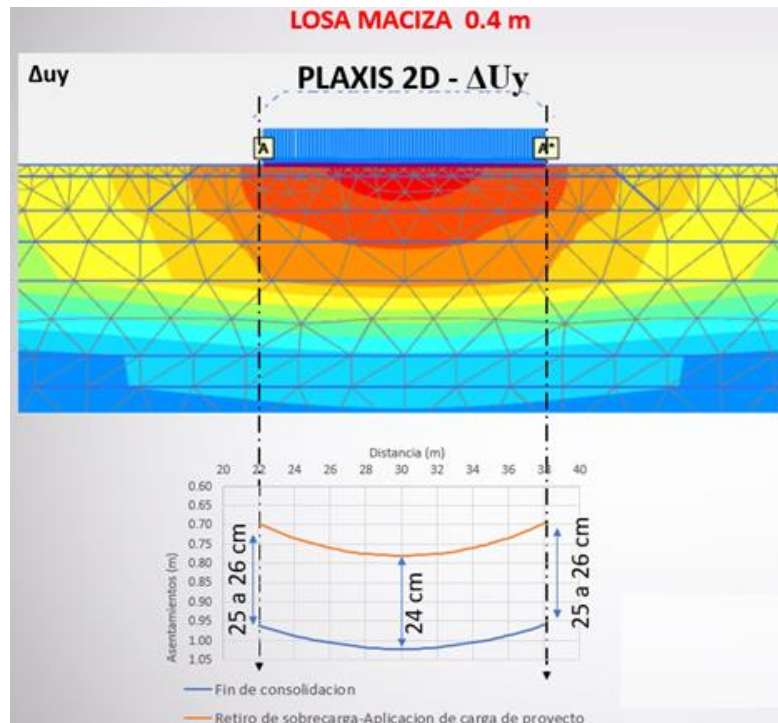


Figura 3.11 – Análisis de asentamientos para losa de 40 cm

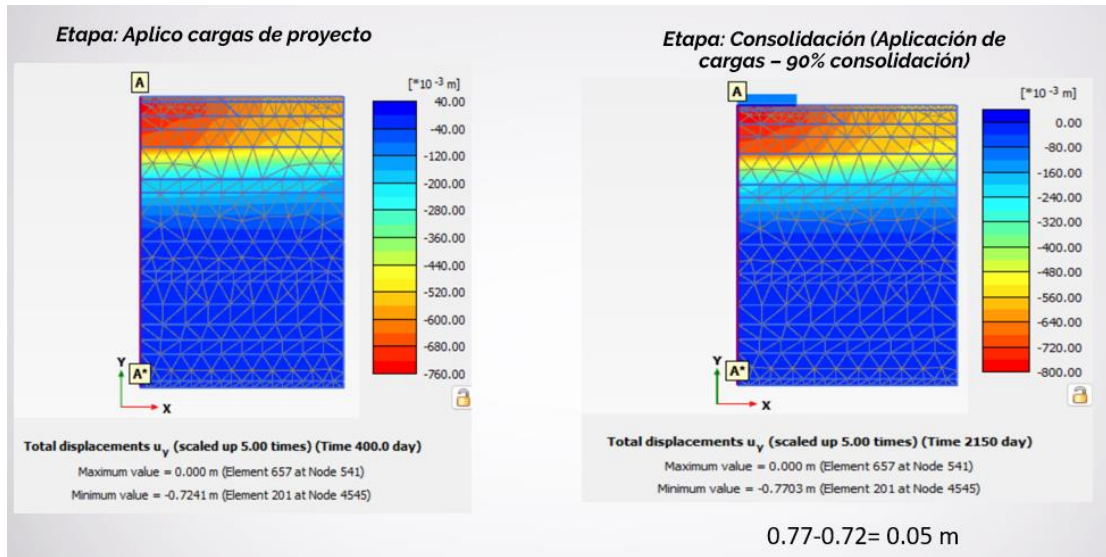


Figura 3.12 – Grafico de desplazamientos

Mediante la figura 3.12, se muestra los desplazamientos totales, desde el momento que se aplica la carga, hasta cuando se genera la consolidación con un 90% de compactación.

Para poder analizar los asentamientos por cargas estáticas, se emplea el cálculo de los asentamientos mediante análisis de software, el cual es Settle 3D.

Settle 3D es una herramienta computacional orientada al análisis tridimensional de asentamientos en cimentaciones superficiales, que permite evaluar tanto los asentamientos elásticos como los asociados a la consolidación primaria del suelo. Asimismo, el programa incorpora módulos para la estimación del potencial de licuación a partir de información obtenida mediante ensayos CPT o mediciones de la velocidad de propagación de ondas de corte, además de calcular los asentamientos inducidos por este fenómeno en condiciones de campo libre.

A continuación, se muestra el grafico de asentamientos y esfuerzos en función al tiempo detallados en la Figura 3.13

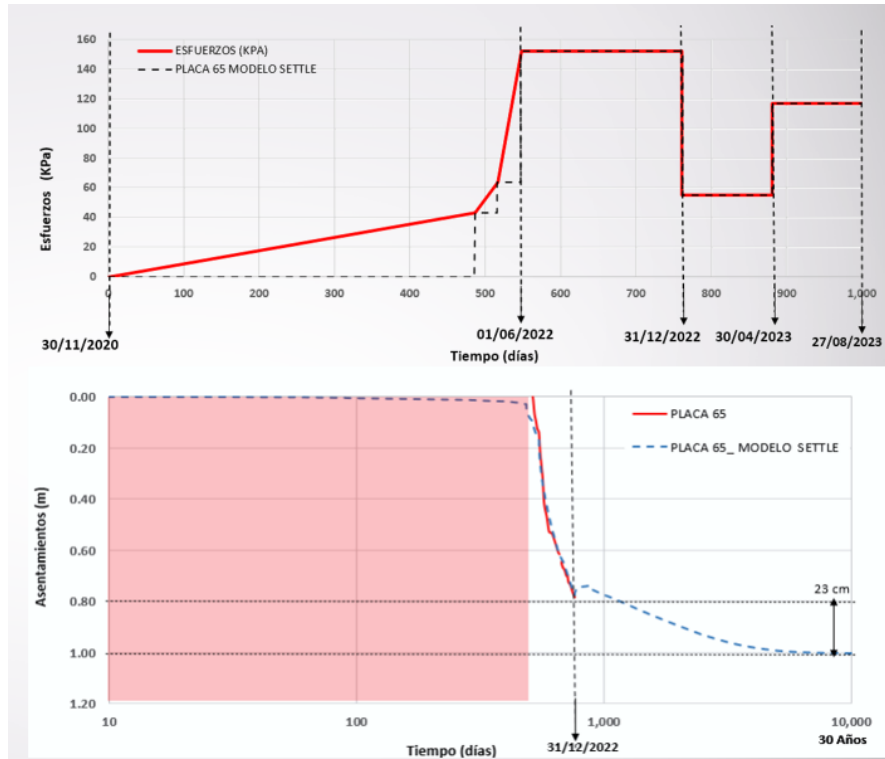


Figura 3.13 – asentamientos vs esfuerzos

Mediante el análisis del software 3D, se muestran la Figura 3.14 con los asentamientos totales en el momento que se debe de retirar la carga.

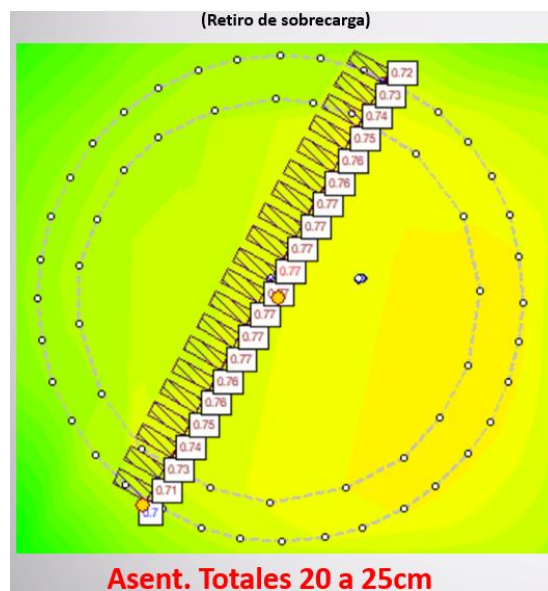


Figura 3.14 – asentamientos en el retiro de sobrecarga

Mediante el análisis del software 3D, se muestran la Figura 3.15 con los asentamientos totales proyectados en un tiempo de 30 años, cuando se ha finalizado la consolidación de la carga.

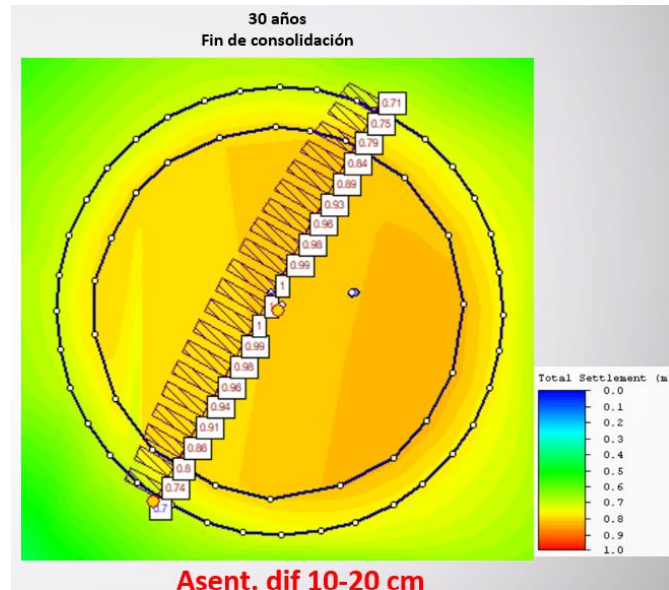


Figura 3.15 – asentamientos proyectados

3.2 Análisis Estructural – losa maciza

Con los datos del suelo, se procede con el diseño de la cimentación donde se basará en la estimación de los asentamientos transmitidos por el tanque. Para el cálculo se considera las propiedades mecánicas del suelo, conforme a los lineamientos presentados por Bowles (1996) [17].

