



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**ANÁLISIS DE ESTANQUES SUJETOS A ACELERACIONES BASALES MEDIANTE
SIMULACIONES ACOPLADAS BIDIRECCIONALMENTE**

POR

Cristóbal Patricio Inostroza Acuña

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Dr. Rodrigo Silva M.

Agosto 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Cristóbal Inostroza Acuña

© 2025 Cristóbal Inostroza Acuña

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

A mis padres, quienes me han dado y enseñado todo lo que han podido,

A mi hermana, que siempre ha sido un ejemplo,

A mis hermanas menores, que me llenan de alegría

A Catalina, quien ha sido mi compañía durante la universidad,

A mi familia, que me ha visto crecer,

A mis amigos, quienes siempre han sido parte de mi vida,

Y, por último, a mis mascotas, que me alegran cada día.

AGRADECIMIENTOS

Como en la dedicatoria, las primeras personas a las que agradezco son a mis padres, quienes me han enseñado el valor del trabajo, responsabilidad y el deseo por aprender, les agradezco por su apoyo incondicional, y por todo lo que han hecho para que pudiera estudiar. Agradezco a toda mi familia, a los que siguen presentes y a los que ya no están con nosotros, pues ellos me vieron crecer y, en el transcurso de esta tesis, con sus preguntas, me han hecho replantearme incontables veces el camino de mi trabajo, llevándome a lograr mayores aprendizajes.

Agradezco a Catalina, mi pareja, por acompañarme durante mis mejores y peores momentos de todo el camino universitario, por apoyarme siempre y por todos los momentos que hemos vivido juntos, desde los estudios más terribles para certámenes, trabajos entregados en la madrugada hasta caminar grandes distancias a ver las postales más hermosas.

También a mis amigos, aquellos que conozco desde niño y los que conocí en la universidad, por regalarme incontables alegrías y momentos de júbilo, tanto dentro de las aulas como fuera de ellas.

Agradezco a mi profesor, Rodrigo Silva, por confiarme un tema de memoria de título tan desafiante, y también a mi profesor de comisión, Patricio Cendoya, por ser un profesor de excelencia en el área estructural, cuyo dominio sobre todo lo teórico se ha vuelto una inspiración.

Finalmente, agradezco a ANSYS Inc. por facilitar una licencia estudiantil con tantas herramientas, junto a todas aquellas personas que aportan al mundo de la ingeniería compartiendo su conocimiento, ya sea en videos de YouTube, foros, páginas web, papers, etc., pues este trabajo no habría sido posible sin el conocimiento que me fue concedido por ellos.

RESUMEN

El diseño estructural, con sus raíces en el análisis estructural mediante ecuaciones y relaciones empíricas, se basa hoy en día principalmente en el análisis estructural mediante elementos finitos. Sin embargo, problemáticas como la dificultad de para representar la interacción fluido estructura y el costo computacional inherente de las simulaciones computacionales de fluidos llevaron a que los estanques no pudieran hacer esta transición.

Este trabajo se propone como objetivo desarrollar una metodología para el análisis dinámico de estanques mediante elementos finitos, representando el fenómeno de interacción fluido estructura mediante simulaciones bidireccionalmente acopladas utilizando ANSYS, replicando el comportamiento predicho por los modelos empíricos desarrollados por Housner (1963), Veletsos (1984) y Priestley (1985), según se describen en el documento NZSEE 2009.

Para esto, se desarrolla una metodología mediante la cual se obtienen los perfiles de presiones y la respuesta estructural dinámicos a partir de simulaciones acopladas en las cuales el fluido es excitado mediante una oscilación armónica resonante con los principales modos de vibrar del sistema, lo que fue hecho para distintas relaciones de aspecto H/R.

Los resultados obtenidos de este trabajo indican que es posible representar los modelos dinámicos de estanques utilizando simulaciones que incorporan la interacción fluido estructura mediante acoplamiento bidireccional.

