



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL CASO ESTÁTICO DE UN ESTANQUE DE ACERO  
CORRUGADO UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS LS-DYNA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

JAVIERA KARENINA SOTO GUZMÁN

PROFESORA GUÍA:  
Elizabeth Parra Henríquez

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
Horacio Pinochet Vejar  
David Campusano Brown

SANTIAGO DE CHILE  
2024

## ANÁLISIS DEL CASO ESTÁTICO DE UN ESTANQUE DE ACERO CORRUGADO UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS LS-DYNA

El estudio se centra en un análisis detallado de un estanque corrugado empernado ubicado en Paine, diseñado para una red contra incendios. El estanque tiene un diámetro de 6300 mm, una altura de 4400 mm y un espesor de placa de 2.5 mm.

Se utiliza el software Ansys LS-DYNA para realizar un análisis estático de la estructura, además, se realiza también un análisis sísmico teórico. LS-DYNA sobresale debido a su versatilidad para la realización de simulaciones detalladas de modelos complejos, además de su capacidad para simular situaciones estáticas, el software sobresale al abordar escenarios dinámicos que incluyen pruebas de caída, impacto y choque, lo que lo convierte en una herramienta esencial para evaluar la seguridad de los ocupantes en diversas situaciones.

El análisis estático realizado con el programa LS-DYNA busca evaluar las presiones hidrostáticas en la estructura del estanque, mientras que el análisis dinámico se realiza conforme a las normas NCh.2369 of 2003, AWWA D-103 y AWWA D-100, proporcionando información sobre los esfuerzos y deformaciones teóricos ante eventos sísmicos.

La norma NCh.2369 of 2003 es un documento importante en la ingeniería sísmica chilena, estableciendo requisitos para el diseño de estructuras ante sismos. El capítulo 11.8 detalla criterios para el diseño, incluyendo normas internacionales, requisitos para el manto y anclajes, y demandas sísmicas horizontales y verticales. Este enfoque meticuloso busca anticipar y mitigar los efectos sísmicos, mejorando la seguridad y resiliencia de las infraestructuras críticas en Chile.

Se busca obtener un modelo calibrado, donde se obtengan presiones hidrostáticas acorde a lo esperado, y finalmente, que la presión hidrostática en el estanque coincida con el presión hidrostática calculada siguiendo las recomendaciones de la norma NCh. 2369 of 2003.

*A mis sobrinos, Jose Pedro y Dominga*

*Los amo*

# Agradecimientos

Llegar hasta acá fue un proceso largo, comenzando porque no fue fácil para mi llegar a estudiar en esta universidad, siempre fue un sueño que se transformó en una meta, por eso trabajé mucho para lograrlo, hay mucho esfuerzo y dedicación detrás, lo que siempre tengo presente en mi día a día.

Primero quiero agradecer a mis padres, gracias por todo el esfuerzo que hicieron para que yo pudiera estudiar sin preocupaciones, gracias por estar, por confiar, por animarme. No tengo palabras para agradecerles todo lo que han hecho por mi durante toda su vida. Este logro es tanto mio como de ustedes, gracias mamá y papá.

Gracias a mi hermana y mi cuñado, por siempre estar ahí y por entregarme esas palabras de aliento que uno siempre necesita escuchar.

Gracias a mi abuelita que está en el cielo, sé que siempre me acompaña, cuidándome y protegiéndome para que yo pueda lograr todas mis metas y sueños.

También recordar a mi perrito Clifford que me acompañó prácticamente en todo mi crecimiento y en los dos primeros años de universidad.

En este proceso de titulación, con altos y bajos, me encontré con personas maravillosas, mis profesores. Agradecer al profesor Horacio, la profesora Elizabeth y al profesor David Campusano por tanta confianza y por acompañarme en este proceso, son personas y profesionales maravillosos, agradezco infinitamente haberlos encontrado en esta última etapa.

Y como dicen por ahí, lo mejor para el final... quiero agradecer a mis sobrinos, Jose Pedro y Dominga, que llegaron a alegrar la vida de todos, y a mi en lo personal, a encontrar el empujoncito para dar todo de mi en este último esfuerzo, quiero que se sientan orgullosos de su Titi y que sepan que siempre pueden contar conmigo para lo que necesiten.

Estoy muy contenta y orgullosa de mi misma por terminar esta etapa, me siento muy agradecida por las oportunidades que se me han presentado y por las cuales me he mantenido enfocada siempre, soy afortunada de decir que amo mi carrera, por lo mismo trabajo con la misma entrega y cariño con la que estudié.

# Tabla de Contenido

<b>1. Descripción del Trabajo de Título</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.1.1. Simulación computacional de un choque de auto contra una pared . .	3
1.1.2. Simulación computacional de impacto en el cuello durante colisión au- tomovilística . . . . .	3
1.1.3. Simulación computacional de presión ejercida sobre el rostro de una persona cuando utiliza una mascarilla . . . . .	4
1.2. Objetivos . . . . .	5
1.2.1. Objetivo General . . . . .	5
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	5
1.3. Metodología . . . . .	6
<b>2. Programación en Ansys LS-DYNA</b>	<b>7</b>
2.1. Geometría y materiales . . . . .	7
2.2. Mallado . . . . .	8
2.3. Metodología de Calibración . . . . .	15
2.3.1. PFAC . . . . .	16
2.3.2. DAMPING . . . . .	17
2.4. Extracción de Resultados . . . . .	19
<b>3. Análisis Sísmico con metodología y recomendaciones NCh. 2369 of 2003</b>	<b>20</b>
3.1. Cálculos del estanque en estudio . . . . .	20
3.1.1. Descripción de la Estructura . . . . .	20
3.1.2. Diseño Estructural . . . . .	21
3.1.3. Consideraciones Estructurales . . . . .	21
3.1.3.1. Caracterización del Estanque . . . . .	21
3.1.3.2. Caracterización de elementos del manto . . . . .	22
3.1.3.3. Parámetros Sísmicos . . . . .	23
3.2. Cargas . . . . .	24
3.2.1. Combinaciones de Carga . . . . .	24
3.2.2. Cargas Permanentes . . . . .	24
3.2.3. Cargas de Agua . . . . .	25
3.2.4. Aceleraciones Sísmicas . . . . .	26
3.3. Verificaciones . . . . .	27
3.3.1. Volcamiento . . . . .	27
3.3.2. Deslizamiento . . . . .	30
3.3.3. Compresión en el Manto . . . . .	31

3.3.4.	Tracción en el Manto . . . . .	33
3.3.5.	Resistencia de las costuras verticales . . . . .	34
3.3.6.	Deformación en el Manto . . . . .	35
3.3.7.	Volcamiento con fundaciones . . . . .	37
3.3.8.	Deslizamiento con fundaciones . . . . .	38
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>39</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>42</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>44</b>

# Índice de Tablas

3.1.	Caracterización del Estanque en estudio . . . . .	22
3.2.	Caracterización de los Elementos del Estanque . . . . .	22
3.3.	Caracterización de la Plancha del Estanque . . . . .	22
3.4.	Caracterización de los Pernos . . . . .	23
3.5.	Parámetros Sísmicos . . . . .	23
3.6.	Aceleración Impulsiva, Convectiva y Vertical . . . . .	27
3.7.	Verificación de compresión en los anillos del manto . . . . .	32
3.8.	Espesores y deformaciones en cada anillo del manto . . . . .	36

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Plano del estanque en estudio (propiedad de Tecnovial S.A) . . . . .	2
1.2.	Simulación computacional de un choque de auto contra una pared . . . . .	3
1.3.	Simulación computacional de impacto en el cuello durante una colisión automovilística . . . . .	3
1.4.	Simulación computacional de presión ejercida sobre el rostro de una persona cuando utiliza una mascarilla . . . . .	4
2.1.	Manual de Carreteras, Volumen 4, página 58 . . . . .	7
2.2.	Geometría de corrugación . . . . .	8
2.3.	Representación computacional de una pared corrugada . . . . .	9
2.4.	Definición de Sección . . . . .	10
2.5.	Definición de puntos de control de Malla de fluido . . . . .	10
2.6.	Gráfico de curva de esfuerzos para la estructura del estanque . . . . .	11
2.7.	Definición de parte . . . . .	11
2.8.	Gráfico de curva unitaria para aplicación de cargas . . . . .	12
2.9.	Selección de set de nodos para aplicar cargas . . . . .	12
2.10.	Definición de carga a aplicar . . . . .	13
2.11.	Definición de contacto entre partes . . . . .	13
2.12.	Definición de presión hidrostática inicial . . . . .	14
2.13.	Definición de criterio de término de la simulación . . . . .	14
2.14.	Curva de parámetro PFAC . . . . .	16
2.15.	Definición de FSI y parámetro PFAC . . . . .	17
2.16.	Curva de aplicación del damping . . . . .	18
2.17.	Definición del damping . . . . .	19
3.1.	Geometría planchas de acero corrugado estándar Tecnovial S.A . . . . .	20
3.2.	Configuración de planchas de un estanque en estudio de 5 anillos . . . . .	21
3.3.	Modelo de estudio para deformación de plancha corrugada . . . . .	35
3.4.	Geometría del sistema de fundación . . . . .	37
4.1.	Perfil hidrostático . . . . .	40
4.2.	Presión hidrostática de compresión . . . . .	41
4.3.	Estado de Presiones del estanque . . . . .	41

# Capítulo 1

## Descripción del Trabajo de Título

### 1.1. Introducción

Los estanques de acero han sido una pieza fundamental en diversas aplicaciones a lo largo de muchos años, destacándose principalmente el uso para el almacenamiento de recursos hídricos.

En este contexto, la presente memoria se enfoca en un minucioso estudio de un estanque corrugado empernado para una red contra incendios ubicado en Paine, perteneciente al cliente CSG Ingeniería, cuya geometría es de un diámetro de 6300 mm, altura de 4400 mm, cuyas planchas poseen un espesor de 2.5 mm.

Para el estudio realizado se elige este estanque ya que desempeña un papel crucial al contener agua en su interior, siendo destinado específicamente a una red contra incendios, por lo tanto, es parte de infraestructura que se espera estén operativos durante y posterior ocurrido un evento de emergencia. El detalle del estanque aparece en la Figura 1.1.

El análisis exhaustivo de este estanque se lleva a cabo mediante la utilización del software Ansys LS-DYNA. Se aborda inicialmente un análisis estático con el objetivo de comprender y evaluar las presiones hidrostáticas presentes en su estructura.

Este enfoque permite obtener una visión detallada de cómo el estanque responde a las fuerzas y presiones internas generadas por la presencia del agua.

Adicionalmente, se realiza un análisis sísmico del mismo estanque, en conformidad con las metodologías y recomendaciones establecidas en la norma NCh.2369 of 2003, AWWA D-103 y AWWA D-100. Este análisis sísmico proporcionará resultados fundamentales en términos de esfuerzo y deformación teóricos, contribuyendo así a una comprensión integral de la resistencia y capacidad de respuesta estructural del estanque ante eventos sísmicos.

A lo largo de este estudio se pretende evaluar el desempeño estático del estanque, con el fin de aportar valiosa información que se pueda utilizar en un futuro estudio sísmico de la estructura.



Distintas simulaciones se pueden realizar con LS-DYNA, los siguientes casos se obtuvieron de la página oficial de Ansys:

### 1.1.1. Simulación computacional de un choque de auto contra una pared

Para realizar esta simulación se crea un modelo detallado del vehículo y la pared, se definen las condiciones iniciales, como la velocidad y la dirección del impacto, se simula la interacción entre el vehículo y la pared, y se analizan los resultados para evaluar la deformación del vehículo y la estructura de la pared, así como las fuerzas experimentadas por los ocupantes. Esto permite optimizar el diseño de vehículos y estructuras para mejorar la seguridad en caso de colisión.

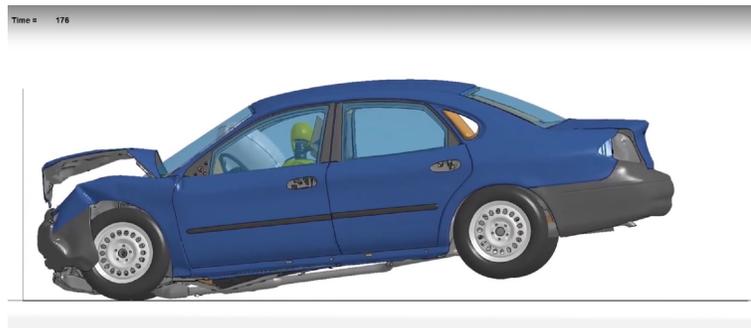


Figura 1.2: Simulación computacional de un choque de auto contra una pared

### 1.1.2. Simulación computacional de impacto en el cuello durante colisión automovilística

En esta simulación computacional se desarrolla un modelo biomecánico detallado del cuello humano y se integra en el modelo del vehículo y los ocupantes. Se definen las condiciones del accidente, como la velocidad del vehículo y el ángulo de colisión, luego se simula la interacción entre el cuello y otros componentes del cuerpo humano y las fuerzas ejercidas durante la colisión. Finalmente, se analizan los resultados para evaluar las lesiones potenciales en el cuello y se utilizan para mejorar los sistemas de seguridad del vehículo.