Cargas consideradas sobre la losa de cimentación

- Carga de líquido almacenado: 3.49 tonf/m².
- Carga por peso propio de tanque: 0.153 tonf/m².
- Carga por peso propio de techo: 0.046 tonf/m².

Dimensiones de losa

- Diámetro: 16 m.
- Espesor: 40 cm y 70 cm

Materiales:

- Hormigón $f'c = 280 \text{ kgf/cm}^2$.
- Acero $f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$.

Presión en la parte inferior de losa de cimentación

$q = \text{Cargas sobre la losa de cimentación} + \text{Peso propio de Losa} - \text{Suelo Excavado}$

Losa maciza $e = 40\text{cm}$

Cargas sobre la losa:

$$3.49 \text{ tonf/m}^2 + 0.153 \text{ tonf/m}^2 + 0.046 \text{ tonf/m}^2 = 3.69 \text{ tonf/m}^2$$

Peso propio de Losa:

$$0.40 \text{ m} \cdot 2.40 \text{ tonf/m}^3 = 0.96 \text{ tonf/m}^2$$

Suelo Excavado

$$0.10 \text{ m} \cdot 1.9 \text{ tonf/m}^3 = 0.19 \text{ tonf/m}^2$$

$$\mathbf{q = 4.46 \text{ tonf/m}^2}$$

Losa maciza $e = 70\text{cm}$

Cargas sobre la losa:

$$3.49 \text{ tonf/m}^2 + 0.153 \text{ tonf/m}^2 + 0.046 \text{ tonf/m}^2 = 3.69 \text{ tonf/m}^2$$

Peso propio de Losa:

$$0.70 \text{ m} \cdot 2.40 \text{ tonf/m}^3 = 1.68 \text{ tonf/m}^2$$

Suelo Excavado

$$0.40 \text{ m} \cdot 1.9 \text{ tonf/m}^3 = 0.76 \text{ tonf/m}^2$$

$$\mathbf{q = 4.61 \text{ tonf/m}^2}$$

Se ingresa la reacción del suelo actuando sobre la losa de cimentación, en el modelo realizado usando SAFE Ver Figura (b).

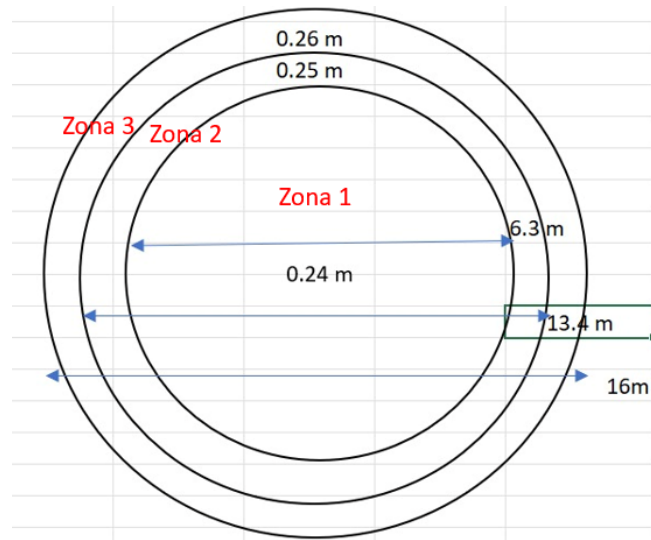


Figura 3.16 - Asentamientos obtenidos de PLAXIS 2D.

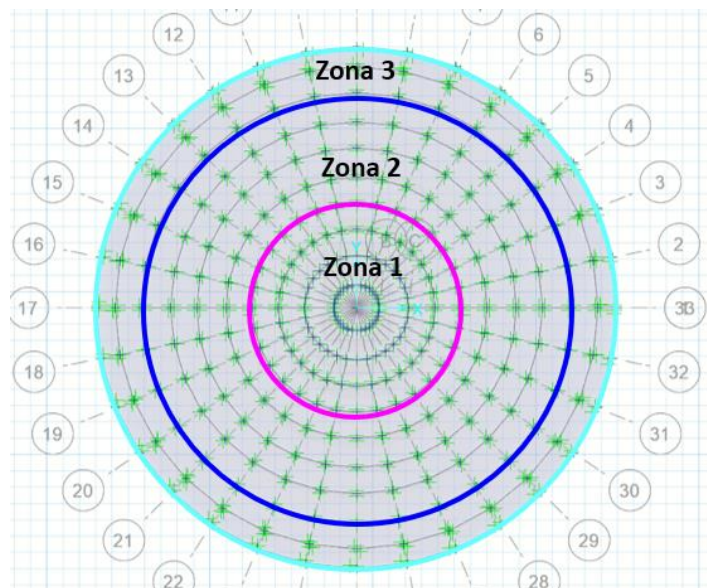


Figura 3.17 - Reacción del suelo actuando sobre losa de cimentación en SAFE

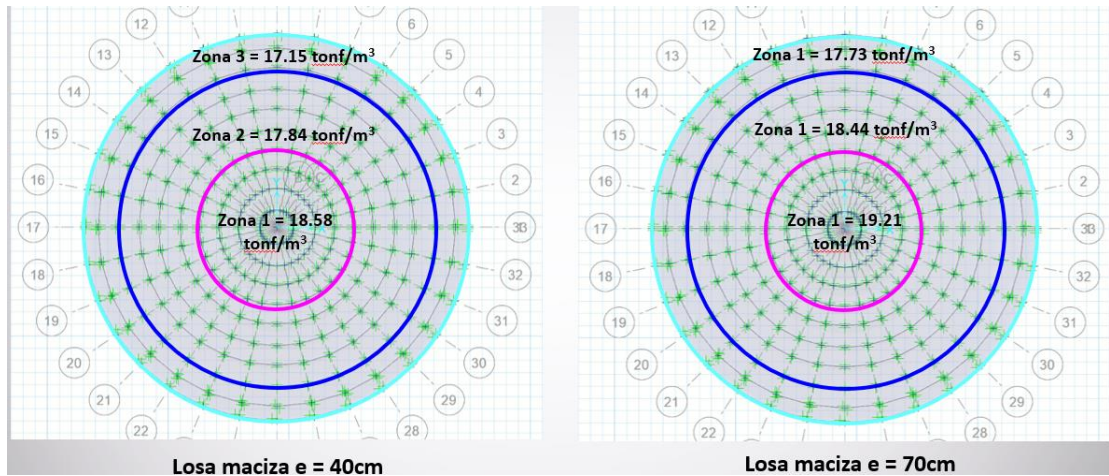


Figura 3.18 – valores K en ambas losas macizas

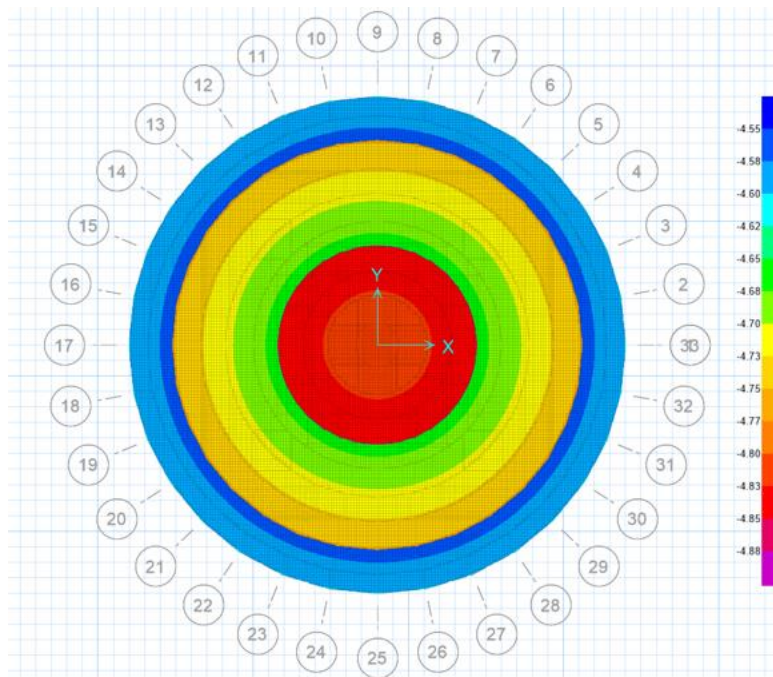


Figura 3.19 – Esfuerzos del suelo en losa de cimentación, bajo cargas de servicio. Unidades tonf/m² para losa de 40 cm