ABSTRACT

In Civil Engineering structural analysis has its roots in empirical equations and relations, but nowadays it is mainly based on the finite element method. Nevertheless, difficulties like representing the fluid solid interaction phenomena together with the computational cost of computational fluid dynamics have made it so the analysis of fluid containing tanks couldn't make this transition.

This thesis' main objective is to develop a methodology for the dynamic analysis of fluid containing tanks using the finite element method, representing the fluid solid interaction phenomena via coupled simulation using ANSYS, replicating the behavior as predicted by the empirical models developed by Housner (1963), Veletsos (1984) and Priestley (1985), as described in the document NZSEE 2009.

To achieve this, this work develops a methodology which allows the obtention of the dynamic pressure distribution and structural response from coupled simulations in which the fluid is excited via a resonant harmonic oscillation for the main modes of the studied system, this was done for different aspect ratios H/R .

The results obtained from this work indicate that it is possible to represent the dynamic models of liquid containing tanks using simulation that incorporate the fluid solid interaction phenomena using bidirectional coupling.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance del estudio	3
1.4. Plan de trabajo.....	3
1.5. Principales resultados	4
1.6. Organización de la memoria de título	4
CAPÍTULO 2: COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE ESTANQUES CILÍNDRICOS.....	5
2.1. Introducción	5
2.2. Estanques Cilíndricos.....	5
2.3. NZSEE: Seismic Design of Storage Tanks: 2009.....	7
2.3.1 Modelo de Housner (1963)	7
2.3.2 Periodos Modales	8
2.4. Distribución de Presiones Hidrodinámicas	9
2.5. Cortes Basales y Momentos Volcantes	13
2.6. Respuesta Estructural	15
2.7. Conclusiones	16
CAPÍTULO 3: MODELAMIENTO DINÁMICO	17
3.1. Introducción	17
3.2. ANSYS Fluent.....	17
3.2.1 Mallado.....	18
3.2.2 Modelo Multifase	19
3.2.3 Modelo de Turbulencia	20

3.2.4	Algoritmo PISO.....	20
3.2.5	Mallado Dinámico.....	21
3.2.6	Mesh Movement.....	21
3.3.	ANSYS Transient Structural.....	21
3.3.1	Mallado.....	22
3.3.2	Condiciones de Borde	22
3.4.	ANSYS System Coupling.....	22
3.5.	Conclusiones	23
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA		24
4.1.	Introducción	24
4.2.	Preparación de la Simulación.....	24
4.2.1	Simulación en Fluent.....	26
4.2.2	Simulación en Transient Structural.....	28
4.3.	System Coupling.....	29
4.4.	Procesado de Datos	29
4.4.1	Respuesta Hidrodinámica.....	29
4.4.2	Respuesta Estructural	30
4.5.	Conclusiones	32
CAPÍTULO 5: RESULTADOS		33
5.1.	Introducción	33
5.2.	Periodos Modales	33
5.3.	Distribución Adimensional de Presiones	33
5.4.	Respuesta Estructural	35
5.5.	Conclusiones	46
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN		47
6.1.	Introducción	47