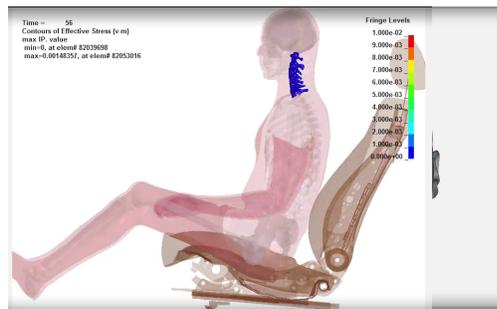


Figura 1.3: Simulación computacional de impacto en el cuello durante una colisión automovilística

### 1.1.3. Simulación computacional de presión ejercida sobre el rostro de una persona cuando utiliza una mascarilla

Para realizar esta simulación computacional se crea un modelo detallado del rostro humano y la mascarilla. Se definen las condiciones de contacto entre la mascarilla y el rostro, así como los materiales y propiedades de la mascarilla. Se simula la interacción entre la mascarilla y el rostro bajo diferentes condiciones de uso, como la respiración y los movimientos faciales, para calcular la distribución de la presión sobre el rostro. Finalmente, se analizan los resultados para evaluar la comodidad y la eficacia de la mascarilla y se realizan ajustes en el diseño si es necesario.

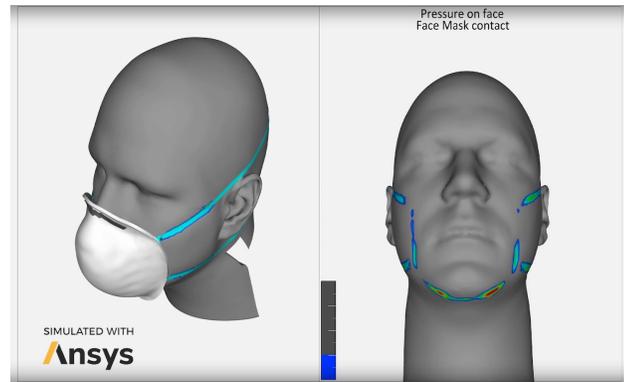


Figura 1.4: Simulación computacional de presión ejercida sobre el rostro de una persona cuando utiliza una mascarilla

En el contexto nacional, la norma NCh.2369 of 2003 emerge como un documento fundamental que establece los requisitos esenciales para el diseño sísmico de diversas estructuras e instalaciones, ya sean livianas o pesadas. Con su última edición datada en el año 2003, este documento normativo se como un pilar en la ingeniería sísmica chilena, proporcionando directrices específicas para garantizar un diseño seguro y eficiente.

Este marco normativo, detallado en el capítulo 11.8, aborda de manera específica el diseño de estanques verticales apoyados en el suelo, fabricados tanto de acero como de hormigón armado, y que albergan diversos líquidos. Dentro de este capítulo, se establecen criterios cruciales para la aplicación de normas internacionales en el diseño de estanques, requisitos detallados para el manto y los anclajes, así como demandas sísmicas tanto horizontales como verticales que deben ser rigurosamente consideradas en el proceso de diseño. Este enfoque meticuloso y específico refleja la importancia de anticipar y mitigar los efectos sísmicos en estructuras esenciales, contribuyendo así a la seguridad y resiliencia de las infraestructuras críticas en Chile.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

La realización de un modelo utilizando el software Ansys LS-DYNA de un estanque de acero corrugado empernado representa una fase crítica en la comprensión y evaluación integral de su comportamiento estructural.

Este proceso se inicia con un detallado análisis estático, que permite explorar y entender las presiones hidrostáticas que actúan sobre la estructura en condiciones de reposo. Este enfoque estático constituye la base esencial para comprender cómo el estanque responde a las fuerzas internas generadas por el contenido líquido, proporcionando así información valiosa sobre su estabilidad y resistencia en situaciones estáticas.

Para poder representar este proceso y los fenómenos físicos involucrados en el mismo, es que surge el desafío de modelar las interacciones entre el suelo, la estructura de acero corrugado, y el volumen de agua en su interior, de manera coherente entre si. Para esto, se utilizan modelos de materiales en el rango elasto-plástico tanto para la cimentación como la estructura de acero corrugado, capturando sus propiedades mecánicas y relaciones de esfuerzo-deformación.

Además, se aplican métodos ALE (*Euler Lagrange Arbitrario*) para el volumen de fluido, y métodos FSI (Interacción Fluido-Estructura) para la interacción del agua con la base y manto del estanque. Estos últimos métodos suponen un desafío en cuanto a la contención del líquido dentro de la estructura sólida y el efecto que tiene en los esfuerzos mecánicos, razón por la cual se deben aplicar mecanismos de calibración y refinamiento local del mallado en las cercanías de la estructura corrugada.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar un modelo de un estanque de acero corrugado empernado con un diámetro 6300 mm y una altura de 4400 mm, utilizando el software Ansys LS-DYNA.
- Calibrar el modelo realizado para estabilizar la presión dentro del estanque.
- Efectuar el análisis estático del estanque de acero para obtener las presiones hidrostáticas estables.
- Realizar el análisis sísmico para el mismo estanque del punto anterior, conforme a la metodología y recomendación establecidos en la norma NCh. 2369 of 2003 para obtener los resultados de esfuerzos y deformación teóricos.

### 1.3. Metodología

- Estudio de las capacidades y recursos para la aplicación del software computacional Ansys LS-DYNA.
- Determinación de la geometría, propiedades mecánicas, materiales del estanque de acero corrugado empernado más representativo para ser utilizado como elemento de estudio.
- Realizar un modelo estático del estanque en el software computacional Ansys LS-DYNA.
- Calibrar el modelo realizado para obtener presiones hidrostáticas estables.<sup>3</sup>
- Obtener un modelo estático calibrado del estanque de acero corrugado, para que posteriormente este sea utilizado para realizar un estudio sísmico.
- Revisión de la metodología, recomendaciones y criterios establecidos por la norma de diseño NCh.2369 of 2003.
- Desarrollo del cálculo de esfuerzos y deformaciones para el caso seleccionado conforme a la norma NCh.2369 of 2003.

---

<sup>3</sup> Calibrar en LS-DYNA es ajustar y validar los parámetros del modelo para reflejar con precisión el comportamiento real del sistema. Para eso se requiere iterar el modelo para ajustar los parámetros con que la estructura reacciona a la interacción con el agua. Esto implica realizar iteraciones hasta validar los valores de presión obtenidos con lo esperado teóricamente dentro de un rango aceptable, asegurando así la confiabilidad del modelo para predecir el comportamiento del sistema en diferentes situaciones.

# Capítulo 2

## Programación en Ansys LS-DYNA

### 2.1. Geometría y materiales

Para generar la geometría del perfil corrugado, se utilizó como caso de estudio un estanque para una red contra incendios en Paine, perteneciente al cliente CSG Ingeniería. Dicho corrugado es de categoría TV 68 y el plano asociado es el siguiente:

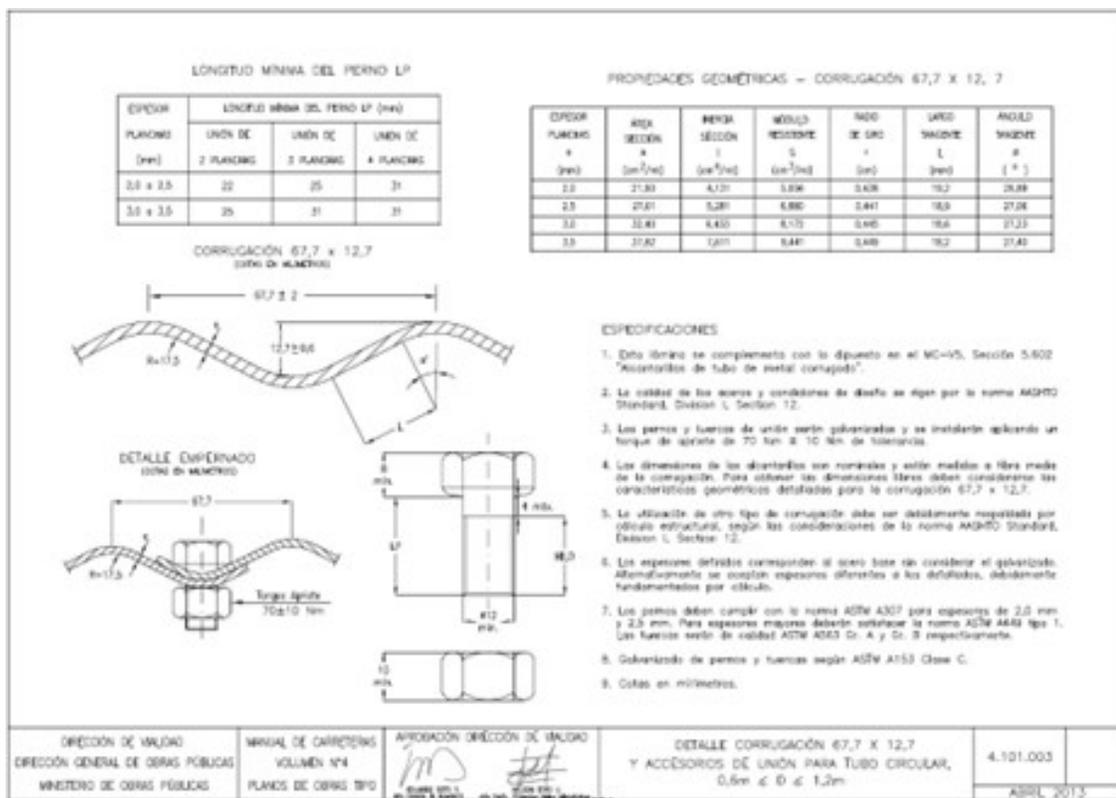


Figura 2.1: Manual de Carreteras, Volumen 4, página 58

Luego, a partir de dichos planos se hace el perfil en el programa SpaceClaim, realizando un tramo que sólo incluya 2 corrugaciones en altura, y un ángulo en arco de 5 grados.

Además, se debe considerar que en la simulación no se consideran los pernos en las uniones, si no que se modelan las planchas como un todo, por simplicidad del modelo.

Se guarda esta geometría en formato .step y luego se importa en LS PrePost. Para esto, se selecciona File > Import > STEP File. La geometría de corrugación se puede observar en la Figura 2.2.

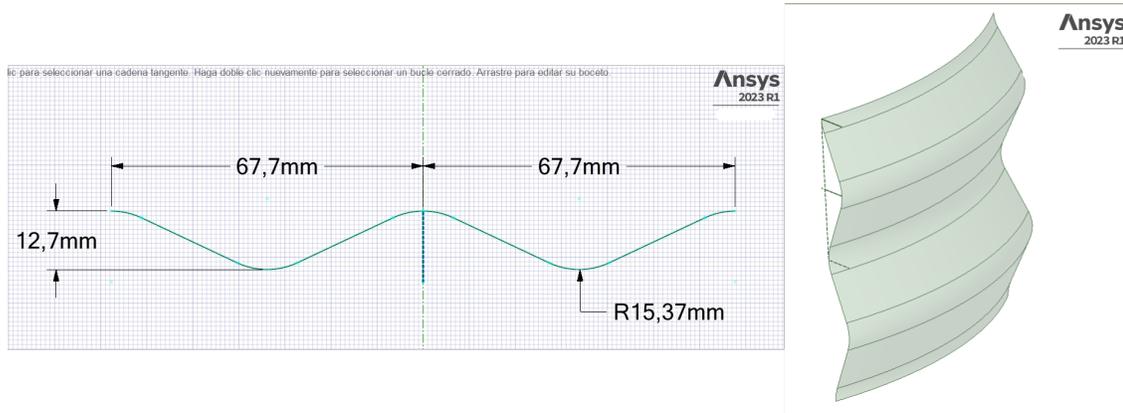


Figura 2.2: Geometría de corrugación

## 2.2. Mallado

Una vez que la geometría ha sido cargada con éxito, el siguiente paso crítico es llevar a cabo el proceso de mallado. Para iniciar este procedimiento, en la pestaña de mallado, se opta por la opción “Auto Mesher”, y se selecciona la geometría del perfil recién importado. En algunos casos, este perfil puede estar fragmentado en varias superficies, y es imperativo seleccionar todas estas superficies para garantizar un mallado completo y preciso. Como se puede apreciar en la Figura 2.3, la superficie del perfil generado presenta divisiones en cada una de las curvas que la componen, y es necesario seleccionar todas las secciones que componen el perfil corrugado.

En esta etapa, se tiene la oportunidad de especificar el tamaño de los elementos para el mallado. La elección del tamaño de elemento es esencial, ya que influye directamente en la calidad y resolución del modelo resultante. En particular, esto determinará la cantidad de elementos por cada onda de la corrugación. Después de definir este parámetro crucial, se procede a confirmar y ejecutar el mallado seleccionando la opción “Mesh > Accept”.

Este proceso de mallado es fundamental para la creación de un modelo robusto y preciso que refleje adecuadamente la geometría de la estructura. La capacidad de seleccionar y ajustar parámetros, como el tamaño de los elementos, otorga flexibilidad y control sobre la calidad del mallado final, contribuyendo así a la fiabilidad y eficacia de las simulaciones subsiguientes.

Para lograr una definición más precisa del corrugado en el modelo, utiliza la herramienta de “element tool” con la opción “Merge”. Esta función resulta fundamental para optimizar la representación del corrugado al combinar de manera adecuada los elementos individuales que conforman cada punta y valle.