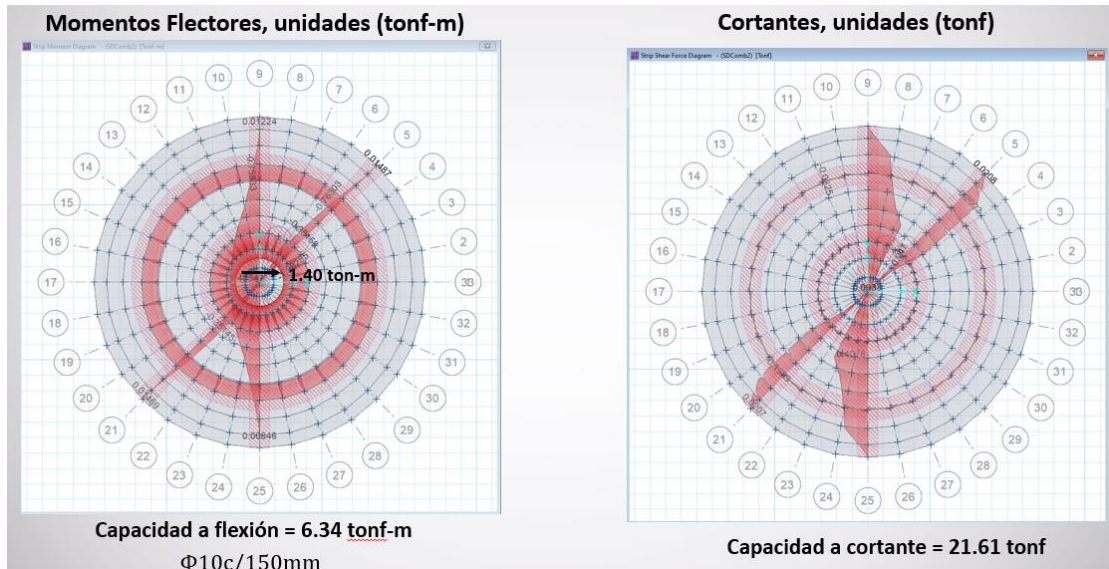


Figura 3.20 – Momento flector y cortante para losa de 40 cm

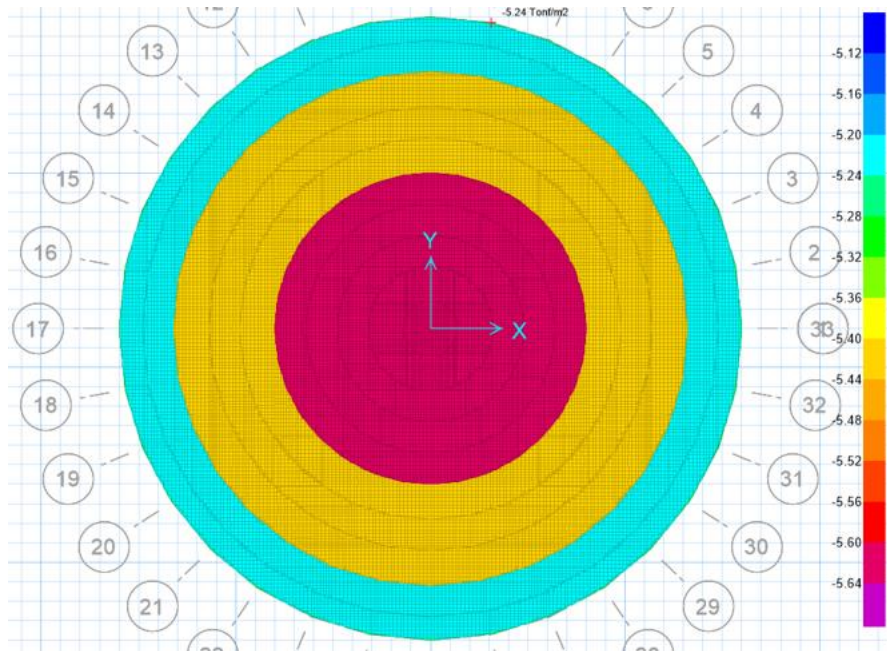


Figura 3.21 – Esfuerzos del suelo en losa de cimentación, bajo cargas de servicio. Unidades tonf/m² para losa de 70 cm

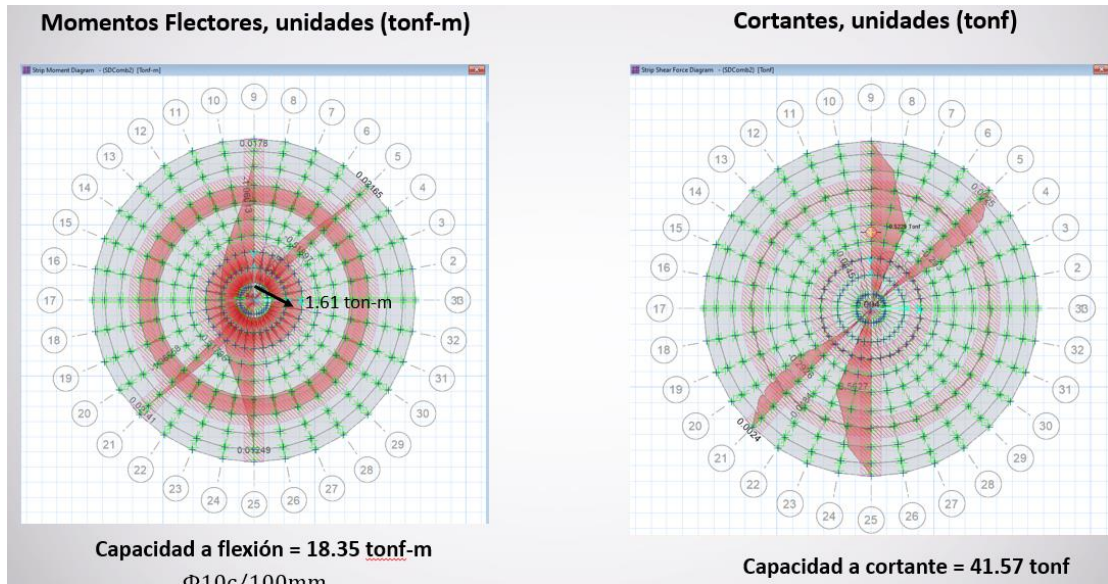


Figura 3.22 – Momento flector y cortante para losa de 70 cm

La reacción de suelo se calcula a partir de los asentamientos obtenidos por el análisis geotécnico como se presenta en la Figura 3.16

A partir de los resultados que se obtuvieron y conservando un factor de seguridad, se define que se diseñará con un espesor de losa maciza de 70 cm utilizando un hormigón con resistencia a la compresión de 280 kg/cm².

Para garantizar que se cumpla con los parámetros de diseño del hormigón se realizaría ensayos sobre cilindros normalizados cumpliendo los protocolos establecidos en la norma ASTM C39 [18].

El moldeo y curado de los especímenes de hormigón se realizaría acorde a los protocolos establecidos en la norma ASTM C31 [19].

Se esperan asentamientos totales en el orden de 5 a 20 cm de acuerdo, a los resultados obtenidos con los softwares usados (SETTLE 3D Y PLAXIS 2D).

El modelo de Plaxis 2D Axisymmetrico modela la simetría de la cimentación en relación a un eje que pasa por el centro de la losa circular, por lo que es más apropiado al representar una losa circular.

De acuerdo al análisis realizado en Plaxis 2D, que modela la rigidez de la losa de una manera más realista, se esperan asentamientos diferenciales del orden de 1 a 2 cm, rango que está dentro del límite permisible en la norma

3.3 Diseño de Tanque Metálico.

El cuerpo cilíndrico del tanque está conformado por virolas de acero al carbono ASTM A-36, conformadas a partir de planchas laminadas roladas en taller, Las uniones soldadas del tanque metálico se diseñan conforme a los requisitos establecidos por el código AWS D1.1 [20]. Las virolas fueron dimensionadas conforme al diámetro de diseño del tanque (13.20 m) y a la altura total de almacenamiento (5.20 m), garantizando la resistencia al empuje hidrostático generado por un volumen de 700 m³ de agua.

Mediante aplicación del software de elementos finitos se desarrolla un análisis para determinar cargas, donde la Tabla 3.1 presenta la información de entrada.

Tabla 3.1 – espesores de paredes del tanque

| Descripcion | Unidad | Cantidad |
|-----------------------------|----------------------|----------|
| Factor combinado de presion | 0.40 | |
| Diseno Estandar | API 650 13th Edition | |
| Apendice usado | E | |
| Techo | mm | 5 |
| Caparazon - cuerpo (1) | mm | 6.4 |
| Caparazon - cuerpo (2) | mm | 5 |
| Caparazon - cuerpo (3) | mm | 5 |
| Caparazon - cuerpo (4) | mm | 5 |
| Fondo | mm | 8 |

TECHO CONICO

Material de placas = A283M-C o ASTM A36

Tipo de acero - material = A36M

Espesor requerido $t = 5$ mm

Espesor actual $t = 5$ mm

Margen de corrosión del techo = 0 mm

Eficiencias de la junta del techo = 1

Peso de superposición de Placas = 982.5 N

VIGAS

Los valores numéricos se presentan en la tabla No.7

Tabla 3.2 – datos de las vigas

| Cantidad | At Radio (m) | Tamano | Longitud (m) | Carga (W/m) | Peso (N) | Peso Total (N) |
|----------|--------------|---------|--------------|-------------|----------|----------------|
| 8 | 6.00 | UPN 160 | 5.2 | 184.3 | 1063.1 | 19136.2 |

COLUMNA

Los valores numéricos se presentan en la tabla No.8

Tabla 3.3 – datos de la columna

| Cantidad | At Radio (m) | Tamano | Longitud (m) | Carga (W/m) | Peso (N) | Peso Total (N) |
|----------|--------------|---------------|--------------|-------------|----------|----------------|
| 1 | 0.00 | TUBO 10" CED. | 7.3 | 591.3 | 4374.9 | 4374.9 |

FONDO PLANO NO ANULAR

Tipo de acero – material inferior = A36M

Espesor requerido $t = 7.6$ mm

Espesor actual $t = 8$ mm

Margen de corrosion del fondo = 1.6 mm

Eficiencias de la junta del fondo = 1

Peso Total del fondo = 70,891.5 N

INFORMACION SEGÚN NORMATIVA API 650

Radio interior del cuerpo

$$R_c = ID / 2 = 13001.35 / 2 = 6500.675 \text{ mm}$$

$$\text{Diametro nominal de la carcasa (D)} = 13.0064 \text{ m}$$

Longitud normal del techo

$$R_2 = R_c / \text{Seno}(\text{Theta angulo}) = 6000.675 / \text{Seno}(3.5763) = 96198.1383 \text{ mm}$$

Espesor de la plancha del techo

$$\text{Espesor de placa de techo } t_h = t_h - CA_{\text{roof}} = 5 - 0 = 5 \text{ mm}$$

Espesor de la placa corroida (simulacion)

Espesor de placa corroida $t_c = t_c - CA_shell = 5 - 1.59 = 3.41 \text{ mm}$

Ancho maximo de techo API-650

Ancho = $\text{MIN}((0.3 * \text{SQRT}((R2 * t_{h_corroded}))), 300)$
= $\text{MIN}((0.3 * \text{SQRT}((96198.1383 * 5))), 300) = 208.0605 \text{ mm}$

Ancho maximo del cuerpo API-650

Ancho cuerpo = $0.6 * \text{SQRT}((R_c * t_{c_corroded})) = 0.6 * \text{SQRT}((6000.675 * 3.41)) = 85.8279 \text{ mm}$