6.2.	Respuesta del Modo Impulsivo.....	47
6.3.	Respuesta del Modo Convectivo.....	49
6.4.	Análisis General de las Respuestas	51
6.5.	Metodología	51
6.6.	Limitaciones	52
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....		54
GLOSARIO		55
REFERENCIAS		57
ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE....		58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Relaciones de Aspecto Estudiadas	24
Tabla 2 Tamaño y Número de Celdas en Fluent	26
Tabla 3 Tamaño de Elementos y Cantidad de Nodos	29
Tabla 4 Periodos Modales	33
Tabla 5 Valores de Esfuerzos en el Manto.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estanque Cilíndrico Vertical de Acero.	5
Figura 2.2 Presiones Hidrodinámicas Inducidas por Aceleración Basal.	6
Figura 2.3 Modelo de Housner (1963).	8
Figura 2.4 Coeficiente kh para Modo Impulsivo.	9
Figura 2.5 Sistema de Coordenadas para Presiones Hidrodinámicas.	10
Figura 2.6 Distribución Adimensional Vertical de Presiones Impulsivas.	11
Figura 2.7 Valor Máximo de Presión Impulsiva Adimensional en la Base del Estanque.	11
Figura 2.8 Distribución Vertical Adimensional de Presiones para el Primer modo Convectivo.	12
Figura 2.9 Componentes Modales de Masa	14
Figura 2.10 Alturas Modales de Masa	14
Figura 2.11 Analogía de Marco Discretizado.	15
Figura 3.1 Transferencia de Información entre Celdas.	18
Figura 3.2 Capas de Inflación.	19
Figura 4.1 Geometría del Fluido para $H/R=1$	25
Figura 4.2 Geometría del Manto para $H/R=1$	25
Figura 4.3 Mallado del Dominio del Fluido.	27
Figura 4.4 Modelo en ANSYS Fluent para $H/R=1$	27
Figura 4.5 Modelo en Transient Structural.	28
Figura 5.1 Distribución Adimensional de Presiones Impulsivas.	34
Figura 5.2 Distribución Adimensional de Presiones Convectivas.	34
Figura 5.3 Presiones Impulsivas Adimensionales Máximas en la Base.	35
Figura 5.4 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Hidrostático $H/R=0.5$	36
Figura 5.5 Momento Vertical Adimensional, Caso Hidrostático $H/R=0.5$	36
Figura 5.6 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Hidrostático $H/R=1$	37
Figura 5.7 Momento Vertical Adimensional, Caso Hidrostático $H/R=1$	37
Figura 5.8 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Hidrostático $H/R=2$	38
Figura 5.9 Momento Vertical Adimensional, Caso Hidrostático $H/R=2$	38
Figura 5.10 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Convectivo $H/R=0.5$	39
Figura 5.11 Momento Vertical Adimensional, Caso Convectivo $H/R=0.5$	39
Figura 5.12 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Convectivo $H/R=1$	40

Figura 5.13 Momento Vertical Adimensional, Caso Convectivo $H/R=1$	40
Figura 5.14 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Convectivo $H/R=2$	41
Figura 5.15 Momento Vertical Adimensional, Caso Convectivo $H/R=2$	41
Figura 5.16 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Impulsivo $H/R=0.5$	42
Figura 5.17 Momento Vertical Adimensional, Caso Impulsivo $H/R=0.5$	42
Figura 5.18 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso impulsivo $H/R=1$	43
Figura 5.19 Momento Vertical Adimensional, Caso Impulsivo $H/R=1$	43
Figura 5.20 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Impulsivo $H/R=2$	44
Figura 5.21 Momento Vertical Adimensional, Caso Impulsivo $H/R=2$	44
Figura 5.22 Componentes de Masas Modales.....	45
Figura 6.1 Comparación Visual de Gradientes.	49

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La ingeniería civil, en específico el área estructural, que se encuentra tradicionalmente cimentado en el análisis estructural manual y relaciones empíricas, ha experimentado en las últimas décadas una transformación significativa gracias a la integración de herramientas computacionales para el análisis estructural. La aparición y desarrollo de software especializado como SAP2000, Etabs, SAFE y ANSYS ha permitido abordar problemáticas cada vez más complejas, optimizar tiempos de cálculo, mejorar la precisión de los resultados y ampliar las capacidades del análisis estructural más allá de los métodos tradicionales.

Dentro de estos avances, uno de los desafíos más emblemáticos corresponde al análisis del fenómeno de interacción fluido estructuras, como en el caso de estanques de almacenamiento de fluidos. La dificultad para resolver estos problemas radica en la complejidad de la simulación de fluidos, en conjunto con el costo computacional de acoplarlas con modelos estructurales que respondan a cargas transitorias. Durante mucho tiempo, las limitaciones computacionales y la falta de herramientas adecuadas obligaron a los ingenieros a utilizar modelos simplificados, como el de masas concentradas, los cuales, si bien han sido útiles, presentan limitaciones importantes, sobre todo con respecto a la respuesta estructural.