Al seleccionar la opción “Merge” en la herramienta de “element tools”, se tiene la capacidad de fusionar los elementos adyacentes en cada parte del corrugado. Esta acción contribuye a simplificar y consolidar la representación de la geometría corrugada, mejorando así la fidelidad del modelo respecto a la estructura real. El resultado final es una representación más precisa y detallada de las características específicas del corrugado en la simulación, con una cantidad de 4 elementos a lo largo del perfil de 1 onda de corrugación, tal como se observa en la Figura 2.3.

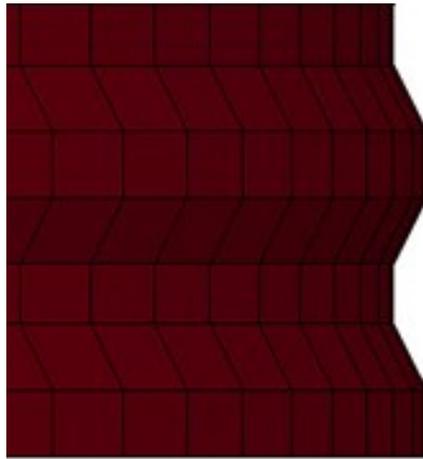


Figura 2.3: Representación computacional de una pared corrugada

Después de crear la sección inicial del estanque, se procede a replicarla para completar las dimensiones de este. Esto se logra generando copias mediante la opción “Transform > Translate”. Inicialmente, se realizan las copias en la dirección z para alcanzar la altura total del estanque. Posteriormente, utilizando la opción “Transform > Rotate”, se crean 35 copias en revolución para cerrar completamente la geometría y formar la estructura del manto del estanque en su totalidad.

Para construir la base del estanque, se accede a la pestaña de mallado y se selecciona “Element Generation”. En este proceso, se sigue una secuencia específica: “Shell > Shell by: Fill Holes > Polygon”. La función de esta herramienta es conectar mediante una superficie mallada, un contorno de elementos ya creados. Los bordes de la parte inferior se eligen y se aplican parámetros como “By edge > Prop > Ang 20”, seguido por “Create > Accept”.

Antes de avanzar a la siguiente etapa, es crucial abordar la gestión de nodos duplicados. Estos se generan al realizar copias de la malla de sección inicial, ya que los nodos de interfaz entre cada copia quedarán superpuestos y duplicados. En la pestaña de “Element Tools”, se selecciona “Duplicate nodes”, donde se lleva a cabo la operación “Show Dup Nodes > Merge Dup Nodes > Accept”. Este paso garantiza la coherencia y consistencia del modelo

eliminando cualquier redundancia en la definición de los nodos.

La fase siguiente implica la creación de secciones y asignación de materiales. Para las secciones, se utiliza la opción “Section > Shell > Add” desde el Keyword. Se especifica que el tipo de elemento “ELFORM” es 10, correspondiente al elemento del tipo Belytschko-Wong-Chiang. Se escoge este tipo debido a que es un tipo de elemento de 4 nodos usualmente recomendado para análisis estático y dinámico debido a que cuenta con 12 grados de libertad en cada nodo sin aumentar significativamente el costo computacional. También se define el espesor de la placa de acero corrugado en el parámetro “T1”. Este proceso se replica para la sección de la base, con la diferencia de que se establece un espesor diferente. Ver Figura 2.4 para los detalles del comando.

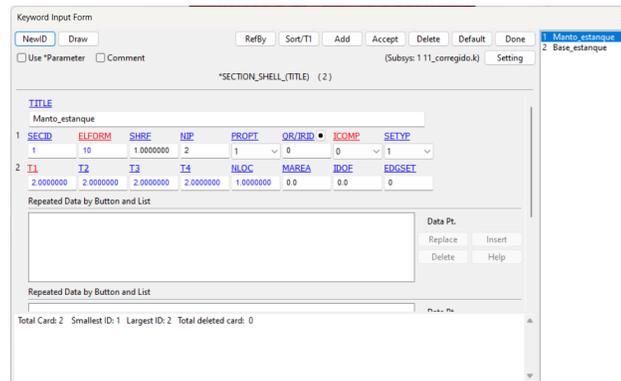


Figura 2.4: Definición de Sección

Se ajusta la malla del fluido en función de la malla del estanque para lograr una relación de aspecto máxima de 1:1.5, asegurando así una representación precisa de la corrugación en la simulación. Además, dicha relación de aspecto asegura una correcta relación entre el fluido y la estructura, de manera que asegure que no exista más de 2 elemento de fluido interactuando con un único elemento de superficie. Este enfoque secuencial y detallado en la creación del modelo es esencial para obtener resultados precisos y confiables en futuros análisis estructurales dinámicos. Para establecer la malla del fluido se definen puntos de control (ver Figura 2.5) con puntos de inicio y fin en cada eje, y la cantidad de subdivisiones en cada uno de ellos.

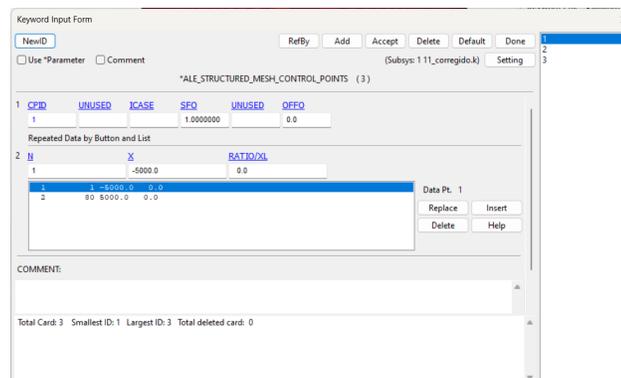


Figura 2.5: Definición de puntos de control de Malla de fluido

Para el material, se utilizan los modelos 024 -PIECWISE\_LINEAR\_PLASTICITY para el manto, donde la curva de esfuerzo-deformación del material se define a partir de la base de datos y se puede observar en la Figura 2.6. Mientras que se utiliza 008-RIGID para la base, donde las propiedades son las mismas que para el manto, extraídas de la base de datos, y las restricciones de movimiento van a depender del caso que se esté estudiando. En primera instancia se agregan restricciones translacionales en todos los ejes para el caso estático, que se deben desactivar para casos dinámicos. Luego, corresponde asignar esto a las partes, de la lista desplegable, se hace click derecho en cada parte y se selecciona Edit Keyword, ahí se asigna el material y sección correspondiente al manto y a la base. El comando para la edición de partes se muestra en la Figura 2.7.

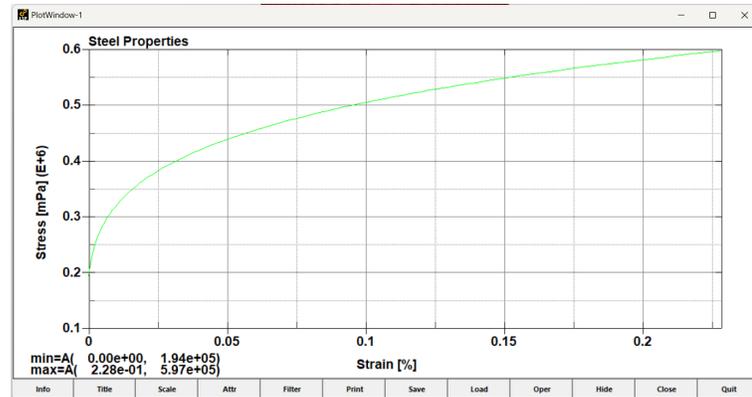


Figura 2.6: Gráfico de curva de esfuerzos para la estructura del estanque

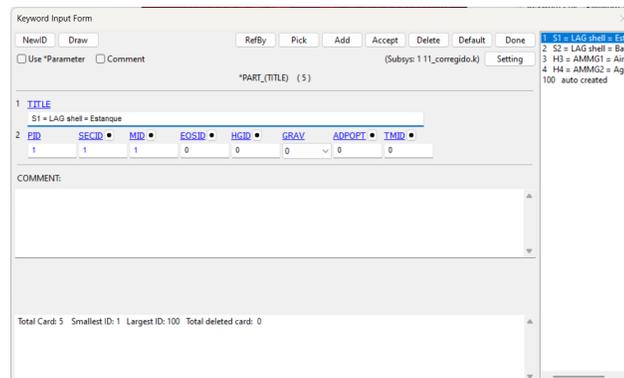


Figura 2.7: Definición de parte

Para el caso en que se quieran aplicar cargas externas, primero se debe definir la curva de aplicación. En este caso basta con definir una curva unitaria constante con 2 puntos (0,1) y (2000,1) como se muestra en la Figura 2.8 y luego al aplicar la curva el valor se incluye a partir de un multiplicador de la curva unitaria, equivalente al valor de la carga. Además, se debe definir el set de nodos sobre el que se aplicará, es importante guardar el número total de nodos que componen el set, ya que el valor total de la fuerza a aplicar se debe dividir en el N° de nodos y ese es el valor por aplicar. Un ejemplo de selección de nodos sobre un borde de la geometría, se puede apreciar como nodos amarillos en la Figura 2.9.



Figura 2.8: Gráfico de curva unitaria para aplicación de cargas

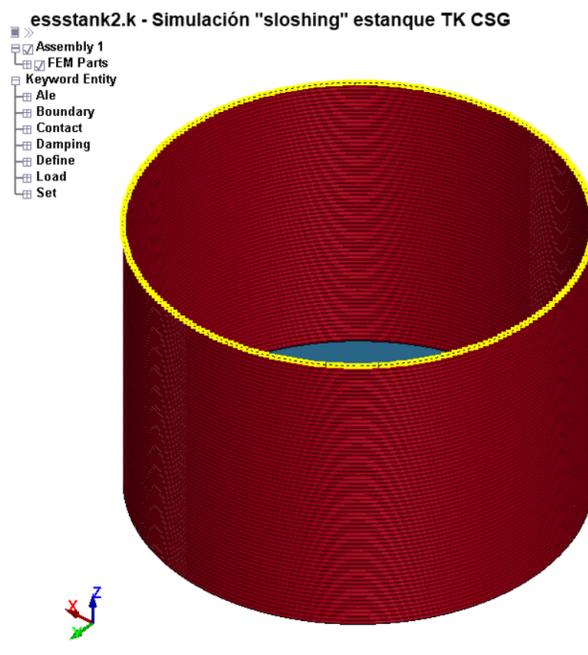


Figura 2.9: Selección de set de nodos para aplicar cargas



Por último, al trabajar con distintos tipos de fluidos, en este caso Agua y Aire, es necesario definir las condiciones iniciales en que se encuentran los volúmenes de cada uno.

En particular, para definir el volumen, se utilizan los comandos de “ALE > STRUCTURED\_MESH\_VOLUME\_FILLING” en el cual mediante operaciones de intersección de volúmenes se establecen los sectores en los que existirá aire inicialmente, y en cuales agua. Además de esto, se debe inicializar la presión hidrostática, con el comando “INITIAL > HYDROSTATIC\_ALE”, se establecen las alturas en las que se encuentra cada fluido, además de la superficie libre de cada uno. Los parámetros se muestran en la Figura 2.12.

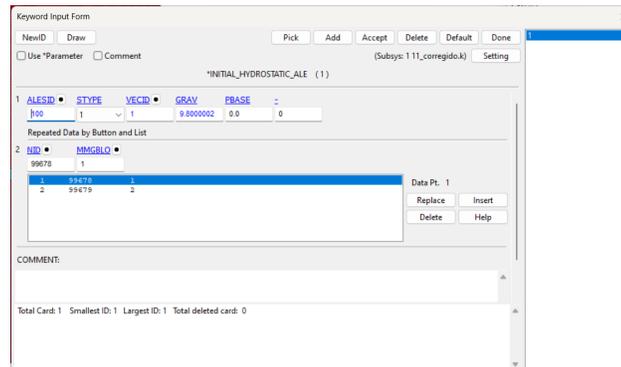


Figura 2.12: Definición de presión hidrostática inicial

Ya con todos los parámetros físicos definidos solo resta establecer los criterios de término de la simulación mediante las entradas “CONTROL > TERMINATION”. Allí se debe establecer el tiempo de término de la simulación, en este caso 10 segundos. Además se establece un criterio secundario como un número de ciclos muy elevado, ya que es únicamente una medida de seguridad para limitar las iteraciones numéricas. Los valores de dicho comando se muestran en la Figura 2.13.

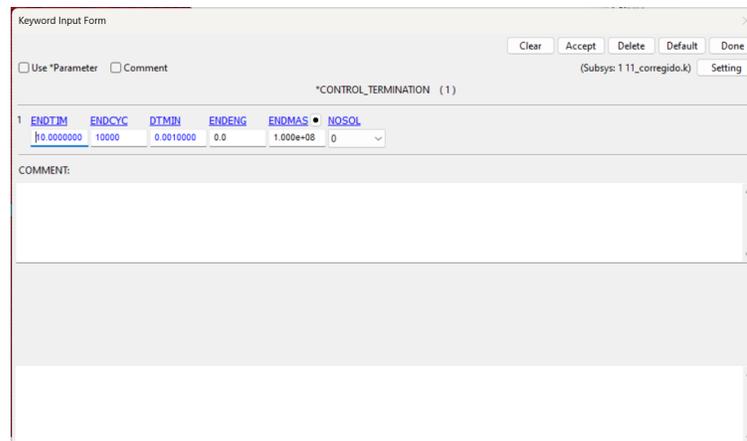


Figura 2.13: Definición de criterio de término de la simulación

## 2.3. Metodología de Calibración

Para lograr la estabilización del perfil de presión hidrostático, se requiere realizar la calibración de dos parámetros esenciales en el modelo. En primer lugar, se aborda el parámetro PFAC, que se encuentra dentro de la entrada “ALE>ESTRUCTURED\_FSI”. Este parámetro corresponde al “factor de penalización” de la interacción fluido-estructura y su propósito es escalar la rigidez estimada de la estructura y con ello la fuerza de reacción que esta generará sobre el fluido, además, evita problemas tales como filtraciones del fluido a través de la estructura o un sobre dimensionamiento en la presión de reacción.