Peso nominal de placas del cuerpo

DLS = $W_s + W_framing = 113656.2292 + 11669.2297 = 125325.4589 \text{ N}$

Peso nominal del techo y estructuras complementarias

DLR = $W_r + W_structural = 43864.9079 + 1308.0419 = 45172.9498 \text{ N}$

RESUMEN DE RESULTADOS DEL TANQUE METALICO

Tabla 3.4 – resultados de tanque metálico

| Shell # | Width (mm) | Material | CA (mm) | J E | Min Yield Strength (MPa) | Tensile Strength (MPa) | Sd (MPa) | St (MPa) | Weight (N) | Weight CA (N) | t-min Erectio n (mm) | t-Des (mm) | t-Test (mm) | t-min Seismi c (mm) | t-min Ext-Pe (mm) | t-min (mm) | t-Actu al (mm) | Statu s |
|---------|------------|-----------|---------|-----|--------------------------|------------------------|----------|----------|------------|---------------|----------------------|------------|-------------|---------------------|-------------------|------------|----------------|---------|
| 1 | 2420 | A516M-485 | 1.6 | 1 | 260 | 485 | 173 | 195 | 44,526 | 33,382 | 6 | 3.9 | 2.1 | 3 | NA | 6 | 6.4 | OK |
| 2 | 2420 | A516M-485 | 1.6 | 1 | 260 | 485 | 173 | 195 | 35,064 | 23,917 | 5 | 3.1 | 1.4 | 2.4 | NA | 5 | 5 | OK |
| 3 | 1480 | A283M-C | 1.6 | 1 | 205 | 380 | 137 | 154 | 21,444 | 14,627 | 5 | 2.5 | 0.8 | 2.1 | NA | 5 | 5 | OK |
| 4 | 871 | A283M-C | 1.6 | 1 | 205 | 380 | 137 | 154 | 12,620 | 8,608 | 5 | 1.8 | 0.2 | 1.7 | NA | 5 | 5 | OK |

Capacidad maxima: 714 m³

Capacidad de operacion : 700 m³

Capacidad minima : 22 m³

A continuación, se muestra la Figura 3.23 del tanque metálico, donde se puede observar los anillos que se han considerado para la fabricación y construcción del tanque de almacenamiento. La escalera que se determinara para subir es una escalera tipo caracol, con el objetivo de tener mayor comodidad para los mantenimientos que requieren.

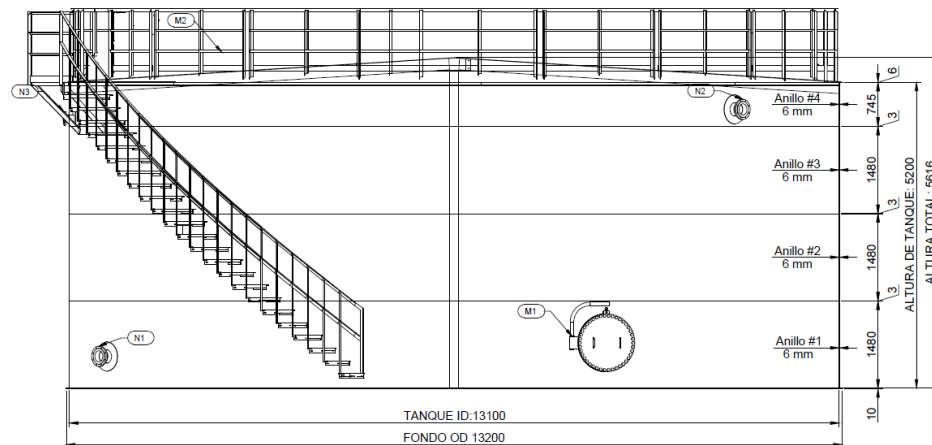


Figura 3.23 – Plano de tanque de agua de SCI.

Las estructuras de la cimentación y metálicas con las cualidades del comportamiento se han llegado a un diseño establecido en las fuerzas y deformaciones que se obtienen de un análisis linealmente elástico.

Ante eventos sísmicos, la estructura responde conforme a la resistencia adecuada, sin excesivos desplazamientos ni vibraciones de acuerdo con las normativas que los rigen.

El diseño de los elementos fue realizado en forma computacional, analizando los límites de los elementos más críticos que no sean excedidos, por lo que se revisó completamente con el uso de los programas.

Se ha analizado las bridas, escotillas y refuerzos locales donde se observa que no hay concentración de esfuerzos críticos.

En base a los cálculos y verificaciones, se determina que el diseño es aceptable en términos estructurales, hidrostáticos, de cimentación y de resistencia de material para el servicio previsto (tanque de agua para red de sistema contra incendios).

El tanque es apto para fabricación y puesta en servicio, sujeto a: verificación final por norma aplicable API 650, cumplimiento del plan de control de calidad y aprobación del estudio geotécnico y cargas ambientales locales

3.4 Diseño de Acero Figurado para losa maciza

La losa maciza que se determina es de un espesor de 70 cm según valores obtenidos, donde el comportamiento a la resistencia a la compresión es buena.

El diseño del acero figurado para la losa maciza implica calcular el refuerzo necesario, usando las fórmulas de calculo que consideran la luz, espesor y cargas para determinar diámetros y espaciamentos, resultando en parrillas de acero. Estos cálculos determinan para la parrilla superior e inferior, con sus momentos positivos y negativos, asegurando el recubrimiento y continuidad para un comportamiento monolítico y eficiente contra flexión y sismo. En la figura 3.24 se detalla la vista en planta.

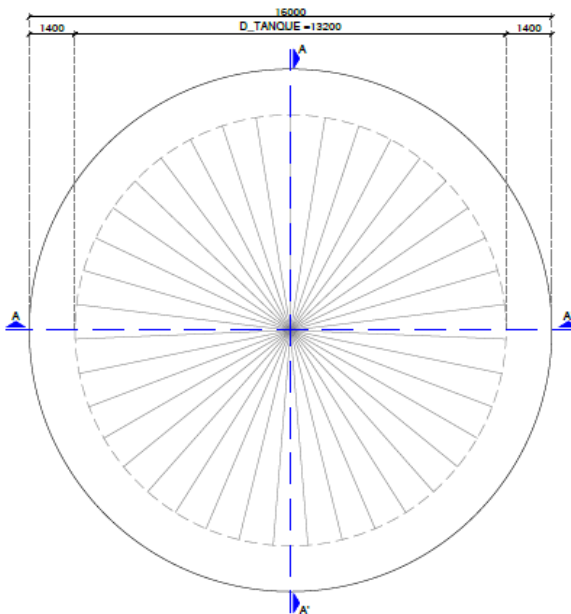


Figura 3.24 – Vista en planta de cimentación y tanque

A continuación, se muestra la Figura 3.25 donde se detallan las varillas corrugadas de manera transversal, donde se observan traslapes, y posicionamientos de varillas superiores e inferiores.

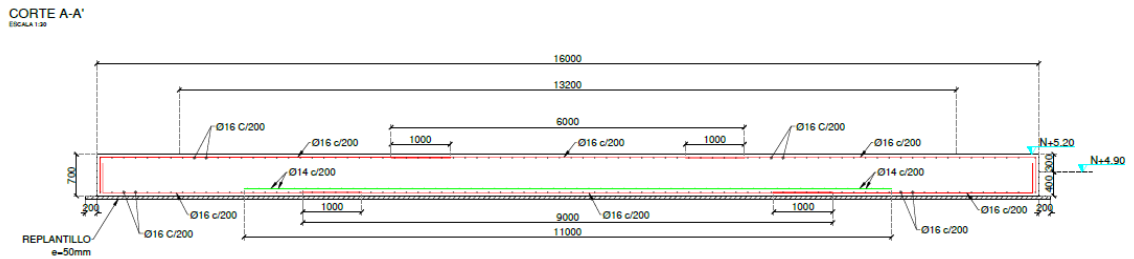


Figura 3.25 – Vista en corte de cimentación y tanque

A continuación, se muestra la Figura No.28 donde se detallan las varillas corrugadas de diseño para la configuración analizada con las cargas, en donde, se debe de hacer traslapes en la parte central, que es donde se concentran los mayores esfuerzos.

En la figura 3.26 se detallan las posiciones de las varillas corrugadas longitudinales y verticales de la parrilla superior.

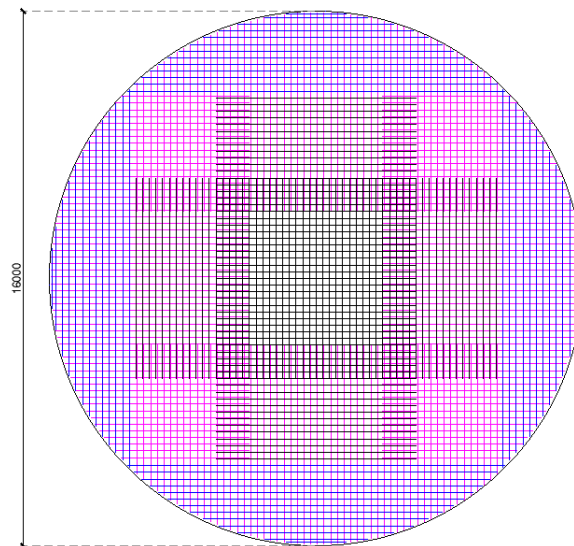


Figura 3.26 – Posicionamiento de varillas longitudinales y verticales

Para un mejor detalle e interpretación del figurado del hierro corrugado, se elaboran dos vistas, las cuales serán de manera independiente, una vista con el hierro figurado longitudinal y el otro con el hierro figurado vertical. Esto se realiza con la intención de mejorar el detalle de cada una de ella, y sus separaciones.