Hoy en día, el aumento de la capacidad de computación de los procesadores, junto con el desarrollo de herramientas como ANSYS han abierto nuevas posibilidades para la resolución de esta problemática. El análisis acoplado entre módulos de dinámica de fluidos (CFD) y estructurales permite simular de forma precisa los comportamientos comportamiento del fenómeno fluido estructura.

Esta nueva posibilidad motiva el presente estudio, en el que se busca desarrollar una metodología para el análisis dinámico de estanques, utilizando el documento NZSEE 2009 como referencia para los modelos dinámicos, tanto del fluido como de la estructura. En el Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para el análisis del comportamiento dinámico en estanques cilíndricos verticales formados en acero mediante la comparación entre los resultados obtenidos a partir de simulaciones con acoplamiento fluido estructura (FSI) bidireccional y las metodologías empíricas propuestas en el documento NZSEE 2009.

1.2.2 Objetivos específicos

- I. Analizar la metodología de análisis propuesta en el documento NZSEE 2009 para estanques cilíndricos verticales formados en acero.
- II. Caracterizar el comportamiento dinámico del fluido en base a los modelos de Housner (1963) y Veletsos (1984).
- III. Establecer los parámetros y modelos para la simulación dinámica del fluido en ANSYS Fluent.
- IV. Establecer los parámetros y modelos para la simulación estructural dinámica en ANSYS Transient Structural.
- V. Integrar los solvers de Fluent y Transient Structural mediante acoplamiento bidireccional en ANSYS System Coupling.
- VI. Obtener los resultados de la respuesta estructural y la dinámica de fluidos para las distintas razones de H/R estudiadas.
- VII. Desarrollar una metodología para el procesado de los datos obtenidos correspondientes a la respuesta dinámica del fluido.
- VIII. Desarrollar una metodología para el procesado de datos correspondientes a la respuesta dinámica de la estructura.
- IX. Comparar cualitativa y cuantitativamente los resultados obtenidos entre la simulación numérica con los valores estimados mediante modelos empíricos.

1.3. Alcance del estudio

El presente trabajo se centra en el análisis del comportamiento dinámico de estanques cilíndricos verticales, modelados de forma simplificada según el modelo de Priestley (1985) para los cuales el fluido es sujeto a una excitación sísmica idealizada, mediante simulaciones numéricas con acoplamiento bidireccional entre los solvers Fluent y Transient Structural.

1.4. Plan de trabajo

El desarrollo de este estudio se realizó en seis etapas principales:

1. Revisión de antecedentes: análisis de modelos normativos (NZSEE 2009, Housner 1963, Veletsos 1984) y parámetros relevantes para el comportamiento dinámico de estanques.
2. Definición de casos de estudio: selección de tres relaciones H/R y condiciones estructurales específicas.
3. Modelación numérica: generación de geometrías, mallados y configuración de modelos físicos en ANSYS Fluent y Transient Structural.
4. Simulación: ejecución de casos para modos impulsivo y convectivo mediante acoplamiento bidireccional en System Coupling.
5. Procesado de datos: obtención de distribuciones adimensionales de presión y respuesta estructural.
6. Análisis y conclusiones: comparación con modelos normativos, interpretación de diferencias y evaluación de los objetivos planteados.

1.5. Principales resultados

Como principales resultados de esta investigación se obtuvieron las distribuciones de presiones hidrodinámicas junto con la respuesta estructural, para los casos correspondientes a la respuesta hidrostática y los modos convectivo e impulsivo. De este trabajo, se concluye que es posible representar el comportamiento dinámico de estanques según lo describen los modelos de Housner, Veletsos y Priestley mediante simulaciones CFD con acoplamiento bidireccional.