Ajustar este parámetro es crucial para garantizar una respuesta adecuada del modelo a las condiciones específicas del problema, permitiendo así una representación más fiel del perfil de presión hidrostático al distribuir las fuerzas de acoplamiento entre la estructura y los elementos de fluido. La calibración precisa de “PFAC” contribuye a optimizar la simulación y a mejorar la coherencia de los resultados obtenidos.

Además, se debe prestar atención a la entrada de “DAMPING>PART\_MASS”. Calibrar este parámetro es fundamental para controlar y mitigar las oscilaciones no deseadas en el sistema. El ajuste adecuado de la masa de las partículas contribuye significativamente a estabilizar el comportamiento del modelo y a evitar fenómenos oscilatorios innecesarios que podrían afectar la precisión de los resultados. Este proceso de calibración de la masa juega un papel clave en la optimización general del rendimiento del modelo en presencia de cargas hidrostáticas.

La combinación cuidadosa de estos dos ajustes, PFAC y “DAMPING>PART\_MASS”, permite alcanzar un equilibrio crucial en el comportamiento del modelo, logrando así la estabilización efectiva del perfil de presión hidrostático. Estos ajustes y calibraciones precisas son esenciales para garantizar que el modelo represente de manera adecuada las condiciones reales del sistema.

### 2.3.1. PFAC

PFAC es un parámetro que evita que ocurra la penetración de fluido a través de la estructura, esta penalización debe ser mayor a medida que el fluido pase a través de las paredes del manto del estanque. El valor máximo de la curva que se debe utilizar, se encuentra realizando la misma simulación con el parámetro predefinido de PFAC, correspondiente a 0.1.

Cuando no se detecta penetración, la penalización será 0, y a medida que la penetración sea mayor, se obtiene una penalización más grande, es por esto que se utiliza una curva creciente.

Por una parte, para calibrar el parámetro PFAC se siguen los siguientes pasos

1. Se corre una simulación con el valor por defecto del parámetro PFAC correspondiente a 0.1 por algunos time steps. Este es un valor subdimensionado que considera el peor caso, por lo que se pueden generar filtraciones.
2. A partir de los resultados de dicha simulación, se grafican los contornos de presión y se busca el valor de presión máxima obtenido en el volumen de fluido.
3. Se define una recta de 2 puntos mediante DEFINE>CURVE, donde el eje x corresponde a la penetración del fluido, y el eje de las ordenadas corresponde a la presión de reacción de la estructura. Se deben definir los siguientes puntos:
  - $(x1,y1) = (0,0)$ . Este punto inicial representa el caso base en el que no hay penetración del fluido, por lo tanto la estructura no ejerce reacción alguna.
  - $x2 = 0,1 \cdot \min \text{ ALE elem width}$ . La penetración máxima admitida se define como el ancho mínimo de elemento ALE. Para esto, se debe corroborar el elemento de fluido con menor dimensión y registrar dicho valor.
  - $y2 = \text{Valor de presión máxima encontrado}$ . Este valor se obtiene de la simulación inicial mencionada anteriormente.

El gráfico obtenido para la simulación computacional es el siguiente:

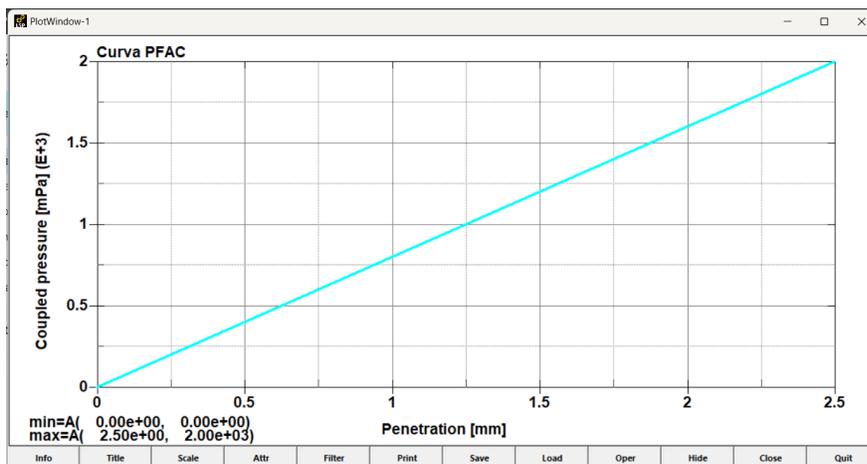


Figura 2.14: Curva de parámetro PFAC

Es importante notar que debido al carácter lineal que posee el fenómeno de presión hidrostática, es que el factor de penalización que tiene relación directa con el perfil de presión, cumple con el mismo comportamiento lineal.

4. Luego, para poder aplicar de esta forma efectiva, en la entrada de “ALE>STRUCTURED\_FSI”, en el parámetro PFAC, se selecciona la curva creada como -ID\_CURVA, tal como se muestra en la Figura 2.15.

Keyword Input Form

NewID:  Pick Add Accept Delete Default Done 5 (0)

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 11\_corregido.k) Setting

\*ALE\_STRUCTURED\_FSI (1)

COUPID	TITLE
0	
2	LSTRSID • ALESID • LSTRSTYP ALESTYP - - - MCOUP •
12	100 0 1 -22
3	START END PFAC • FRIC • - ELIP
0.0	0.0 -3 1

COMMENT:

PFAC:=Penalty factor. PFAC is a scale factor for scaling the estimated stiffness of the interacting(coupling) system.It is used to compute the coupling forces to be distributed on the Lagrangian and ALE parts.  
 GT.0:Fraction of estimated critical stiffness.  
 LT.1:PFAC must be an integer, and PFAC is a load curve ID. The curve defines the coupling pressure on the axis as a function of the penetration along the axis.

Figura 2.15: Definición de FSI y parámetro PFAC

### 2.3.2. DAMPING

El software LS Dyna fue desarrollado esencialmente para sistemas en movimiento y casos de impacto. Es por esto que independiente de si se quieren realizar análisis estáticos, se incluirán perturbaciones en las ecuaciones a resolver, generando oscilaciones en el sistema. Esto quiere decir que la solución a la que llegará el modelo será la misma, pero con oscilaciones en torno a dicha solución. Por lo tanto, para analizar un caso estático es necesario incluir un damping o amortiguamiento a dichas oscilaciones, para que se muestre únicamente la solución estática.

El término de damping desempeña un papel crucial en la estabilización del modelo al introducir un componente negativo en el cálculo de la aceleración de algunos de los elementos. Este mecanismo se lleva a cabo mediante la incorporación de puntos adicionales con una “masa” estratégicamente asignada. Estos puntos actúan generando una aceleración contraria al movimiento oscilatorio inherente al modelo, contrarrestando efectivamente dicho movimiento, dando como resultado la solución base en torno a la que oscila el modelo.

La adición de puntos con “masa” y la generación de una aceleración opuesta contribuyen a amortiguar las oscilaciones no deseadas en el sistema. En esencia, el damping actúa como una fuerza de resistencia que limita y controla las fluctuaciones, mejorando así la estabilidad del modelo. Este enfoque es particularmente valioso en simulaciones estáticas donde las oscilaciones pueden introducir errores o distorsiones en los resultados cuando estos se muestran a lo largo de una serie de tiempo.

Al comprender el papel del damping, los ingenieros pueden ajustar adecuadamente los parámetros asociados, como la masa de los puntos de damping, para lograr el equilibrio óptimo entre estabilidad y precisión en la simulación. Este proceso de contrarrestar las oscilaciones mediante la introducción controlada de fuerzas de damping es esencial para obtener resultados confiables y realistas en análisis estructurales estáticos.

1. Una vez calibrado el PFAC, se debe encontrar un valor de DAMPING que logre estabilizar el perfil hidrostático y evitar que presente oscilaciones. Para esto se crea la entrada de “DAMPING>PART\_MASS” y allí en el parámetro LCID se debe definir una nueva curva de carga, con “NewKwd>DEFINE>CURVE”.
2. Esta curva creada debe ser una curva unitaria que aplique el valor de damping por alrededor de 1 segundo. Es por esto que se define a partir de los siguientes puntos en lo que representa un gráfico de Damping v/s Tiempo:
  - Punto 1: (0,0) - Se inicializa la curva.
  - Punto 2: (0.5,1) - Se aplica la curva en medio segundo.
  - Punto 3: (1,0) - Se descarga la curva en otro medio segundo.
  - Punto 4: (2000,0) - Se mantiene la curva descargada para evitar errores.

La aplicación se hace de esta forma para amortiguar las oscilaciones al comienzo de la resolución del modelo, y que estas vayan decayendo con el paso de los time step, y también evitar un sobre amortiguamiento si es que se aplica por un tiempo muy prolongado. La curva en el programa se ve de la siguiente manera:

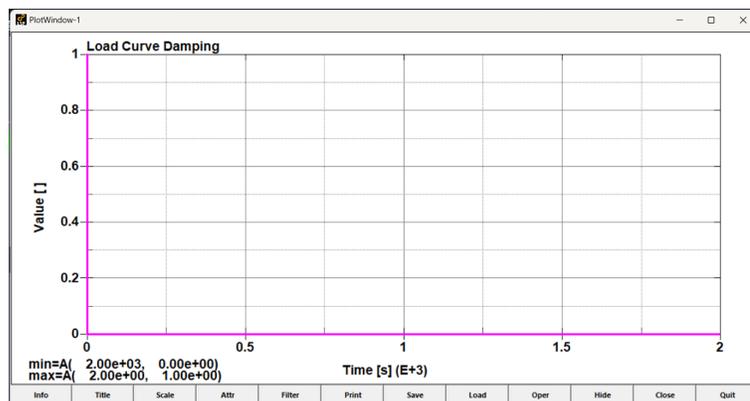


Figura 2.16: Curva de aplicación del damping

Se puede ver que es una curva similar a un pulso en los tiempos iniciales, y luego es igual a 0.

3. Una vez creada la curva, nuevamente en la entrada de PART\_MASS, se debe definir el factor de escalamiento como SF. Como se definió una curva unitaria, este parámetro SF es el que entregará el valor de damping utilizado al amplificar el eje de las ordenadas de la curva, en la siguiente entrada:

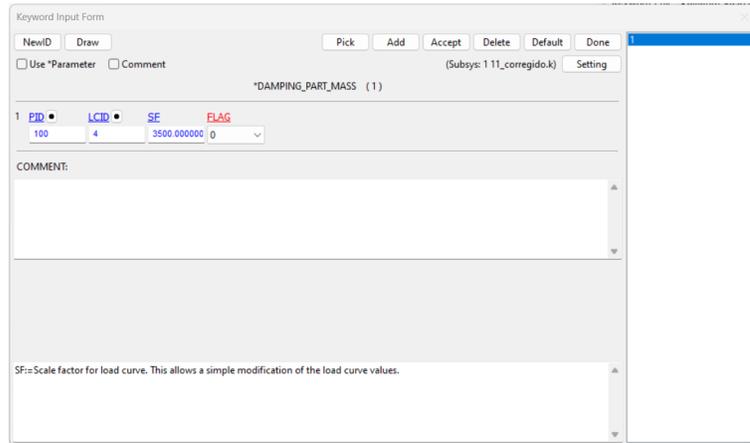


Figura 2.17: Definición del damping

4. Se debe comenzar con un valor de damping, correr la simulación y verificar que el perfil hidrostático esté estabilizado. En caso de que no ocurra y se sigan presentando oscilaciones, se debe iterar sobre el valor del parámetro SF hasta que se tenga un perfil estabilizado con oscilaciones amortiguadas. Para este caso se utiliza un damping de 3500.

## 2.4. Extracción de Resultados

Para poder extraer resultados de manera correcta, se debe realizar un post procesamiento en LS-PrePost, que consiste en abrir un nuevo archivo de formato .d3plot que contiene todos los steps de resultados guardados. Allí se deben realizar los siguientes pasos:

1. Abrir el archivo d3dump en el post-procesador. Para seleccionar los elementos y partes que se quieran visualizar, se debe abrir la pestaña de Assembly and Select Part. Se selecciona la casilla de Fluid(Ale) y aparecen en la lista los cuerpos del fluido y la estructura del estanque. Se selecciona el cuerpo sobre el cual se quiera realizar el análisis.
2. Luego, para analizar los contornos de presión o esfuerzos en algún cuerpo/estructura, se selecciona "Post>Fringe Component". Aparece un listado de propiedades, como por ejemplo, PRESSURE o EQUIVALENT VON MISES STRESS, para visualizar se seleccionan y luego se aprieta Done.
3. En caso de querer ver una vista de corte, se debe volver a Assembly and Select Part, seleccionar únicamente la malla ALE, y mediante la herramienta de "Element Tools>Blank", se selecciona la mitad del dominio, haciendo un corte por la mitad. Una vez realizado esto, se puede volver a seleccionar los cuerpos a analizar tales como el agua o bien la estructura.