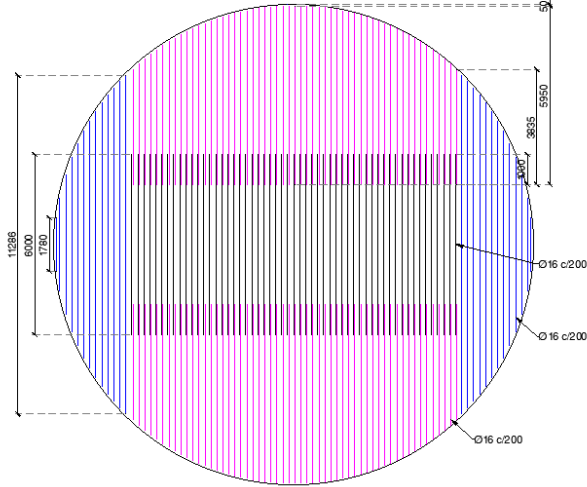


Figura 3.27 – Posicionamiento superior de la armadura de hierro a 90 grados

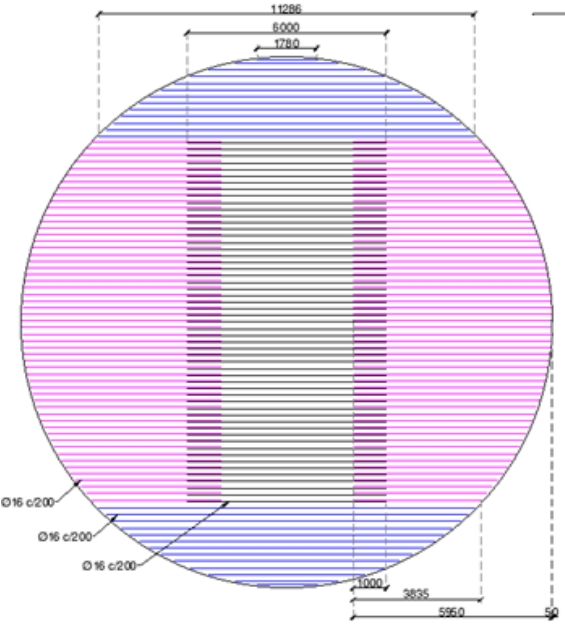


Figura 3.28 – Posicionamiento superior de la armadura de hierro a 0 grados

Figura 3.28 – Posicionamiento superior de la armadura de hierro a 0 grados
En la figura 3.29 se detallan las posiciones de las varillas corrugadas longitudinales y verticales de la parrilla inferior.

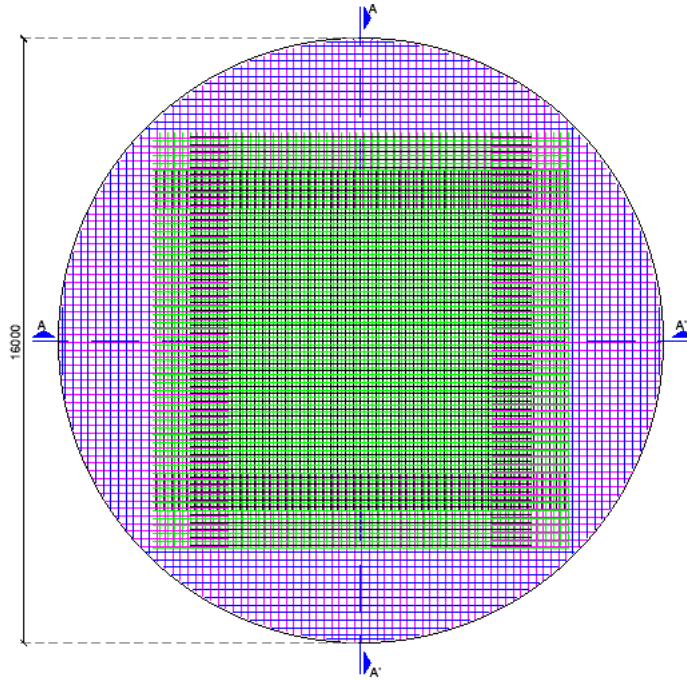


Figura 3.29 – Posicionamiento de varillas longitudinales y verticales inferiores

Para un mejor detalle e interpretación del figurado del hierro corrugado, se elaboran dos vistas, las cuales serán de manera independiente, una vista con el hierro figurado longitudinal inferior y el otro con el hierro figurado vertical inferior. Esto se realiza con la intención de mejorar el detalle de cada una de ellas, y sus separaciones.

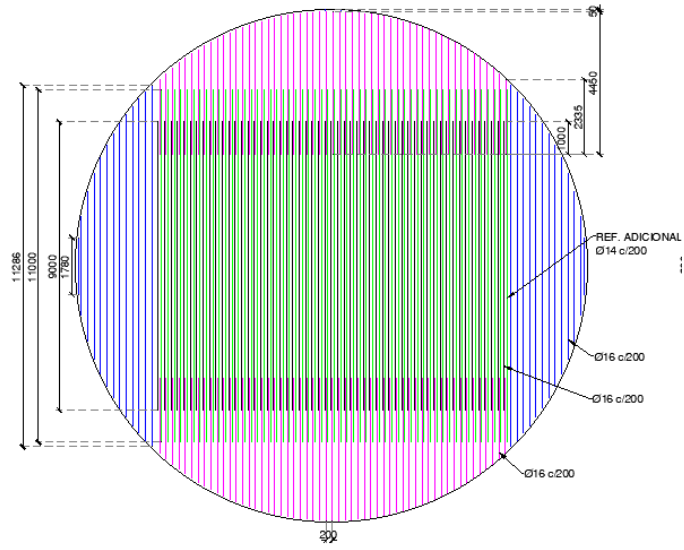


Figura 3.30 – Posicionamiento inferior de la armadura de hierro a 90 grados

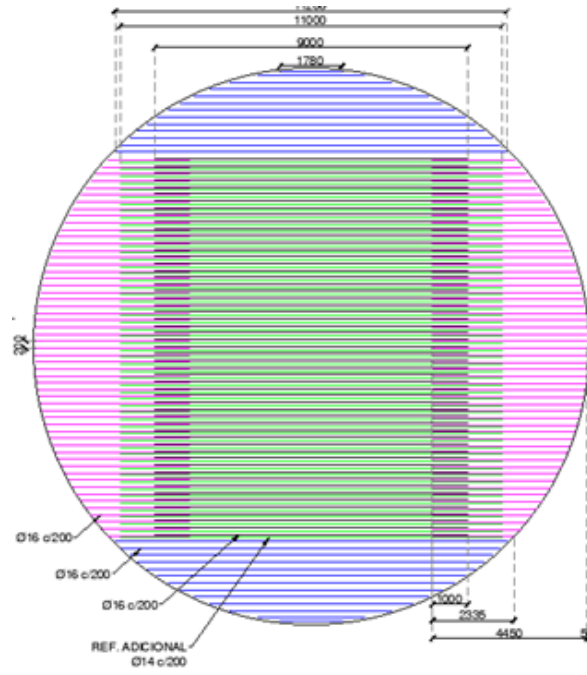


Figura 3.31 – Posicionamiento inferior de la armadura de hierro a 0 grados

CAPÍTULO 4

4 Análisis Sísmico del Tanque de almacenamiento de agua.

4.1 Generalidades del análisis sísmico del tanque de almacenamiento.

Los tanques metálicos de almacenamiento sometidos a acciones sísmicas presentan un comportamiento dinámico particular, debido a la interacción entre la estructura contenedora y el fluido almacenado. Durante un evento sísmico, el líquido no se desplaza de manera solidaria con el tanque, sino que genera presiones hidrodinámicas adicionales sobre las paredes y la base, las cuales incrementan las demandas estructurales.

La respuesta sísmica del sistema tanque–fluido se caracteriza por la aparición de dos componentes principales de masa:

- Componente impulsiva, asociada al fluido que se mueve solidariamente con la pared del tanque.
- Componente convectiva, correspondiente al movimiento oscilatorio del fluido libre (oleaje o sloshing).

La adecuada consideración de estas componentes resulta fundamental para estimar correctamente las fuerzas sísmicas, los momentos volcantes y las verificaciones de estabilidad del tanque

4.2 Parámetros del sitio

De acuerdo con el sitio del proyecto que es en la ciudad de Durán, provincia del Guayas, se adoptan los parámetros sísmicos correspondientes a la amenaza sísmica definida por la normativa nacional según su zona.

Los parámetros considerados incluyen:

- Aceleración pico efectiva del terreno.
- Factor de importancia de la estructura, considerando que se trata de un tanque para sistema contra incendios, clasificado como infraestructura esencial.
- Tipo de suelo, determinado a partir de los estudios geotécnicos y pruebas CPT.

- Espectro de respuesta elástico de diseño.

Estos parámetros permiten definir la aceleración sísmica efectiva que actuará sobre el sistema tanque–fluido

4.3 Modelación del sistema tanque – fluido.

4.3.1. Modelo dinámico equivalente

El sistema tanque–fluido se modela mediante un sistema dinámico equivalente de masas concentradas, compuesto por:

- Masa impulsiva m_i , determinada a una altura equivalente h_i .
- Masa convectiva m_c , determinada a una altura equivalente h_c .

Estas masas se determinan en función de la geometría del tanque, la altura del líquido y las expresiones establecidas en la norma API 650 y Housner.

4.3.2. Determinación de las masas impulsivas y convectivas

El sistema tanque–fluido se idealiza como un sistema de dos grados de libertad, compuesto por:

- Masa impulsiva m_i
- Masa convectiva m_c

La masa total del líquido almacenado se expresa como:

$$m_L = \rho \pi R^2 H \quad (4.1)$$

donde:

ρ = densidad del líquido

R = radio interno del tanque

H = altura del fluido almacenado

$$m_L = (1000) (\pi) (6.60^2) \quad (5.20)$$

$$m_L = 711.6 \text{ ton}$$

Relación geométrica:

$$\frac{H}{R} = 0.79$$

Para $H/R = 0.79$, según la norma API 650 – Apéndice E / Housner, se adoptan:

- Masa impulsiva $\approx 60 \%$
- Masa convectiva $\approx 40 \%$

La masa total se descompone como:

$$m_L = m_i + m_c \quad (4.2)$$

donde:

- m_i representa la porción del fluido que se acelera conjuntamente con la pared del tanque.
- m_c representa la porción del fluido asociada al movimiento convectivo u oscilatorio.

En función a lo mencionado se detalla los valores de las masas impulsivas y convectivas, mostradas en la tabla 4.1

Tabla 4.1 – resumen de valores de masas

| Componente | Masa (ton) | Porcentaje (%) |
|--|---------------|----------------|
| Masa impulsiva m_i | 426.96 | 60 |
| Masa convectiva m_c | 284.64 | 40 |
| Masa total del liquido m_L | 711.60 | 100 |

4.4 Periodo de vibración del sistema.

4.4.1. Periodo impulsivo

El periodo impulsivo del sistema está controlado principalmente por la rigidez de la pared del tanque y se calcula considerando el comportamiento conjunto del tanque y la masa impulsiva del fluido.