1.6. Organización de la memoria de título

La presente memoria se estructura en seis capítulos: el Capítulo 1 expone el contexto y motivación del estudio, la problemática abordada, los objetivos, el alcance y el plan de trabajo; el Capítulo 2 desarrolla el marco teórico, describiendo los estanques cilíndricos verticales de acero, los modelos empíricos según se describen en el documento NZSEE (2009) correspondientes a los modelos de Housner (1963) y Veletsos (1984) para la respuesta hidrodinámica y el modelo de Priestley (1985) para la respuesta estructural, el Capítulo 3 los fundamentos de simulación numérica en ANSYS Fluent, Transient Structural y System Coupling; el Capítulo 4 detalla la metodología de modelación y simulación, incluyendo la preparación de geometrías, mallado, modelos físicos, condiciones de borde, acoplamiento fluido–estructura y procesado de datos; el Capítulo 5 presenta los resultados obtenidos para los modos impulsivo y convectivo en las tres relaciones H/R analizadas; el Capítulo 6 discute la correspondencia entre los resultados numéricos y los modelos normativos, identificando diferencias y sus causas, junto con las limitaciones y líneas de investigación futuras, finalmente, el Capítulo 7 entrega las conclusiones, implicancias prácticas, limitaciones y propuestas de investigación futura, complementándose con anexos que incluyen material gráfico y datos de referencia.

CAPÍTULO 2: COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE ESTANQUES CILÍNDRICOS

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta la descripción que contempla el alcance de la memoria en tanto a estanques y, posteriormente, se describe como su comportamiento dinámico es estudiado en base a los modelos de Housner, Veletsos y Priestley, según se presenta en el manual de diseño NZSEE 2009.

2.2. Estanques Cilíndricos

Los estanques cilíndricos verticales de acero son estructuras ampliamente utilizadas en el área industrial debido a su capacidad para almacenar grandes volúmenes de líquidos de forma eficiente. Estos pueden encontrarse en instalaciones donde sea necesario el almacenamiento temporal o permanente de fluidos, como lo pueden ser la minería, refinería e industrias de procesos. Un estanque del tipo estudiado se encuentra en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Estanque Cilíndrico Vertical de Acero.
Fuente: Superior Tank INC.

Desde el punto de vista operacional, la integridad estructural de estas estructuras es crítica para la continuidad de procesos industriales y la prevención de impactos ambientales. Una falla estructural de un estanque puede derivar en pérdidas de contenido, y dependiendo del líquido almacenado, provocar contaminación ambiental severa, peligro para los trabajadores y daños colaterales en infraestructuras adyacentes. Por estas razones, el diseño de estanques considera tanto las condiciones normales de operación como eventos excepcionales, como cargas de viento, presiones negativas inducidas por el vaciado de contenidos y solicitaciones ante eventos sísmicos.

El comportamiento estructural de estos estanques puede analizarse considerando las distintas solicitaciones a las que se encuentran sometidos durante su vida útil. Bajo condiciones estáticas, los estanques experimentan principalmente presiones hidrostáticas debidas al peso del líquido almacenado, junto con las cargas derivadas del peso propio de la estructura además de equipos o accesorios instalados en el estanque. En esta situación, la respuesta estructural es predecible.

Sin embargo, cuando estas estructuras son sometidas a cargas dinámicas, inducidas por aceleraciones basales, su respuesta se vuelve considerablemente más compleja. Durante un evento sísmico, el movimiento del suelo se transmite a la base del estanque, generando aceleraciones que inducen presiones hidrodinámicas adicionales sobre las paredes y la base del estanque las que, a diferencia de las cargas hidrostáticas, son presiones transitorias con distribuciones que varían en el tiempo, perímetro y altura del estanque. Esto se ejemplifica en la Figura 2.2.