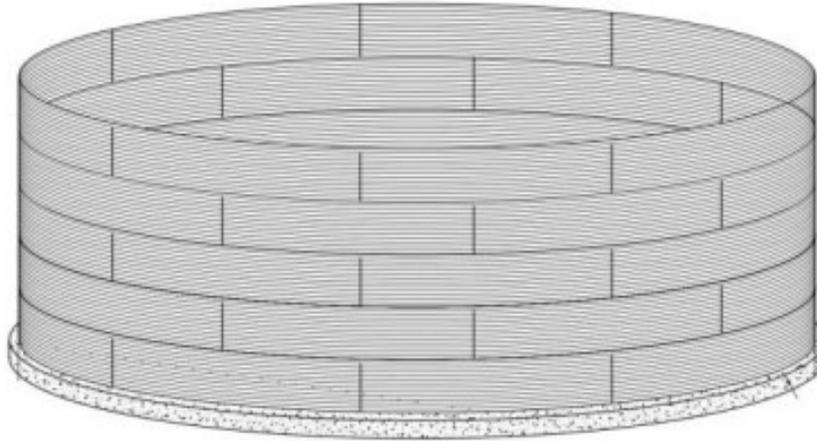


Figura 3.2: Configuración de planchas de un estanque en estudio de 5 anillos

La fundación del estanque se compone de un anillo de hormigón armado G-30, con un ancho de fundación de 550 mm. y una profundidad de 450 mm. El estanque se une a la fundación mediante silla de anclaje y esto se modela como empotrado.

### 3.1.2. Diseño Estructural

El diseño del estanque se lleva a cabo a partir de una evaluación de la estructura según las dimensiones y procedimientos entregados por las normas nacionales e internacionales.

### 3.1.3. Consideraciones Estructurales

Para el estudio del estanque de acero emperrado, se consideran una serie de caracterizaciones estructurales, dentro de estas se encuentran la geometría del estanque, la caracterización de elementos del manto, consideración de la revancha y los parámetros sísmicos.

#### 3.1.3.1. Caracterización del Estanque

En la Tabla 3.1 se encuentran los valores que se consideraron para la altura del líquido, la cual se define con la revancha calculada utilizando la siguiente fórmula, la cual se obtiene del procedimiento API 650 2012 para determinar la altura de la Ola Sísmica:

$$\delta_s = 0.5 \cdot D \cdot A_c = 0.5 \cdot 6.3m \cdot 0.06g = 0.19m \quad (3.1)$$

Donde:

D: Diámetro del estanque. [m]

$A_c$ : Aceleración sísmica del modo convectivo. [m/s<sup>2</sup>]

Además, según el punto 11.8.14 de la norma NCh 2369, la revancha entre la superficie libre del líquido y la estructura del techo debe ser mayor o igual que la altura de ola del modo convectivo calculado con la ecuación antes descrita. Debido al cálculo realizado y considerando un anillo de estanque mide 0.88 m, se decide utilizar una revancha de 0.44 m

Tabla 3.1: Caracterización del Estanque en estudio

Revancha, $\delta_s$	0.44 m
Altura del Líquido, $H_L$	3.96 m
Diámetro, D	6.30 m
Altura Total Estanque, $H_T$	4.40 m
Capacidad de Diseño $V_L$	137.16 $m^3$
Densidad del Líquido Contenido, $\gamma_W$	1000 $kg/m^3$

### 3.1.3.2. Caracterización de elementos del manto

En la Tabla 3.2 se muestran los parámetros que caracterizan los elementos que componen el estanque en estudio, se indica la calidad del acero, esfuerzo de fluencia para evaluar el máximo esfuerzo que un material puede soportar sin experimentar deformación plástica continua, esfuerzo de rotura para evaluar el esfuerzo máximo que el estanque soporta antes de la ruptura, módulo de young para predecir cómo se deformará.

Tabla 3.2: Caracterización de los Elementos del Estanque

Calidad del Acero (ASTM)	A1011 (Gr.36)
Esfuerzo de Fluencia, $F_Y$	250 MPa
Esfuerzo de Rotura, $F_u$	400 MPa
Módulo de Young, E	200000 MPa

En la Tabla 3.3 se caracterizan los elementos correspondientes a la plancha del estanque, donde se indica el tipo de corrugación, longitud de onda, altura de onda, desarrollo de plancha y radio de curvatura.

Tabla 3.3: Caracterización de la Plancha del Estanque

Tipo de Corrugación	TV-68
Distancia entre Crestas (Long. de Onda), $l_w$	68 mm
Altura de Onda, $h_w$	12.7 mm
Desarrollo de la Plancha, $l_D$	888 mm
Radio de Curvatura, R	3.15 m

En la Tabla 3.4 se caracteriza el tipo de conexión, la cual en este caso es reforzada, lo cual significa que presenta doble costuras entre planchas.

Tabla 3.4: Caracterización de los Pernos

Tipo de Conexión	Reforzada
Calidad Perno (ASTM)	A325
Diámetro del Perno, $d_B$	1/2 in
Espaciamiento Vertical entre pernos, $S_V$	68 mm
Espaciamiento Horizontal entre pernos, N	314 mm

### 3.1.3.3. Parámetros Sísmicos

En la Tabla 3.5 se muestran los parámetros sísmicos a utilizar, la clasificación de la estructura, según el capítulo 4.3.1 de la norma NCh 2369 correspondiente en este caso a C1, correspondiente a una obra crítica ya que el estanque en estudio debe encontrarse operativo en caso de incendio, siendo 1.2 el valor del coeficiente de importancia.

En cuanto a la zona sísmica, el estanque se encuentra ubicado en Paine, correspondiente a la región Metropolitana, lo cual según la Tabla 5.1 de la norma NCh 2369, corresponde a zona sísmica 2. Según la Tabla 5.3 de la norma NCh 2369, el tipo de suelo correspondiente al lugar donde se encuentra ubicado el estanque es II, ya que es un suelo de grava densa.

Tabla 3.5: Parámetros Sísmicos

Clasificación de la Estructura	C1
Coeficiente de Importancia, I	1.20
Zona Sísmica	2
Tipo de Suelo	II

## 3.2. Cargas

### 3.2.1. Combinaciones de Carga

Para el diseño del estanque se definen las combinaciones de cargas según lo indicado por la norma NCh 3171.Of10 para el diseño LRFD:

$$C1: 1.2 D + 0 F + 1.4 E + 0 W + 1 L + 0 Lr + 1 S$$

$$C2: 1.2 D + 1.2 F + 1.4 E + 0 W + 1 L + 0 Lr + 0.2 S$$

$$C3: 1.2 D + 1.2 F + 0 E + 1.6 W + 1 L + 0.5 Lr + 0.5 S$$

$$C4: 1.2 D + 1.2 F + 0 E + 0.8 W + 0 L + 1.6 Lr + 1.6 S$$

$$C5: 0.9 D + 0 F + 0 E + 1.6 W + 0 L + 0 Lr + 0 S$$

$$C6: 0.9 D + 0 F + 1.4 E + 0 W + 0 L + 0 Lr + 0 S$$

Donde:

D: Cargas Permanentes.

F: Cargas debido a líquidos.

E: Cargas Sísmicas Según NCh 2369.

W: Cargas de Viento Según NCh 432.

L: Cargas de Uso según NCh 1537.

Lr: Cargas de Uso de Techo según NCh 1537.

S: Cargas de Nieve según NCh 432.

### 3.2.2. Cargas Permanentes

- Peso del Manto del Estanque,  $W_s = 1.7$  ton
- Peso Accesorios del Manto (Conexiones + Escalera),  $W_{SA} = 0.1$  ton
- Peso del Techo del Estanque,  $W_R = 0$  ton
- Peso Accesorios del Techo,  $W_{RA} = 0$  ton
- Peso Contenidos del Estanque,  $W_{TC} = 123.3$  ton

### 3.2.3. Cargas de Agua

Las tensiones producidas por agua en un estanque son aplicadas principalmente en el manto del mismo. La norma AWWA D103-09 define en la Sección 14.3.4.2.3 que las siguientes ecuaciones para determinar las cargas de agua:

$$\sigma_{w-Tot_i} = \sigma_{w_i} + \sigma_{S_i} \quad (3.2)$$

Donde:

$\sigma_{HTot_i}$ : Presión Total por cargas de agua en el anillo “i”. [MPa].

$\sigma_{w_i}$ : Presión Hidrostática en el anillo “i”. [MPa].

$\sigma_{S_i}$ : Presión Hidrodinámica en el anillo “i”. [MPa].

$t_{S-i}$ : Espesor del anillo en estudio. [mm].

La presión hidrostática se define a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_W = \frac{N_h}{t_{S-i}} \quad (3.3)$$

En donde  $N_h$  se define a partir de la siguiente ecuación:

$$N_h = \frac{9.81 \cdot \gamma_W \cdot G \cdot Y \cdot D}{2} \quad (3.4)$$

Donde:

$N_h$ : Fuerza Hidrostática por unidad de longitud. [N/m].

$\gamma_W$ : Densidad del agua.  $\gamma_W = 1000 [kg/m^3]$

G: Gravedad específica del agua.  $G = 1.0 [-]$

Y: Distancia desde el nivel max. del agua al punto en estudio. [m]

D: Diámetro del estanque. [m]

Por otro lado, la presión hidrodinámica se define a partir de la ecuación 14-38 de la norma AWWA D103-09:

$$\sigma_S = \frac{\sqrt{N_i^2 + N_c^2 + (N_h \cdot A_v)^2}}{t_{S-i}} \quad (3.5)$$

Donde:

$N_i$ : Fuerza por unidad de longitud de la componente impulsiva. [N/m]

$N_c$ : Fuerza por unidad de longitud de la componente convectiva. [N/m]

$A_v$ : Aceleración vertical según punto 11.8.9. de norma NCh2369. [ $m/s^2$ ]

Respecto al parámetro  $N_i$ , se define a partir de las ecuaciones 14-39, 14-40 y 14-41 de la norma AWWA D103-09. Por otro lado, el parámetro  $N_c$  se define según la ecuación 14-42 de la misma.

### 3.2.4. Aceleraciones Sísmicas

Las aceleraciones sísmicas para estanques de acero se definen en el punto 11.8.8 de la norma NCh2369. Para el caso de la aceleración impulsiva, se tiene que:

$$A_i = I \cdot C_{max}(R = 4; \varepsilon = \varepsilon_i) \quad (3.6)$$

Donde:

$A_i$ : Aceleración sísmica del modo impulsivo. [ $m/s^2$ ]

I: Factor de importancia del Sismo. 1.20 [-]

$C_{max}$ : Coeficiente Sísmico Máximo dado por la Tabla 5.7 de la NCh2369.  $C_{max} = 0.32$  [ $m/s^2$ ]

R: Factor de modificación de la respuesta estructural. [-]

$\varepsilon_i$ : Amortiguamiento del modo de vibrar impulsivo.  $\varepsilon_i = 0.02$  [%]

Para determinar la aceleración sísmica convectiva se utiliza la siguiente expresión obtenida como resultado de las ecuaciones de la sección 5.3.2 de la norma NCh2369:

$$A_c = I \cdot \left( \frac{2.75 \cdot A_0}{g \cdot R} \cdot \left( \frac{T'}{T^*} \right)^n \cdot \left( \frac{0.05}{\varepsilon_c} \right)^{0.4} \right) \geq I \cdot 0.1 \cdot A_0 \quad (3.7)$$

Donde:

$A_c$ : Aceleración sísmica del modo convectivo. [ $m/s^2$ ]

$A_0$ : Aceleración efectiva máxima del suelo (Tabla 5.2 - NCh2369).  $A_0 = 0.30g$

g: Aceleración de gravedad.  $g = 9.81$  [ $m/s^2$ ]

$T'$ : Parámetro dependiente del tipo de suelo (Tabla 5.4 - NCh2369).  $T' = 0.35$  [s]

n: Parámetro dependiente del tipo de suelo (Tabla 5.4 - NCh2369).  $n = 1.3$  [-]

$T^*$ : Primer período de vibrar de la componente Convectiva. [s]

$\varepsilon_c$ : Amortiguamiento del modo de vibrar convectivo.  $\varepsilon_i = 0.05$  [%]

El parámetro  $T^*$  se define a partir de la ecuación 14-18 de la norma AWWA D103-09, la cual indica que:

$$T^* = \sqrt{\frac{D}{3.68 \cdot g \cdot \left( \frac{3.68 \cdot H_L}{D} \right)}} \quad (3.8)$$

Donde:

D: Diámetro del estanque. [m]

$H_L$ : Altura de líquido contenida [m]

Por último, la aceleración vertical es definida en el punto 11.8.9 de la norma NCh2369 a través de la siguiente expresión:

$$A_v = \frac{2}{3} \cdot A_i \quad (3.9)$$

En base a las ecuaciones antes descritas, se tienen las siguientes aceleraciones impulsivas, convectivas y verticales:

Tabla 3.6: Aceleración Impulsiva, Convectiva y Vertical

Aceleración Impulsiva, $A_i$	0.38 g
Aceleración Convectiva, $A_c$	0.06 g
Aceleración Vertical, $A_v$	0.26 g

### 3.3. Verificaciones

Se estudian las verificaciones del estanque, primero se considera la condición sin anclaje para el cálculo del momento volcante.