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{m_i}{k_i}} \quad (4.3)$$

donde:

k_i = rigidez lateral equivalente del tanque

Sin embargo, para tanques metálicos apoyados diseñados según la norma API 650, el valor del periodo impulsivo es:

$$T_i \approx 0.20 \text{ s}$$

4.4.2. Periodo convectivo

El periodo convectivo está asociado al movimiento de oleaje del fluido y depende fundamentalmente de la geometría del tanque y la altura del líquido.

La ecuación 4.4 se detalla las variables.

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g \tanh\left(\frac{\pi H}{R}\right)}} \quad (4.4)$$

donde:

g = aceleración de la gravedad

Reemplazando:

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{6.6}{9.81 \tanh\left(\frac{\pi (5.2)}{6.6}\right)}}$$

$$T_c = 5.19 \text{ s}$$

El periodo convectivo suele ser significativamente mayor que el periodo impulsivo. Los valores se presentan según tabla 4.2.

Tabla 4.2 – resumen de valores de periodos

| Componente | Periodo (s) |
|-----------------------------------|-------------|
| Periodo impulsivo T _i | 0.20 |
| Periodo convectivo T _c | 5.19 |

4.5 Fuerzas sísmicas hidrodinámicas

4.5.1. Fuerza sísmica impulsiva

La fuerza sísmica impulsiva se calcula como:

$$F_i = m_i \cdot S_a(T_i) \quad (4.5)$$

donde:

$S_a(T_i)$ = aceleración espectral correspondiente al periodo impulsivo.

Para un tanque de agua de una red de sistema contra incendios se considera esencial para el funcionamiento de la planta, y si se construirá en una zona sísmica alta, se consideran los siguientes valores:

$$S_a(T_i) = 0.6 g$$

donde:

g = aceleración de la gravedad

Reemplazando en la ecuación 4.5:

$$F_i = m_i \cdot S_a(T_i)$$

$$F_i = 426,960 \cdot 0.60 \quad (9.81)$$

$$F_i = 2513 \text{ KN}$$

4.5.2. Fuerza sísmica convectiva

La fuerza sísmica convectiva se determina como:

$$F_c = m_c \cdot S_a(T_c) \quad (4.6)$$

donde

$S_a(T_c)$ = aceleración espectral correspondiente al periodo convectivo.

Para un tanque de agua de una red de sistema contra incendios se considera esencial para el funcionamiento de la planta, y si se construirá en una zona sísmica alta, se consideran los siguientes valores:

$$S_a(T_c) = 0.1 g$$

donde:

g = aceleración de la gravedad

Reemplazando en la ecuación 4.6:

$$F_c = m_c \cdot S_a(T_c)$$

$$F_c = 284,644 \cdot 0.10 \quad (9.81)$$

$$F_c = 279 \text{ KN}$$

4.5.3. Fuerza sísmica total

La fuerza sísmica total actuante sobre el tanque se obtiene mediante la combinación de ambas componentes:

$$F_{total} = F_i + F_c \quad (4.7)$$

Reemplazando en la ecuación 4.7:

$$F_{total} = 2513 + 279$$

$$F_{total} = 2792 \text{ KN}$$

4.6 Momento sísmico volcador

El momento volcador generado en la base del tanque por la acción sísmica se calcula considerando la contribución de ambas masas:

$$M = F_i \cdot h_i + F_c \cdot h_c \quad (4.8)$$

Este momento constituye uno de los parámetros más críticos para la evaluación de la estabilidad del tanque y de su cimentación.

Para determinar el momento volcador, se debe de determinar los valores de las alturas equivalentes, donde son los siguientes:

Coefficientes normativos:

$$h_i = 0.40H \quad (4.9)$$

$$h_c = 0.80H \quad (4.10)$$

Reemplazando en la ecuación 4.9 y 4.10 los valores son los siguientes:

$$h_i = 0.40 (5.2) = 2.08$$

$$h_c = 0.80 (5.2) = 4.16$$

Conociendo los datos de las alturas, se reemplaza dichos valores en la ecuación 4.8 obteniendo los siguientes valores.

$$M = (2513 \times 2.08) + (279 \times 4.16)$$

$$M = 6389 \text{ KN m}$$

4.7 Análisis sísmico cuando el tanque contiene el volumen mínimo de agua dentro del recipiente

Resulta necesario analizar el comportamiento del tanque de almacenamiento bajo la condición de mínimo volumen de agua, correspondiente a aproximadamente 22 m³ según calculos ya determinados en la seccion 3.3.

El análisis se basa en la eventualidad de que, tras la ocurrencia de un siniestro en la planta industrial, el agua almacenada sea utilizada para el control del incendio y, de manera posterior e inmediata, se presente un evento sísmico. Si bien la probabilidad de ocurrencia simultánea de ambos eventos es baja, su análisis es de relevancia desde la arista de la seguridad estructural, en virtud que el tiempo de llenado total del tanque puede requerir muchas horas. En este escenario, el tanque podría encontrarse operando con un nivel reducido de agua durante un evento sísmico, lo cual justifica la evaluación de esta condición como parte del análisis sísmico integral del sistema.

Con lo mencionado, procedemos con los cálculos de masas, periodos, fuerzas y momentos para determinar el comportamiento del mismo.

Para conocer que altura de columna de agua comprende los 22 m³, que es el volumen mínimo de agua, se realiza el siguiente cálculo.

$$A = \pi D^2 / 4 \quad (4.11)$$

$$A = \pi (13.2)^2 / 4$$

$$A = 136.85 \text{ m}^2$$

Conociendo el valor del área y el valor del volumen, se determina la altura de columna de agua.

$$V = A \times H \quad (4.12)$$

Despejamos

$$H = V / A$$

$$H = 22 \text{ m}^3 / 136.85 \text{ m}^2$$

$$H = 0.16 \text{ m}$$

Con los datos obtenidos, procedemos a realizar los cálculos, determinando en primer punto las masas.

4.7.1. Determinación de las masas impulsivas y convectivas con volumen de agua mínima.

El sistema tanque–fluido se idealiza como un sistema de dos grados de libertad, compuesto por:

- Masa impulsiva m_i
- Masa convectiva m_c

La masa total del líquido almacenado se expresa como:

$$m_L = \rho \pi R^2 H \quad (4.13)$$

donde:

ρ = densidad del líquido

R = radio interno del tanque

H = altura del fluido almacenado

$$m_L = (1000) (\pi) (6.60^2) (0.16)$$

$$m_L = 21.9 \text{ ton}$$

Masa impulsiva $\approx 60 \%$

Masa convectiva $\approx 40 \%$

se adopta la misma proporción porcentual de un tanque lleno de agua por consistencia metodológica y enfoque conservador.

En función a lo mencionado se presenta los valores de las masas impulsivas y convectivas según tabla 4.3

Tabla 4.3 – Resumen de valores de masas nivel mínimo

| Componente | Mas (ton) | Porcentaje (%) |
|--|-------------|----------------|
| Masa impulsiva m_i | 13.14 | 60 |
| Masa convectiva m_c | 8.76 | 40 |
| Masa total del liquido m_L | 21.9 | 100 |

4.8 Periodo de vibración del sistema con volumen de agua

4.8.1 Periodo impulsivo con volumen mínimo de agua.

El periodo impulsivo del sistema está controlado principalmente por la rigidez de la pared del tanque y se calcula considerando el comportamiento conjunto del tanque y la masa impulsiva del fluido.

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{m_i}{k_i}} \quad (4.15)$$

donde:

k_i = rigidez lateral equivalente del tanque

Sin embargo, para tanques metálicos apoyados diseñados según la norma API 650, el valor del periodo impulsivo es:

$$T_i \approx 0.20 \text{ s}$$

4.8.2 Periodo convectivo con volumen mínimo de agua.

El periodo convectivo está asociado al movimiento de oleaje del fluido y depende fundamentalmente de la geometría del tanque y la altura del líquido.

La ecuación 4.16 se detalla las variables.

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g \tanh\left(\frac{\pi H}{R}\right)}} \quad (4.16)$$

donde:

g = aceleración de la gravedad

Reemplazando:

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{6.6}{9.81 \tanh\left(\frac{\pi (0.16)}{6.6}\right)}}$$

$$T_c = 18.69 \text{ s}$$

El periodo convectivo suele ser significativamente mayor que el periodo impulsivo. Los valores de periodos con volumen de agua mínima se presenta en tabla 4.4.

Tabla 4.2 – resumen de valores de periodos

| Componente | Periodo (s) |
|--------------------------|-------------|
| Periodo impulsivo T_i | 0.2 |
| Periodo convectivo T_c | 18.69 |

4.9 Fuerzas sísmicas hidrodinámicas con volumen de agua mínimo.

4.9.1 Fuerza sísmica impulsiva con volumen mínimo.

La fuerza sísmica impulsiva se calcula como:

$$F_i = m_i \cdot S_a(T_i) \quad (4.17)$$

donde:

$S_a(T_i)$ = aceleración espectral correspondiente al periodo impulsivo.

Para un tanque de agua de una red de sistema contra incendios se considera esencial para la operación de la planta, aun con niveles de agua mínimas, y si se construirá en una zona sísmica alta, se consideran los siguientes valores:

$$S_a(T_i) = 0.6 g$$

donde:

g = aceleración de la gravedad

Reemplazando en la ecuación 4.5:

$$\begin{aligned} F_i &= m_i \cdot S_a(T_i) \\ F_i &= 13137.4 \cdot 0.60 \quad (9.81) \\ F_i &= 77.32 \text{ KN} \end{aligned}$$

4.9.2 Fuerza sísmica convectiva con volumen mínimo.

La fuerza sísmica convectiva se determina como:

$$F_c = m_c \cdot S_a(T_c) \quad (4.18)$$

Donde

$S_a(T_c)$ = aceleración espectral correspondiente al periodo convectivo.