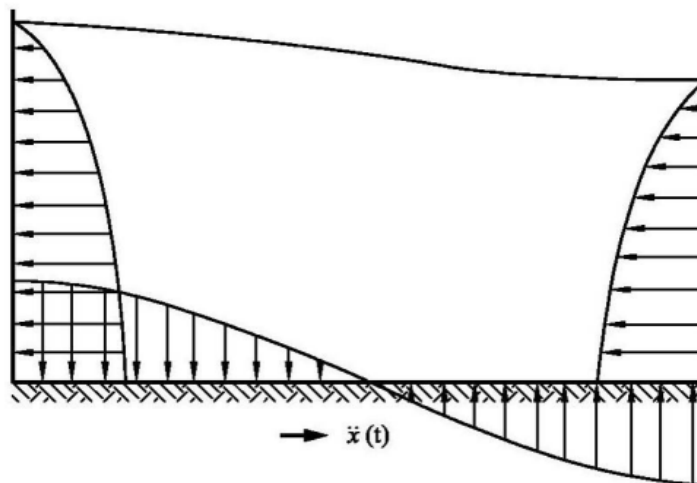


Figura 2.2 Presiones Hidrodinámicas Inducidas por Aceleración Basal.

Fuente: NZSEE (2009)

El líquido contenido dentro del estanque responde al movimiento sísmico mediante la combinación tiempo historia de sus modos de vibración, descritos como los modos impulsivo y convectivos, según el modelo de Housner (1963), el cual se presenta dentro de los siguientes capítulos, siguiendo el marco teórico entregado por el documento NZSEE 2009.

2.3. NZSEE: Seismic Design of Storage Tanks: 2009

El documento NZSEE: Seismic Design of Storage Tanks: 2009 (New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2009) entrega recomendaciones para el diseño de estanques, y de particular interés para esta investigación, para las cargas dinámicas y la respuesta estructural inducidas en estanques durante eventos sísmicos. En el presente trabajo, se describen los modelos utilizados para describir los efectos de la acción sísmica, tanto en la estructura como en el fluido, según se encuentran descritas en el documento NZSEE 2009.

2.3.1 Modelo de Housner (1963)

En el texto “The Dynamic Behavior of Water Tanks” (1963), Housner postula el modelo de masas y resortes para definir el comportamiento dinámico del fluido dentro de estanques. En este modelo se definen dos modos de vibración, denominados como impulsivo y convectivo, como puede observarse en la Figura 2.3

En este modelo, el modo impulsivo se encuentra representado por una masa concentrada m_0 unida mediante un enlace rígido a las paredes del estanque, a una altura h_0 . Este modo domina en los primeros momentos del sismo y es una propiedad que depende de las propiedades tanto de la geometría como de la materialidad del estanque.

Por otro lado, el modo convectivo se modela mediante una serie de masas m_i que se encuentran unidas mediante resortes a las paredes del estanque, a alturas h_i . Este modo domina el movimiento de la superficie libre del estanque, en el movimiento llamado *Sloshing* u oleaje, y en la práctica, para el análisis y diseño sísmico, se utiliza sólo el primer modo convectivo, de masa m_1 y altura h_1 .