El estanque no tiene techo, por lo tanto, las cargas de techo y nieve, no se consideran en el cálculo.

#### 3.3.1. Volcamiento

El momento volcante para estanques sin sistema de anclaje para solicitaciones sísmicas, se define según la norma AWWA mediante la ecuación 14-19:

$$M_V = \sqrt{[A_i(W_S \cdot X_S + (W_R + S \cdot A_E) \cdot H_{ts} + W_i \cdot X_i)^2 + [A_C \cdot W_C \cdot X_C]^2} \quad (3.10)$$

Donde:

$A_i$ : Aceleración sísmica del modo impulsivo. [ $m/s^2$ ]

$A_c$ : Aceleración sísmica del modo convectivo. [ $m/s^2$ ]

$W_s$ : Peso del manto junto con los accesorios. [kN]

$W_R$ : Peso de las planchas de techo, cerchas y accesorios. [kN]

$W_i$ : Peso de las componentes impulsivas del estanque. [kN]

$W_c$ : Peso de las componentes convectivas del estanque. [kN]

$X_S$ : Altura del centro de gravedad del manto del estanque. [m]

$X_i$ : Altura del punto de aplicación de la fuerza lateral impulsiva. [m]

$X_c$ : Altura del punto de aplicación de la fuerza lateral convectiva. [m]

$H_{ts}$ : Altra total del manto del estanque. [m]

$S$ : Presión por cargas de nieve sobre el techo del estanque. [kPa]

$L_R$ : Presión por sobrecarga de uso en el techo del estanque. [kPa]

$A_E$ : Área transversal del estanque. [ $m^2$ ]

Los parámetros  $W_i$ ,  $W_c$ ,  $X_i$  y  $X_c$  anteriormente definidos se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$W_i = \frac{\tanh(0.866\alpha)}{0.866\alpha} \cdot W_{TC} \quad (3.11)$$

$$W_c = 0.23\alpha \cdot \tanh\left(\frac{3.67}{\alpha}\right) \cdot W_{TC} \quad (3.12)$$

$$X_i = Si \left\{ \begin{array}{l} \frac{D}{H_L} \geq 1.33 \rightarrow 0.375 \cdot H_L \\ \frac{D}{H_L} < 1.33 \rightarrow \left[0.5 - 0.094 \frac{D}{H_L}\right] \cdot H_L \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

$$X_c = \left[ 1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H_L}{D}\right) - 1}{\frac{3.67H_L}{D} \cdot \sinh\left(\frac{3.67H_L}{D}\right)} \right] \cdot H_L \quad (3.14)$$

Donde:

$\alpha$ : Razón diámetro (D) / Altura de líquido ( $H_L$ ). [-]

$W_{TC}$ : Peso total de los contenidos del estanque. [kN]

Por otro lado, el momento volcante relacionado con las solicitaciones de viento se define a partir de la siguiente ecuación:

$$M_V = \sigma_{V-manto} \cdot (H_{tS} \cdot D) \cdot X_S + \sigma_{VrH} \cdot A_{pr} \cdot H_{tS} \quad (3.15)$$

Donde:

$\sigma_{v-manto}$ : Presión de viento en el manto del estanque. [kPa]

$\sigma_{VrH}$ : Proyección horizontal de la presión de viento en el techo. [kPa]

$A_{pr}$ : Área de aplicación de la carga de viento. [ $m^2$ ]

Tomando en cuenta lo anterior, se definen los momentos volcantes en base a las combinaciones de carga y sus coeficientes, mostrados en la sección 3.2.1:

- Peso de los Contenidos,  $W_{TC} = 1210$  kN
- Peso Impulsivo Efectivo,  $W_i = 773$  kN
- Peso Convectivo Efectivo,  $W_c = 434$  kN
- Altura de Aplicación Fuerza Sísmica Impulsiva,  $X_i = 1.48$  m
- Altura de Aplicación Fuerza Sísmica Convectiva,  $X_c = 2.55$  m
- Centro de Gravedad del Manto,  $X_s = 2.20$  m
- Momento volcante (combinación 1),  $M_{v1} = 105$  kN-m
- Momento volcante (combinación 2),  $M_{v2} = 572$  kN-m
- Momento volcante (combinación 3),  $M_{v3} = 239$  kN-m

- Momento volcante (Combinación 4),  $M_{v4} = 119$  kN-m

Posteriormente, se define el momento volcante resistente a partir de la siguiente expresión:

$$M_R = W_{comb-i} \cdot \frac{D}{2} + \left( \frac{W_L}{1000} \cdot \pi \cdot D \right) \cdot D/2 \quad (3.16)$$

Donde:

$W_{comb-i}$ : Pesos del estanque, contenidos y nieve según combinación de cargas. [kN/m]

$W_L$ : Fuerza resistente de los contenidos por unidad de largo de manto. [kN/m]

La fuerza distribuida que la porción de los contenidos aportan a la resistencia del volcamiento ( $W_L$ ) es definida en la ecuación (14-33) de la norma AWWA D103-09:

$$W_L = 99t_b\sqrt{F_yH_LG} \geq 201.1H_LDG \quad (3.17)$$

Donde:

$t_b$ : Espesor del anillo basal del estanque. [mm]

$F_y$ : Tensión de fluencia del anillo basal. [MPa]

En base a las ecuaciones mostradas anteriormente, y teniendo en cuenta las diferentes combinaciones de carga con sus coeficientes de mayoración, se puede verificar el volcamiento del estanque considerando el líquido contenido a partir de los siguientes datos:

- Combinación de carga crítica, C2
- Carga Muerta-Manto,  $D_s = 17.3$  kN
- Carga Muerta-Techo,  $D_R = 0$  kN
- Peso Total por nieve,  $D_{sw} = 0$  kN
- Fuerza resistente de los contenidos,  $W_L = 8257$  N/m
- Momento volcante,  $M_v = 554$  kN-m
- Momento Resistente,  $M_R = 569$  kN-m
- Factor de seguridad,  $F.S. = 1.03$
- Factor de seguridad mínimo,  $F.S._{MIN} = 1.50$

En conclusión, el estanque vuelca, de acuerdo a los cálculos realizados, se puede notar que el estanque durante su fase de operación entrega un factor de seguridad menor al requerido, por lo que se concluye que no es capaz de tomar el momento volcante sin sistema de anclaje.

Por otro lado, se verifica el volcamiento del estanque al considerarlo en condición vacía:

- Combinación de carga Crítica, C1
- Peso del Manto+Accesorios,  $D_S = 17.3$  kN
- Peso del Techo+Accesorios,  $D_R = 0$  kN
- Peso Total de nieve,  $D_{SW} = 0$  kN
- Fuerza resistente de los contenidos,  $W_L = 0$  N/m
- Momento Volcante,  $M_v = 96$  kN-m
- Momento Resistente,  $M_R = 55$  kN-m
- Factor de seguridad,  $F.S. = 0.60$
- Factor de seguridad mínimo,  $F.S._{MIN} = 1.50$

Se concluye que el estanque vuelca, se tiene para el caso vacío que el estanque presenta un factor de seguridad menor al requerido en el caso vacío, por lo que no es capaz de tomar los momentos volcantes sin la ayuda de un sistema de anclajes.

### 3.3.2. Deslizamiento

La norma AWWA D103-09 define procedimientos para verificar el deslizamiento de estanques sin considerar el sistema de anclaje. Considerando lo anterior, en la ecuación (14-27) del documento se define el corte basal según la siguiente fórmula:

$$Q_0 = \sqrt{[A_i(W_S + W_R + S \cdot A_E + W_i)]^2 + [A_C \cdot W_C]^2} \quad (3.18)$$

Los parámetros utilizados en la ecuación fueron definidos en la sección 3.3.1. Por otro lado, el corte basal admisible se define según la ecuación (14-53) de la norma AWWA:

$$V_{ALLOW} = \tan 30^\circ \cdot [W_S + W_R + S \cdot A_E + W_i + W_c] \cdot (1 - 0.4 \cdot A_v) \quad (3.19)$$

Al igual que para el corte basal, los parámetros fueron definidos anteriormente. Se verifica entonces el deslizamiento del estanque considerando los contenidos, para las diferentes combinaciones de carga y coeficientes de mayoración para las sollicitaciones y tensión admisible.

- Combinación de carga crítica, C2
- Corte basal,  $Q_0 = 365$  kN
- Aceleración sísmica vertical,  $A_v = 2.51$   $m/s^2$
- Corte basal admisible,  $V_{ALLOW} = 743$  kN
- Factor de seguridad,  $F.S. = 2.03$
- Factor de seguridad mínimo,  $F.S._{MIN} = 1.10$

Se tiene entonces que el estanque no desliza ya que el factor de seguridad es mayor que el mínimo exigido.

Por otro lado, se verifica el deslizamiento para el estanque en condición vacía:

- Combinación de carga crítica, C1
- Corte basal,  $Q_0 = 38$  kN
- Aceleración sísmica vertical,  $A_v = 2.51$  m/s<sup>2</sup>
- Corte basal admisible,  $V_{ALLOW} = 23$  kN
- Factor de seguridad, F.S. = 0.33
- Factor de seguridad admisible,  $F.S._{MIN} = 1.10$

A partir de lo anterior, para el estanque en condición vacía existirá deslizamiento ya que el F.S es menor que el exigido. Por esto la utilización de un sistema de anclaje resulta obligatoria.

### 3.3.3. Compresión en el Manto

Para asegurar el correcto comportamiento de la estructura diseñada, se verifica la compresión de los anillos del estanque.

Se busca verificar que el esfuerzo derivado de esta carga sea menor al esfuerzo de fluencia del material de la plancha, de modo de no recurrir a rigidizadores verticales. Se establece entonces el siguiente criterio de diseño:

$$\sigma_C^* \leq \sigma_{adm-C} \quad (3.20)$$

A partir de la norma AWWA D103-09 se establecen las siguientes ecuaciones para la determinación de la compresión en los anillos del manto:

Para  $J < 0,785$  ó  $J > 1,54$ :

$$\sigma_C = \left[ w_t \cdot (1 + 0,4 \cdot A_v) + \frac{1.273 \cdot M_{v-i}}{D^2} \right] \cdot \left[ \frac{1}{1000 \cdot t_{eq}} \right] \quad (3.21)$$

Para  $0,785 \leq J \leq 1,54$ :

$$\sigma_C = \left[ \frac{w_t \cdot (1 + 0.4A_v + w_L}{0.607 - 0.18667 \cdot J^{2/3}} - w_L \right] \cdot \left[ \frac{1}{1000 \cdot t_{eq}} \right] \quad (3.22)$$

Donde:

D: Diámetro del estanque;

$A_v$ : Aceleración vertical según NCh2369;

$w_t$ : Carga muerta por unidad de largo del manto, según AWWA Eq.(14-37). [N/m];

$w_L$ : Carga de agua por unidad de largo de manto, según ecuación (14-33). [N/m];

$M_v$ : Momento volcante según combinación de carga. [kN-m];

$t_{eq}$ : Espesor equivalente estimado para compresión del anillo en estudio. [mm];  
 J: Factor de volcamiento del estanque. [-];

Considerando que  $w_L$  es definido por la norma AWWA D103 para estanques con fondos planos compuestos de planchas de acero unidas al manto, y que dicho caso no es directamente aplicable al estándar de este estanque, se propone la siguiente expresión, considerando un porcentaje del peso total de los contenidos:

$$w_L = \frac{W_{TC} \cdot \frac{V_{Resist}}{V_{Total}}}{\pi \cdot D} = \frac{W_{TC} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)}{\pi \cdot D} = \frac{W_{TC} \cdot \left(1 - \frac{(R - \min(0.035 \cdot D; b_f/2))^2}{R^2}\right)}{\pi \cdot D} \quad (3.23)$$

Donde:

$W_{TC}$ : Peso total de los contenidos del estanque, [N];  
 $V_{Resist}$ : Volumen de los contenidos que resisten el volcamiento [m<sup>3</sup>].  
 $V_{Total}$ : Volumen total de los contenidos del estanque, [m<sup>3</sup>];  
 r: Radio para el cual los contenidos empiezan a resistir el volcamiento, [m];  
 R: Radio del estanque, [m];  
 $b_f$ : Ancho de la fundación del estanque, [m];

Es importante destacar que para la expresión recién propuesta, se define un ancho máximo de la columna de contenidos que resisten el volcamiento igual a 0.035·D. Este criterio proviene de del punto 14.3.4.1 de la norma AWWA D103, la cual indica que hay un porcentaje máximo de contenidos que pueden considerarse para resistir el momento.