Para un tanque de agua de una red de sistema contra incendios se considera esencial para la operación de la planta, aun con niveles de agua mínimas, y si se construirá en una zona sísmica alta, se consideran los siguientes valores:

$$S_a(T_c) = 0.1 g$$

donde:

g = aceleración de la gravedad

Reemplazando en la ecuación 4.6:

$$F_c = m_c \cdot S_a(T_c)$$

$$F_c = 8758.27 \cdot 0.10 \quad (9.81)$$

$$F_c = 8.59 \text{ KN}$$

4.9.3 Fuerza sísmica total con volumen mínimo.

La fuerza sísmica total actuante sobre el tanque se obtiene mediante la combinación de ambas componentes:

$$F_{total} = F_i + F_c \quad (4.19)$$

Reemplazando en la ecuación 4.7:

$$F_{total} = 77.32 + 8.59$$

$$F_{total} = 85.91 \text{ KN}$$

4.10 Momento sísmico volcador con volumen mínimo de agua.

El momento volcador generado en la base del tanque por la acción sísmica se calcula considerando la contribución de ambas masas:

$$M = F_i \cdot h_i + F_c \cdot h_c \quad (4.8)$$

Este momento constituye uno de los parámetros más críticos para la evaluación de la estabilidad del tanque y de su cimentación.

Para determinar el momento volcador, se debe de determinar los valores de las alturas equivalentes, donde son los siguientes:

Coefficientes normativos:

$$h_i = 0.40H \quad (4.20)$$

$$h_c = 0.80H \quad (4.21)$$

Reemplazando en la ecuación 4.20 y 4.21 los valores son los siguientes:

$$h_i = 0.40 (0.16) = 0.064$$

$$h_c = 0.80 (0.16) = 0.128$$

En base a los datos obtenidos, se reemplaza los valores en la ecuación 4.8 obteniendo los siguientes valores.

$$M = (77.32 \times 0.064) + (8.59 \times 0.128)$$

$$M = 6.048 \text{ KN m}$$

CAPÍTULO 5

5 Verificaciones de estabilidad sísmica

5.1 Análisis de verificación de volcamiento y deslizamiento.

5.1.1. Verificación al volcamiento

Se verifica que el momento resistente proporcionado por el peso propio del tanque, el fluido y la losa de cimentación sea mayor que el momento volcador sísmico amplificado por los factores normativos. El factor de volcamiento debe de ser mayor a 1.5 para poder determinar si cumple, para lo cual debemos de calcular los siguientes puntos.

Debemos de calcular los pesos que intervienen sobre el piso.

Pesos considerados

Peso del líquido:

$$W_L = m_L g \quad (5.1)$$

$$W_L = 711.6 \times 9.81$$

$$W_L = 6,983 \text{ kN}$$

Peso del tanque metálico

$$W_T = 250 \text{ kN} \quad (5.2)$$

Peso de la losa de cimentación ($\varnothing = 16 \text{ m}$, $e = 0.60 \text{ m}$).

Se determina primero el volumen del hormigón donde se emplea la ecuación 5.2

$$V = \pi(r)^2(e) \quad (5.2)$$

$$V = \pi(8.0)^2(0.60)$$

$$V = 120.63 \text{ m}^3$$

Con el dato obtenido, se determina el peso de la losa

$$W_{Losa} = 120.63 \times 24 = 2895 \text{ kN}$$

Con los datos obtenidos de los pesos, se calcula el peso total mediante la ecuación 5.4

$$W_{total} = W_L + W_T + W_{Losa} \quad (5.4)$$

$$W_{total} = 6983 + 250 + 2895$$

$$W_{total} = 10,128 \text{ kN}$$

El momento resistente está dado por el peso total que actúa sobre la base del tanque multiplicado por el brazo resistente, considerado como el radio medio de la losa.

$$r = \frac{D_{losa}}{2} \quad (5.4)$$

$$r = 8.0 \text{ m}$$

Con lo mencionado, se determina el momento resistente que se describe en la ecuación 5.5

$$M_R = W_{total} \cdot r \quad (5.5)$$

$$M_R = 81024 \text{ KN m}$$

Con los valores obtenidos, se determina el factor de seguridad al volcamiento mediante la ecuación 5.6

$$FS_{volc} = \frac{M_R}{M_s} \quad (5.6)$$

$$FS_{volc} = \frac{81024}{6,389} = \boxed{12.68}$$

Con el valor obtenido de FS_{volc} se revisa, si cumple según la ecuación 5.7

$$FS_{volc} \geq 1.5(\text{sismo}) \quad (5.7)$$

$$12.68 \geq 1.5(\text{sismo})$$

Con los resultados, se observa que se **CUMPLE** holgadamente.

5.1.2 Verificación al deslizamiento

Se verifica que la fuerza de fricción disponible en la base del tanque sea suficiente para resistir la fuerza sísmica horizontal actuante, considerando los coeficientes de fricción suelo–hormigón.

En virtud que se cuenta con el valor de la Fuerza sísmica horizontal actuante, el cual es:

$$F_s = 2,792 \text{ kN}$$

Para determinar la fuerza resistente por fricción, se aplica la ecuación 5.8

$$R_f = \mu \cdot W_{total} \quad (5.8)$$

donde utilizaremos un coeficiente de fricción hormigón–suelo granular conservador, obtenido el valor de:

$$\mu = 0.50$$

Con el valor del coeficiente, reemplazamos en la ecuación 4.19 para obtener el valor de la resistencia al deslizamiento.

$$R_f = 0.50 \times 10,128$$

$$R_f = 5,064 \text{ kN}$$

Con los valores obtenidos, se determina el factor de seguridad al deslizamiento mediante la ecuación 5.9

$$FS_{desl} = \frac{R_f}{F_s} \quad (5.9)$$

$$FS_{desl} = \frac{5,064}{2,792} = \boxed{1.81}$$

Con el valor obtenido de FS_{desl} se revisa, si cumple según la ecuación 5.10

$$FS_{desl} \geq 1.1 \text{ a } 1.3(\text{sismo}) \quad (5.10)$$

$$1.81 \geq 1.1 \text{ a } 1.3 (\text{sismo})$$

Con los resultados, se observa que se **CUMPLE**

5.2. Presiones de contacto en la base de la losa

Se evalúan las presiones máximas y mínimas transmitidas al suelo, verificando que no se generen tensiones de tracción y que las presiones máximas no superen la capacidad portante admisible.

Para poder verificar las presiones actuantes, se puede emplear el análisis de excentricidad inducida por el momento sísmico, donde analizamos mediante la ecuación 5.11

$$e = \frac{M_s}{W_{total}} \quad (5.11)$$

$$e = \frac{6,389}{10,128} = 0.63 \text{ m}$$

Condición para evitar tracción, se determina mediante la ecuación 5.12

$$e \leq \frac{D_{losa}}{6} \quad (5.12)$$

$$e \leq \frac{16}{6}$$

$$0.63 \leq 2.67 \text{ m}$$

Como se cumple la condición, se determina que no se generan presiones de tracción.

5.3. Verificación de estabilidad sísmica

Los valores obtenidos del análisis sísmico permiten verificar que:

- El momento resistente proporcionado por el peso propio del tanque, el fluido almacenado y la losa de cimentación es mayor que el momento volcador sísmico.
- No se presentan presiones de tracción en la base del tanque.
- La verificación al deslizamiento cumple con los factores de seguridad exigidos por la normativa.

Por lo tanto, el tanque completamente lleno de agua presenta estabilidad global adecuada frente a la acción sísmica de diseño.

5.4. Análisis de verificación al volcamiento y deslizamiento cuando el tanque contiene el volumen mínimo de agua dentro del recipiente.

5.4.1. Verificación al volcamiento con volumen mínimo

Se verifica que el momento resistente proporcionado por el peso propio del tanque, el fluido y la losa de cimentación sea mayor que el momento volcador sísmico amplificado por los factores normativos. En este punto debemos de considerar que el fluido disminuye sustancialmente, considerando que se analiza con el mínimo nivel y volumen que podría tener el tanque.

Debemos de calcular los pesos que intervienen sobre el piso.

Pesos considerados

Peso del líquido:

$$W_L = m_L g \quad (5.13)$$

$$W_L = 21.9 \times 9.81$$

$$W_L = 214.84 \text{ kN}$$

Peso del tanque metálico

$$W_T = 250 \text{ kN}$$

Peso de la losa de cimentación ($\varnothing = 16 \text{ m}$, $e = 0.60 \text{ m}$).

Se determina de igual manera primero el volumen del hormigón donde se emplea la ecuación 5.14

$$V = \pi(r)^2(e) \quad (5.14)$$

$$V = \pi(8.0)^2(0.60)$$

$$V = 120.63 \text{ m}^3$$

Con el dato obtenido, se determina el peso de la losa

$$W_{Losa} = 120.63 \times 24 = 2895 \text{ kN}$$

Con los datos obtenidos de los pesos, se calcula el peso total mediante la ecuación

5.15

$$W_{total} = W_L + W_T + W_{Losa} \quad (5.15)$$

$$W_{total} = 214.84 + 250 + 2895$$

$$W_{total} = 3,359.84 \text{ kN}$$

El momento resistente está dado por el peso total que actúa sobre la base del tanque multiplicado por el brazo resistente, considerado como el radio medio de la losa.

$$r = \frac{D_{losa}}{2} \quad (5.16)$$

$$r = 8.0 \text{ m}$$

Con lo mencionado, se determina el momento resistente que se describe en la ecuación 5.17

$$M_R = W_{total} \cdot r \quad (5.17)$$

$$M_R = 26.88 \text{ KN m}$$

Con los valores obtenidos, se determina el factor de seguridad al volcamiento mediante la ecuación 5.18

$$FS_{volc} = \frac{M_R}{M_S} \quad (5.18)$$

$$FS_{volc} = \frac{26.88}{6.048} = \boxed{4.44}$$

Con el valor obtenido de FS_{volc} se revisa, si cumple según la ecuación 5.19

$$FS_{volc} \geq 1.5(\text{sismo}) \quad (5.19)$$

$$4.44 \geq 1.5(\text{sismo})$$

Con los resultados, se observa que se **CUMPLE**

5.4.2. Verificación al deslizamiento con volumen mínimo

Se verifica que la fuerza de fricción disponible en la base del tanque sea suficiente para resistir la fuerza sísmica horizontal actuante, considerando los coeficientes de fricción suelo–hormigón.