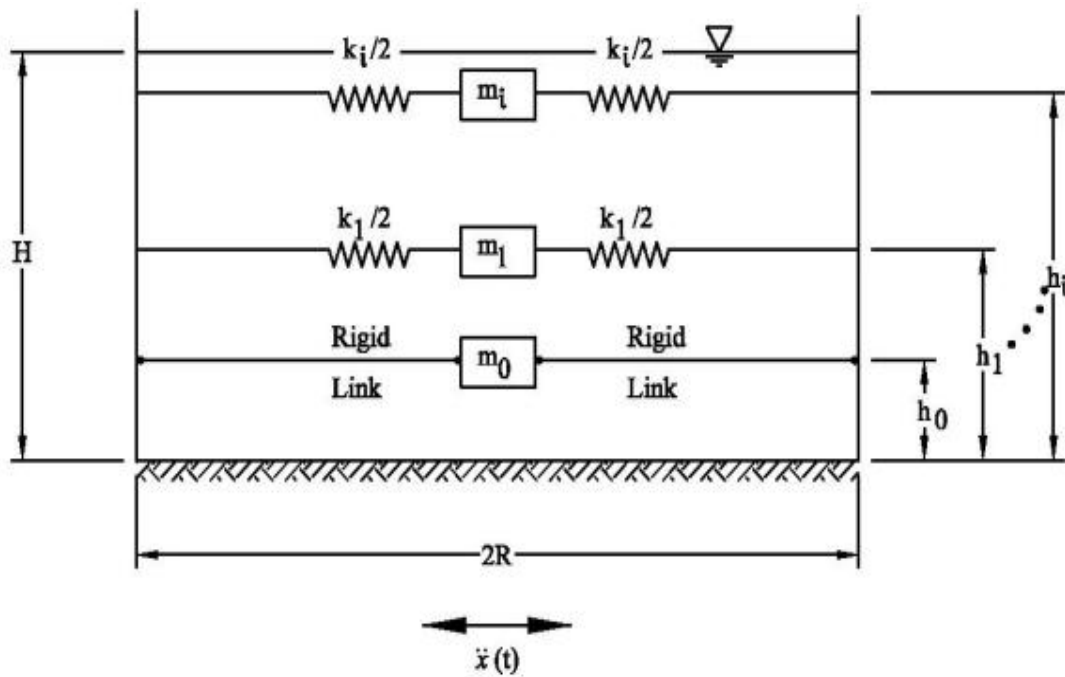


Figura 2.3 Modelo de Housner (1963).

Fuente: NZSEE 2009

2.3.2 Periodos Modales

El modo impulsivo depende de factores como la geometría del estanque, como la altura de la superficie libre del fluido H y el radio del estanque R , junto con el espesor del manto t_w , el módulo de elasticidad del acero E y el peso específico del fluido γ_l , además del coeficiente de flexibilidad k_h , que puede encontrarse en la Figura 2.4. El periodo para el modo impulsivo se obtiene de la Ecuación 2.1.

$$T_0 = \frac{5.61 \pi H}{k_h} \sqrt{\frac{\gamma_l}{Eg}} \quad Ec 2.1$$

Donde g es la aceleración de gravedad. Por otro lado, el modo convectivo se encuentra controlado por dos parámetros clave, la altura de la superficie libre H y el radio del estanque R . El periodo para el modo convectivo i puede obtenerse de la Ecuación 2.2. Para el primer modo convectivo, λ_i tiene un valor de 1.841.

$$T_i = \frac{2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}}{\sqrt{\lambda_i \tanh(\lambda_i \frac{H}{R})}} \quad \text{Ec 2.2}$$