Por otro lado, para la tensión admisible a la compresión se propone una expresión basada en la ecuación 5-2 definida en la norma AWWA D103:

$$\sigma_{adm-c} = 1.333 \cdot 103 \cdot \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \left(100 \cdot \frac{t_{eq}}{R}\right) \cdot \left(2 - \frac{2}{3} \cdot \left(100 \cdot \frac{t_{eq}}{R}\right)\right) \leq 103 \quad (3.24)$$

En la Tabla 3.7 se verifica la compresión en los anillos del manto del estanque:

- Combinación Crítica = C4
- Tensión admisible a la compresión = 11.5 MPa

Tabla 3.7: Verificación de compresión en los anillos del manto

Anillo	ts	teq	$\sigma_c^*$
1	2 mm	2.0 mm	3.2 MPa
2	2 mm	2.0 mm	3.2 MPa
3	2 mm	2.0 mm	3.2 MPa
4	2 mm	2.0 mm	3.2 MPa
5	2 mm	2.0 mm	3.2 MPa

Factor de utilización Máximo: F.U = 28 %

Dado que el factor de utilización menor obtenido es menor al 100 %, se verifica que el manto resiste las sollicitaciones de compresiones a las que se ve sometida.

### 3.3.4. Tracción en el Manto

La tracción en el manto se verifica a partir de los procedimientos en las normas AWWA. Las cargas de tracción en el manto corresponden a las tensiones tangenciales existentes gracias a las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas, definidas en la Sección 3.2.3.

Por otro lado, la resistencia a la tracción de las planchas de acero corrugado se encuentra a partir del menor valor de lo entregado por las ecuaciones (5-4) y (5-5) de la norma AWWA D103-09, las que se detallan a continuación:

$$f_{t-1} = 0.6 \cdot F_y \cdot \left( 1.0 - 0.9r - \frac{3 \cdot r \cdot d_B}{S_V} \right) \leq 0.6 \cdot F_y \quad (3.25)$$

$$f_{t-2} = 0.4 \cdot F_u \quad (3.26)$$

Donde:

$F_y$ : Tensión de fluencia de la plancha de acero corrugado. [MPa];

$F_u$ : Tensión de ruptura de la plancha de acero corrugado. [MPa];

r: Proporción de la tensión total transmitida por una línea de pernos. [-];

$d_B$ : Diámetro de los pernos. [mm];

$S_V$ : Espaciamiento vertical de los pernos. [mm];

Teniendo en cuenta lo anterior, se verifica la tracción en la base de una plancha del anillo inferior del manto del estanque:

- Tensión Hidrodinámica en la base del Anillo 1;  $\sigma_s = 24$  MPa
- Tensión Hidrostática en la base del Anillo 1:  $\sigma_W = 61$  MPa
- Prop. de la Fuerza Total transmitida por 1 línea de pernos;  $r = 0.50$
- Esfuerzo unitario máximo de tracción - Ecuación 1;  $f_{t-1} = 125$  MPa
- Esfuerzo unitario máximo de tracción - Ecuación 2;  $f_{t-1} = 160$  MPa
- Esfuerzo admisible de tracción ( $\sigma_{adm-T} = 1.33 \cdot f_t$ );  $\sigma_{adm-T} = 166$  MPa
- Factor de Utilización Máximo; F.U = 51 %

Dado que el menor factor de utilización obtenido es menor a 100 %, se verifica que el manto resiste los esfuerzos de tracción a los que se ve sometido.

### 3.3.5. Resistencia de las costuras verticales

La resistencia de las costuras verticales se evalúa a partir de las cargas de agua hidrostática e hidrodinámica, traducidas en tensiones sobre el manto, según lo discutido en la sección anterior 3.3.4. Las cargas de agua fueron definidas en la sección 3.2.3.

Por otro lado, la resistencia a la ruptura y aplastamiento de cada perno se determina mediante los procedimientos de la norma AWWA, D103-09. La resistencia final del perno se obtiene a partir del menor valor de las siguientes expresiones:

$$V_{ADM-R} = Min \left\{ \frac{0.6 \cdot 0.9 F_{NT}}{\frac{2.2}{4}} \right\} \quad (3.27)$$

$$V_{ADM-AP} = 1.35 F_y \quad (3.28)$$

Donde:

$V_{ADM-R}$ : Esfuerzo de corte admisible en un perno por ruptura. [MPa]

$V_{ADM-AP}$ : Esfuerzo de corte admisible en un pernos por aplastamiento. [MPa]

$F_{NT}$ : Tracción nominal del perno. [MPa]

A partir de lo anterior, se verifica la resistencia de las costuras verticales en el manto:

- Fuerza crítica sobre un perno,  $F_{TOT} = 6.51$  kN
- Resistencia mínima del perno,  $F_{NT} = 827$  MPa
- Fluencia plancha corrugada,  $F_y = 250$  MPa
- Tensión admisible-ruptura 1,  $V_{ADM-R1} = 203$  MPa
- Tensión admisible-ruptura 2,  $V_{ADM-R2} = 207$  MPa
- Tensión admisible-aplastamiento,  $V_{ADM-AP} = 338$  MPa
- Fuerza admisible sobre un perno,  $F_{ADM} = 10.72$  kN
- Factor de utilización, F.U. = 61 %

En efecto, dado que se tiene un factor de utilización menor al 100 %, se verifica que la costura vertical resiste las solicitaciones a las que se ve sometida.

### 3.3.6. Deformación en el Manto

Para el estudio de deformaciones verticales de las planchas de manto, se toma una sección compuesta por la mitad de la longitud de onda de la plancha, lo cual se observa a continuación:

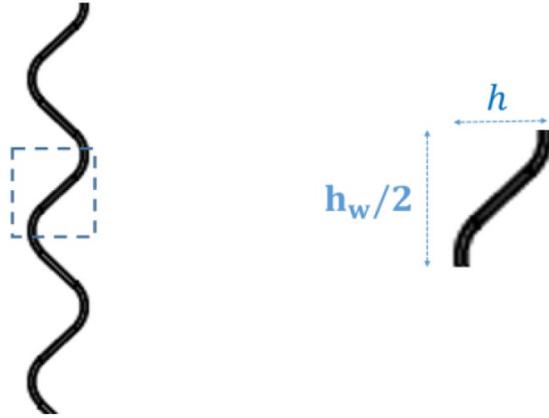


Figura 3.3: Modelo de estudio para deformación de plancha corrugada

Debido a la corrugación, la deformación vertical se calcula considerando cargas axiales y flexión dada por la excentricidad en la aplicación de la carga axial.

$$\Delta_{seccion} = \frac{(\Delta_{axial} + \Delta_{flex})}{2} \frac{H_{ts}}{l_w/2} \quad (3.29)$$

Donde:

- $\Delta_{seccion}$ : Deformación generada en la sección. [mm];
- $\Delta_{axial}$ : Deformación en la sección por esfuerzos axiales. [mm];
- $\Delta_{flex}$ : Deformación en la sección por esfuerzos de flexión. [mm];
- $H_{ts}$ : Altura total del manto. [m];
- $l_w$ : Longitud de onda de la plancha corrugada. [m];

De forma particular, las deformaciones producto de los esfuerzos axiales y de flexión se encuentran respectivamente según las siguientes ecuaciones:

$$\Delta_{axial} = \frac{\sigma_c^*}{K_{axial}} \quad (3.30)$$

$$\Delta_{flex} = \frac{\sigma_c^*}{K_{flex}} \quad (3.31)$$

Donde:

- $\sigma_c^*$ : Compresión total en el manto, calculada en Sección 3.3.1. [MPa];
- $K_{axial}$ : Constante elástica para deformación axial.
- $K_{flex}$ : Constante elástica para deformación flexural.

Además, las constantes elásticas de deformación se calculan como:

$$K_{axial} = \frac{E}{l_w/2} \quad (3.32)$$

$$K_{flex} = 3 \cdot \frac{E \cdot I_{bloque}}{h_w^3 \cdot A_{bloque}} \quad (3.33)$$

Donde:

E: Módulo de Young del material.

$h_w$ : Altura de onda de la plancha corrugada. [m];

$A_{bloque}$ : Área del bloque diferencial para cada anillo de manto en estudio. [ $mm^2/dx$ ];

$I_{bloque}$ : Inercia del bloque diferencial para cada anillo de manto en estudio. [ $mm^4/dx$ ];

Considerando entonces la geometría y las cargas sobre los anillos del manto del estanque, además de una deformación admisible del 2%, se realiza la verificación de la deformación por compresión:

- Deformación Admisible en plancha corrugada;  $\Delta_{adm} = 2\%$
- Módulo de Young;  $E = 200000$  MPa
- Distancia entre crestas (Longitud de Onda);  $l_w = 68$  mm
- Altura de Onda;  $h_w = 12.7$  mm

Tabla 3.8: Espesores y deformaciones en cada anillo del manto

Anillo	Espesor	$\sigma_c^*$	$\Delta_{axial}$	$\Delta_{flex}$
1	2.0 mm	3 MPa	0.001 mm	0.032 mm
2	2.0 mm	3 MPa	0.001 mm	0.032 mm
3	2.0 mm	3 MPa	0.001 mm	0.032 mm
4	2.0 mm	3 MPa	0.001 mm	0.032 mm
5	2.0 mm	3 MPa	0.001 mm	0.032 mm

- Deformación Axial Total;  $\Delta_{axial} = 0.001$  mm
- Deformación Flexural Total;  $\Delta_{flexural} = 0.032$  mm
- Deformación Total;  $\Delta_{TOT} = 0\%$
- Factor de Utilización; F.U = 2%

Se tiene entonces que las deformaciones en el manto del estanque se encuentran dentro del rango permitido.

### 3.3.7. Volcamiento con fundaciones

La fundación considerada en este estanque corresponde a una fundación de sección transversal cuadrada.

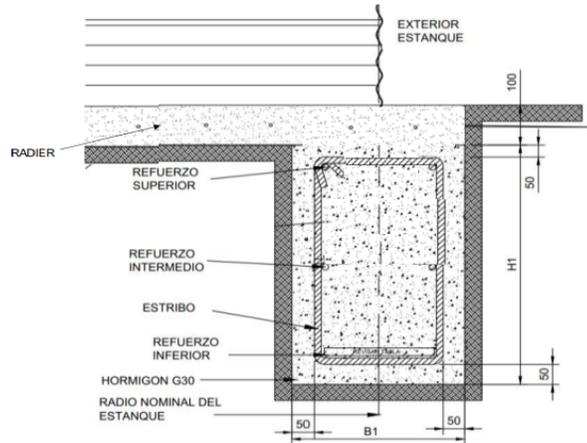


Figura 3.4: Geometría del sistema de fundación

El ancho de fundación es de 550 mm y la altura es de 450 mm.

Realizando el mismo proceso de verificación realizado en el punto 3.3.1, se procede a chequear el volcamiento considerando el aporte de la fundación diseñada.

- Combinación de carga crítica, C2
- Carga Muerta-Manto,  $D_s = 17.3$  kN
- Carga Muerta-Techo,  $D_R = 0$  kN
- Peso Total por nieve,  $D_{sw} = 0$  kN
- Fuerza resistente de los contenidos,  $W_L = 8257$  N/m
- Momento Volcante,  $M_v = 554$  kN-m
- Momento Resistente,  $M_R = 1146$  kN-m
- Factor de seguridad,  $F.S. = 2.07$
- Factor de seguridad mínimo,  $F.S._{MIN} = 1.50$

De acuerdo a los cálculos realizados, se puede notar que el estanque durante su fase de operación entrega un factor de seguridad mayor al mínimo requerido, por lo que no vuelca, lo que significa que se comporta de manera aceptable frente a los momentos volcantes.

### 3.3.8. Deslizamiento con fundaciones

Realizando el mismo proceso de verificación realizado en el punto 3.3.2, se procede a realizar el chequeo a deslizamiento considerando el aporte de la fundación diseñada.

- Combinación de carga crítica, C2
- Corte basal,  $Q_0 = 384 \text{ kN}$
- Aceleración sísmica vertical,  $A_v = 2.51 \text{ m/s}^2$
- Corte basal admisible,  $V_{ALLOW} = 807 \text{ kN}$
- Factor de seguridad, F.S. = 2.10
- Factor de seguridad mínimo,  $F.S._{MIN} = 1.10$

A partir de lo anterior, para el estanque en condición vacía no desliza ya que el factor de seguridad mayor al mínimo requerido.

# Capítulo 4

## Resultados

Con el propósito de visualizar con mayor claridad el perfil hidrostático de la estructura, se lleva a cabo un procedimiento que implica ocultar la mitad de los elementos de la malla ALE. Este proceso se efectúa mediante el comando “Element Editing > Blank Element”. Al aplicar esta instrucción, se logra suprimir la representación gráfica de ciertos elementos, permitiendo así una representación más simplificada y focalizada en la mitad de la malla.

La acción de “Blank Element” no afecta la integridad del modelo, sino que simplemente se traduce en una presentación visual específica que facilita la interpretación del perfil hidrostático. Esta técnica resulta especialmente útil para análisis visuales y evaluación de la distribución de presiones en la estructura, proporcionando una perspectiva más clara y comprensible del comportamiento del sistema.

Después de realizar el corte mediante la herramienta de postprocesamiento, se procede a la selección de la opción “time history”. En este paso, se eligen específicamente los nodos ubicados en la sección inferior del eje central del estanque. Esta selección precisa de nodos permite focalizar el análisis en una región específica del modelo, en este caso, la sección inferior del eje central, ya que son los elementos del modelo que presentan un mayor valor en la presión hidrostática y por ende son los que presentan mayores oscilaciones debido a la acumulación de perturbaciones numéricas.