En virtud que se cuenta con el valor de la Fuerza sísmica horizontal actuante, el cual es:

$$F_s = 85.91 \text{ kN}$$

Para determinar la fuerza resistente por fricción, se aplica la ecuación 5.20

$$R_f = \mu \cdot W_{total} \quad (5.20)$$

donde utilizaremos un coeficiente de fricción hormigón–suelo granular conservador, obtenido el valor de:

$$\mu = 0.50$$

Con el valor del coeficiente, reemplazamos en la ecuación 4.19 para obtener el valor de la resistencia al deslizamiento

$$R_f = 0.50 \times 3,359.84$$

$$R_f = 1,679 \text{ kN}$$

Con los valores obtenidos, se determina el factor de seguridad al deslizamiento mediante la ecuación 5.21

$$FS_{desl} = \frac{R_f}{F_s} \quad (5.21)$$

$$FS_{desl} = \frac{1,679}{85.91} = \boxed{19.54}$$

Con el valor obtenido de FS_{desl} se revisa, si cumple según la ecuación 5.22

$$FS_{desl} \geq 1.1 \text{ a } 1.3(\text{sismo}) \quad (5.22)$$

$$19.54 \geq 1.1 \text{ a } 1.3 (\text{sismo})$$

Con los resultados, se observa que se **CUMPLE**

5.5. Presiones de contacto en la base de la losa con volumen mínimo

Se evalúan las presiones máximas y mínimas transmitidas al suelo, verificando que no se generen tensiones de tracción y que las presiones máximas no superen la capacidad portante admisible, considerando los valores con el volumen mínimo de agua.

Para poder verificar las presiones actuantes, se puede emplear el análisis de excentricidad inducida por el momento sísmico, donde analizamos mediante la ecuación 5.23

$$e = \frac{M_s}{W_{total}} \quad (5.23)$$

$$e = \frac{6.048}{3,359.84} = 0.0018 \text{ m}$$

Condición para evitar tracción, se determina mediante la ecuación 5.12

$$e \leq \frac{D_{losa}}{6} \quad (5.12)$$

$$e \leq \frac{16}{6}$$

$$0.0018 \leq 2.67 \text{ m}$$

Como se cumple la condición, se determina que no se generan presiones de tracción.

5.6. Verificación de estabilidad sísmica para el tanque con el volumen mínimo.

Los valores obtenidos del análisis sísmico permiten verificar que:

- Los valores de volcamiento, deslizamientos y presión de contacto considerando el tanque con el nivel mínimo de agua, cumple con los factores de seguridad exigidos por la normativa.

- El momento volcador absoluto disminuye con menor volumen de agua. Sin embargo, la relación momento volcador / momento resistente se vuelve más crítica con el tanque casi vacío.

Por lo tanto, el tanque con el volumen mínimo (22 m³) presenta estabilidad global adecuada frente a la acción sísmica de diseño.

CAPÍTULO 6

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

A partir de los resultados derivados del análisis de tanque en condición llena se concluye que:

- El diseño y la evaluación sísmica del tanque metálico de almacenamiento de 700 m³, considerando explícitamente la interacción fluido–estructura, permitió caracterizar de manera realista la respuesta dinámica del sistema ante sollicitaciones sísmicas, evidenciando la importancia de incorporar este fenómeno en el análisis estructural de tanques apoyados sobre la losa.
- El análisis dinámico basado en el modelo de Housner, adoptado por la normativa API 650, permitió descomponer adecuadamente la masa del fluido en sus componentes impulsiva y convectiva, observándose que la componente impulsiva domina la respuesta sísmica del sistema, representando más del 80 % del momento volcador total.
- La componente convectiva, asociada al movimiento de oleaje del fluido, genera fuerzas de menor magnitud en comparación con la componente impulsiva; sin embargo, si se analiza tanques de mayor altura, su contribución al momento volcador no resultaría despreciable.
- Los valores obtenidos del momento volcador sísmico son consistentes con el comportamiento esperado de tanques metálicos apoyados de baja esbeltez, confirmando que la geometría adoptada favorece la estabilidad global del sistema frente a acciones sísmicas.
- La verificación al deslizamiento evidenció que la resistencia por fricción disponible en la base del tanque es suficiente para resistir la fuerza sísmica horizontal actuante, cumpliendo con los criterios normativos de seguridad para eventos sísmicos.
- El análisis de presiones de contacto en la base de la losa mostró que la excentricidad inducida por el momento sísmico se mantiene dentro de los

límites permisibles, evitando la generación de presiones de tracción en el suelo y garantizando una distribución adecuada de esfuerzos.

- Los resultados obtenidos confirman que la losa de cimentación diseñada presenta una capacidad resistente compatible con las demandas sísmicas del tanque, manteniendo un comportamiento adecuado frente a asentamientos totales y diferenciales dentro de los límites admisibles.
- Bajo el sismo de diseño considerado, el tanque metálico presenta un comportamiento sísmico satisfactorio, manteniéndose dentro del rango lineal elástico, sin desarrollar mecanismos de falla tales como levantamiento excesivo del fondo, pérdida de estabilidad global o deformaciones excesivas.

Luego de analizar y determinar los resultados obtenidos del tanque con el volumen mínimo (22 m³), se concluye que:

- El análisis sísmico con el volumen mínimo, se mantiene técnicamente adecuado y coherente con la normativa API 650.
- La condición de tanque con volumen mínimo de agua, correspondiente a 22 m³, constituye el escenario más desfavorable desde la arista de la estabilidad global, debido a la reducción significativa del peso estabilizador, aun cuando las fuerzas sísmicas actuantes sean menores.
- Las verificaciones de volcamiento, deslizamiento y presiones de contacto demuestran que el tanque mantiene estabilidad sísmica adecuada en ambos escenarios analizados, cumpliendo los factores de seguridad exigidos por la normativa vigente
- El análisis comparativo evidencia la importancia de considerar distintos estados operativos del nivel del fluido, especialmente en tanques destinados a sistemas contra incendios, donde pueden presentarse condiciones de llenado mínimo durante eventos sísmicos.

6.2. Recomendaciones

Hay puntos para recomendar en proyectos futuros.

- Se recomienda verificar los detalles constructivos conforme a los requisitos determinados en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015) [21], ya que estos constituyen puntos críticos para el desempeño sísmico y la durabilidad del tanque
- Es recomendable implementar un plan de control de calidad durante la fabricación e instalación, que incluya inspección de soldaduras, control de espesores, pruebas no destructivas y verificación de tolerancias geométricas.
- Para garantizar una mejor durabilidad al tanque metálico, se debe de elaborar un plan de calidad para el control de la aplicación de preparación superficial que deben de tener las planchas metálicas, así como la protección epóxica y los espesores de recubrimientos tanto interior como exterior. Para un correcto trabajo se debe de establecer procedimientos como se establece en la norma SSPC (2015) [22], garantizando condiciones adecuadas para la aplicación del sistema de recubrimiento.
- Durante la fase de operación, se sugiere establecer un programa periódico de inspección, enfocado en la detección temprana de corrosión, fisuras, etc. La inspección, evaluación y mantenimiento del tanque se debe de considerar conforme a los lineamientos establecidos en el estándar API 653 (2020) [23].
- Revisar en un periodo mínimo de 7 años el fondo del tanque para analizar los espesores que mantiene y revisar si es necesario protección catódica. La revisión debe de seguir los lineamientos establecidos en la práctica recomendada API 651 (2014) [24].
- No es recomendable usar hormigón con aditivos en cimentaciones de tanques, es preferible que tome el tiempo de fraguado completo, para evitar presencias de fisuras una vez sea llenado por completo el tanque. De acuerdo con el ACI 212.3R, los aditivos deben emplearse únicamente cuando se requiera modificar propiedades específicas del hormigón [25].
- En tanques destinados a infraestructura esencial, se recomienda establecer procedimientos operativos que minimicen el tiempo de recuperación del nivel

de agua tras un evento de emergencia, reduciendo la vulnerabilidad sísmica del sistema

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Housner, G. W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 381–387
- [2] American Petroleum Institute. (2020). *Welded tanks for oil storage (API Standard 650)*. API Publishing Services
- [3] American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-16)*. ASCE
- [4] National Fire Protection Association. (2022). *NFPA 22: Standard for water tanks for private fire protection*. NFPA.
- [5] Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (5th ed.)*. Pearson
- [6] American Concrete Institute. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)*. ACI
- [7] International Code Council. (2018). *International building code (IBC)*. ICC
- [8] Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., ... Yao, J. T. P. (1997). Structural control: Past, present, and future. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9), 897–971
- [9] American Water Works Association. (2011). *AWWA D100: Welded carbon steel tanks for water storage*. AWWA.
- [10] ASTM International. (2020). *ASTM A36/A36M: Standard specification for carbon structural steel*. ASTM.
- [11] American Concrete Institute. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)*. ACI.
- [12] ASTM International. (2020). *ASTM A615/A615M: Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement*. ASTM International.
- [13] Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- [14] Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249–1273.
- [15] American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM D1557: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort*. ASTM International

- [16] American Society for Testing and Materials. (2020). ASTM D4318: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International.
- [17] Bowles, J. E. (1996). Foundation analysis and design (5th ed.). McGraw-Hill
- [18] ASTM International. (2020). ASTM C39/C39M: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International
- [19] ASTM International. (2020). ASTM C31/C31M: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field. ASTM International
- [20] American Welding Society. (2020). Structural welding code—Steel (AWS D1.1/D1.1M).AWS
- [21] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). Norma ecuatoriana de la construcción (NEC): Diseño sismorresistente. MIDUVI
- [22] Society for Protective Coatings. (2015). SSPC-SP 10/NACE No. 2: Near-white metal blast cleaning.SSPC
- [23] American Petroleum Institute. (2020). Tank inspection, repair, alteration, and reconstruction (API Standard 653). API Publishing Services.
- [24] American Petroleum Institute. (2014). Cathodic protection of aboveground petroleum storage tanks (API Recommended Practice 651). API Publishing Services
- [25] American Concrete Institute. (2010). Report on chemical admixtures for concrete (ACI 212.3R-10). ACI