La causa de estas oscilaciones se atribuye a la naturaleza del software LS-Dyna, diseñado principalmente para simulaciones de impacto o situaciones en las que el fluido está en movimiento. Cuando se aborda la resolución numérica de las ecuaciones de manera explícita, se introducen perturbaciones al sistema que, inevitablemente, generan oscilaciones en la respuesta.

Para contrarrestar este efecto no deseado, resulta esencial incorporar un término de amortiguamiento (damping). La inclusión de damping en el modelo proporciona una herramienta efectiva para mitigar estas oscilaciones, mejorando así la estabilidad y precisión de la simulación. La aplicación cuidadosa de damping es una estrategia clave para garantizar resultados más realistas y confiables en el análisis de estructuras sujetas a condiciones dinámicas complejas.

En la figura 4.1 se observa que la presión hidrostática obtenida por el programa en el fondo del estanque es de 37 kPa. Lo cual es consistente con lo esperable, ya que la presión hidrostática se calcula de la siguiente manera:

$$\rho \cdot H_L \cdot g = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 3.96m \cdot 9.8 \frac{m}{s^2} = 38KPa \quad (4.1)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del agua [ $kg/m^3$ ]

$H_L$ : Altura de líquido [m]

$g$ : Aceleración de gravedad [ $m/m^2$ ]

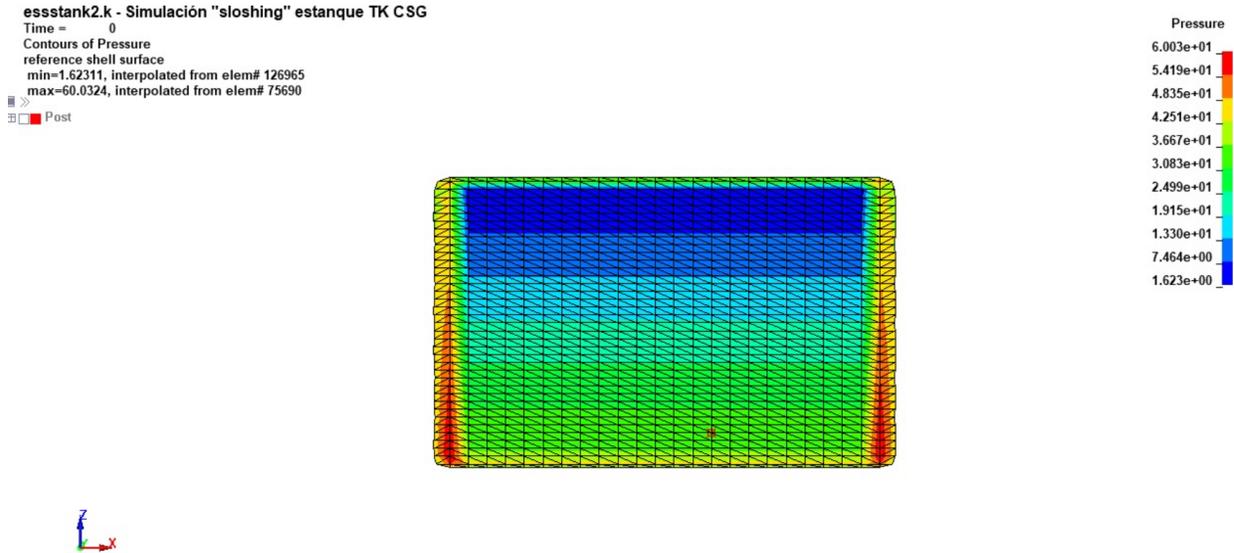


Figura 4.1: Perfil hidrostático

Esto indica que el perfil hidrostático entregado por el modelo, corresponde a lo esperado, entregando valores correctos.

Para corroborar el estado de tensiones de compresión presentes en el manto del estanque se debe ver la representación gráfica de las presiones de Von-Mises en dicho objeto. Estos valores son el resultado de calcular el módulo de las presiones en las tres direcciones principales del sistema de referencia empleado sobre el estanque y el sistema en sí, el cual es cartesiano para este caso.

Este valor se obtiene a partir del resultado entregado por LS-Run, el cual es leído por medio del archivo .d3plot creado para la visualización de resultados tanto gráfica como numérica. Para ver el mapa de calor del estado de tensiones tridimensional se tiene ir a la pestaña “POST” de la barra vertical de herramientas de LS-Prepost donde se desglosará un variado campo de opciones para la visualización de resultados. Luego hay que presionar la primera opción correspondiente “FRINGE COMPONENT SELECTION” la cual abrirá un menú de opciones para obtener el estado del estanque o del líquido dentro del estanque.

Para este caso, como se mencionó anteriormente, se seleccionará la opción “Von-Mises Strees” para obtener el estado de presiones hidrostáticas de compresión representado en la Figura 4.2.

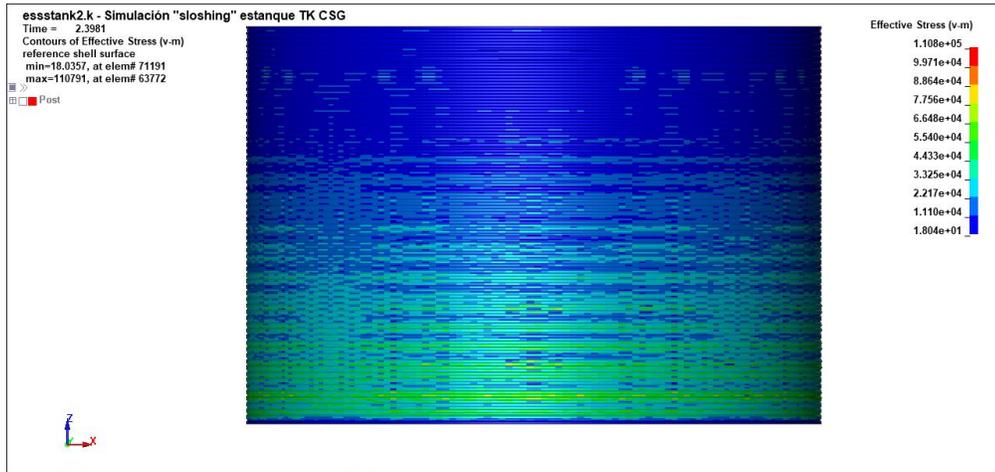


Figura 4.2: Presión hidrostática de compresión

Luego, para obtener la presión exacta presente en cada uno de los elementos que conforman la malla creada para simular el problema de elementos finitos del programa, se va a la pestaña “HIST” de la barra de herramientas y se selecciona dentro del menú emergente de dicha herramienta la opción “Element” para obtener el gráfico de tensiones respecto al tiempo de simulación del estanque o de los anillos del mismo.

Una vez seleccionada la opción anterior se debe seleccionar el rango de elementos de interés según el mapa de calor lo cual una vez hecho, se selecciona “PLOT”, obteniendo así el gráfico con los valores exactos representados en la Figura 4.3, los cuales son de 60 MPa.

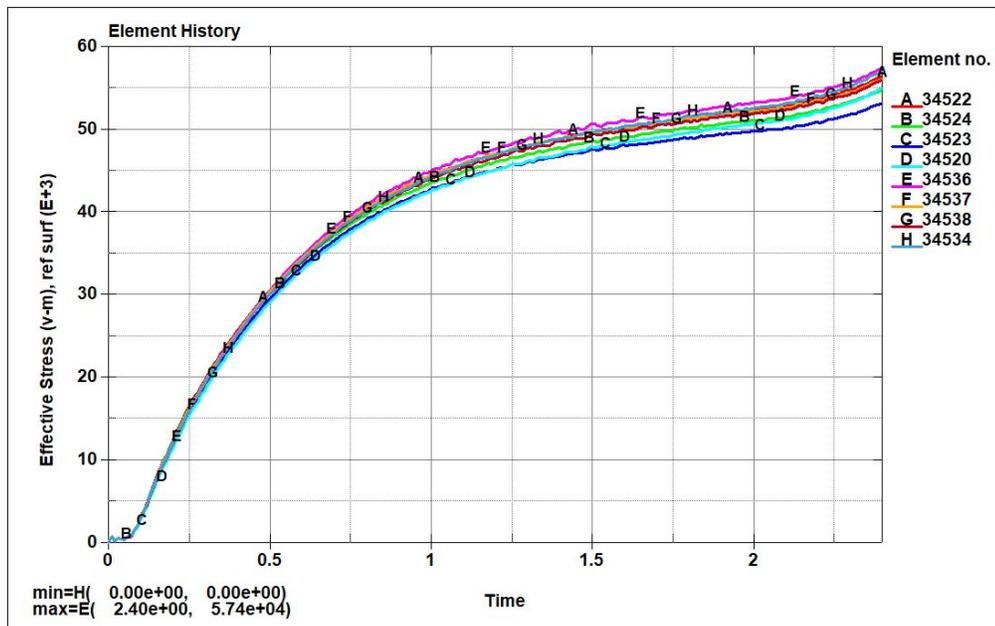


Figura 4.3: Estado de Presiones del estanque

# Capítulo 5

## Conclusiones

Una vez efectuados los cálculos de tensión hidrostática en la base del anillo, siguiendo la metodología y recomendaciones de la norma NCh.2369, se obtiene un valor para  $\sigma_w$  de 61 MPa, lo cual es consistente con lo obtenido en el modelo realizado, ya que en este se obtiene un valor de 60 MPa.

La creación detallada de un modelo de un estanque de acero corrugado empernado, con un diámetro de 6,3 metros y una altura de 4,4 metros, mediante el uso especializado del software Ansys LS-DYNA, se convierte en un proceso esencial para explorar a fondo el comportamiento estructural de esta infraestructura. Este estanque, al ser una pieza fundamental en la gestión y almacenamiento de agua, requiere un análisis exhaustivo para asegurar su estabilidad y rendimiento en diversas condiciones operativas.

La elección del software Ansys LS-DYNA para llevar a cabo este modelado no es casualidad, ya que este programa es reconocido a nivel mundial por su capacidad de simulación explícita en entornos dinámicos. La utilización de LS-DYNA permitirá capturar de manera precisa y detallada las interacciones complejas entre los diversos componentes del estanque, considerando factores como las condiciones de carga, la resistencia de los materiales y las deformaciones resultantes.

Este modelo no solo servirá como una representación virtual del estanque, sino que también se convertirá en una herramienta para realizar análisis estáticos, y posteriormente dinámicos. A través de la simulación en Ansys LS-DYNA, será posible estudiar las presiones hidrostáticas, evaluar la respuesta estructural bajo diversas condiciones de carga y se recomienda continuar con el análisis dinámico del estanque, para anticipar cómo podría comportarse frente a eventos sísmicos.

En última instancia, este proceso de modelado con Ansys LS-DYNA no solo busca comprender la estructura en términos teóricos, sino que también proporcionará información valiosa que puede utilizarse para optimizar el diseño, mejorar la seguridad y garantizar la eficiencia operativa del estanque de acero corrugado empernado. Este enfoque avanzado en la simulación contribuirá significativamente a la toma de decisiones informada en el diseño y gestión de infraestructuras críticas como esta.

La fase de calibración del modelo adquiere un rol crítico en el proceso, siendo esencial para estabilizar las presiones internas del estanque de acero corrugado. La precisión y confiabilidad de la simulación dependen en gran medida de esta calibración, que implica ajustar cuidadosamente los parámetros del modelo para que reflejen de manera fiel las condiciones reales. Este paso garantiza que las simulaciones subsiguientes sean representativas y proporciona una base sólida para la toma de decisiones en el diseño y la gestión de la infraestructura.

Posteriormente, se procede con el análisis estático del estanque, una fase crucial para comprender las presiones hidrostáticas estables que actúan en la estructura. Este análisis permite explorar minuciosamente cómo el estanque responde bajo condiciones de carga estática, identificando cualquier área propensa a tensiones excesivas o deformaciones no deseadas. Los resultados obtenidos durante esta etapa no solo ofrecen una visión detallada de la estabilidad del estanque, sino que también proporcionan información para la optimización de su diseño.

Siguiendo con el proceso, se lleva a cabo un análisis sísmico teórico del mismo estanque, en estricto cumplimiento con la metodología y recomendaciones establecidas por la norma NCh. 2369 of 2003. Este análisis sísmico proporciona una evaluación detallada de cómo la estructura respondería a fuerzas sísmicas, generando resultados teóricos de esfuerzos y deformaciones. La aplicación rigurosa de normativas sísmicas específicas no solo garantiza la seguridad de la estructura frente a eventos sísmicos, sino que también contribuye al cumplimiento de estándares regulatorios y normativos en el ámbito de la ingeniería estructural.

Finalmente, el modelo realizado del estanque de acero corrugado empernado exhibe de manera precisa el perfil hidrostático del estanque, lo cual indica que el modelo se puede utilizar para futuros análisis sísmicos de la estructura, proporcionando información importante para la toma de decisiones informada en la gestión de la infraestructura del estanque de acero corrugado.

# Bibliografía

1. Norma Chilena NCh 2369 of 2003. Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales.
2. NCh 1537. Cargas Permanentes y Sobrecargas de Uso.
3. NCh 3171. Disposiciones Generales y Combinaciones de Cargas.
4. American Water Work Association. AWWA D-103: Factory-Coated Bolted Carbon Steel Tanks for Water Storage, 2009.
5. American Water Work Association. AWWA D-100:Welded Steel Tanks for Water Storage, 2011.
6. Página Oficial Ansys. URL:<https://www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna>Barrios