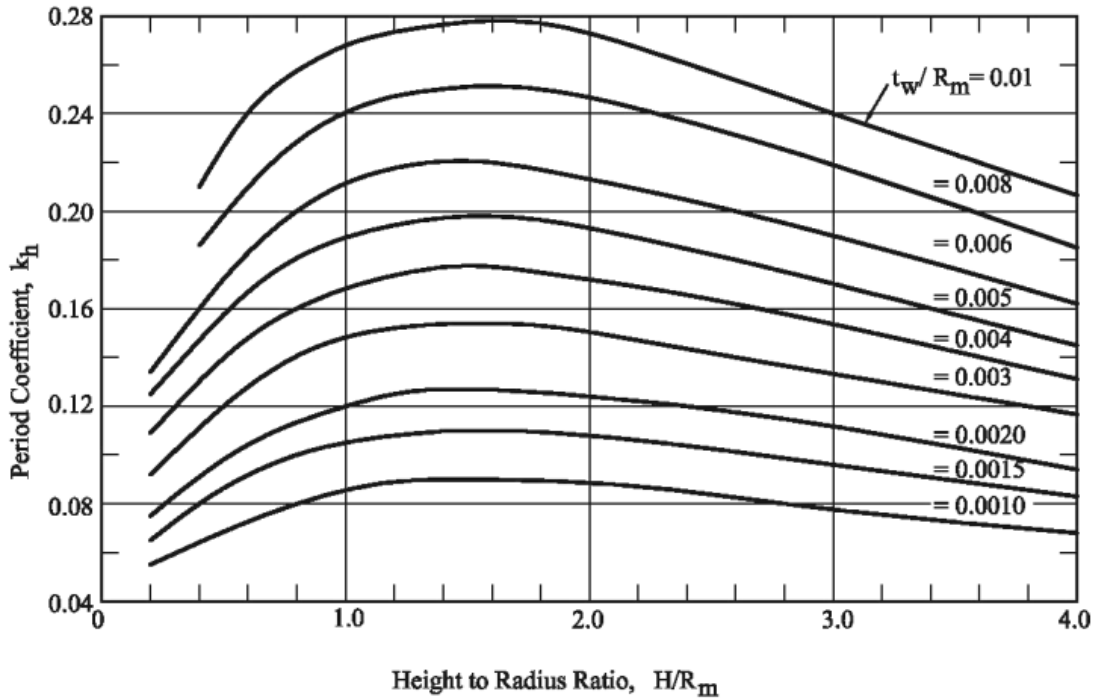


Figura 2.4 Coeficiente k_h para Modo Impulsivo.

Fuente: NZSEE 2009

2.4. Distribución de Presiones Hidrodinámicas

basándose en el modelo propuesto por Housner, diversos autores han desarrollado expresiones para describir las presiones hidrodinámicas inducidas por aceleraciones basales idealizadas. Entre ellos, Veletsos (1984) describió las presiones hidrodinámicas para los modos convectivo e impulsivo, presentadas en el capítulo C3.3.1 del NZSEE 2009. La presión hidrodinámica en su forma de tiempo historia corresponde a la suma de las respuestas del modo convectivo y el modo impulsivo, según se presenta en la Ecuación 2.3, bajo el sistema de coordenadas descrito en la Figura 2.5.

$$p(z, \theta, t) = p_i(z, \theta, t) + p_c(z, \theta, t) \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde p_i es la respuesta del modo impulsivo y p_c es la respuesta del modo convectivo. Si bien la suma directa de las máximas amplitudes para ambos modos produce un estimado conservador de las presiones máximas, en la práctica es común combinar las respuestas obtenidas para ambos modos mediante la metodología SRSS.

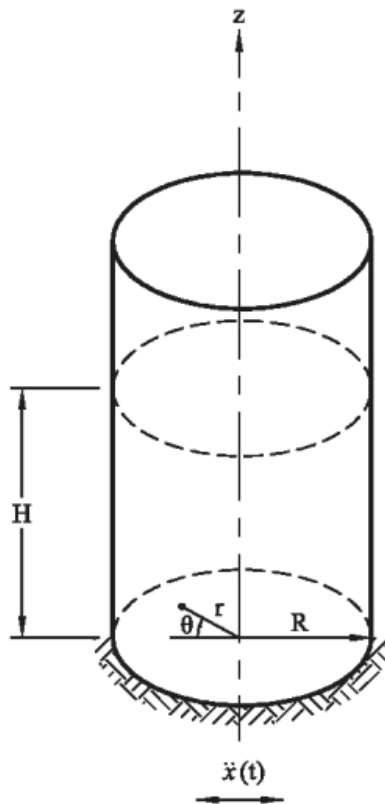


Figura 2.5 Sistema de Coordenadas para Presiones Hidrodinámicas.

Fuente: NZSEE 2009

La distribución de presiones hidrodinámicas para el modo impulsivo en R se encuentra dada por la Ecuación 2.4.

$$p_i(z) = q_0(z) C_d(T_0) \gamma_l R \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde $C_d(T_0)$ corresponde al coeficiente de acción horizontal para el periodo T_0 , según el espectro de respuesta utilizado, y $q_0(z)$ es la distribución adimensional de presiones en z , presentada en la Figura 2.6. Para la obtención del coeficiente $q_0(z)$, el gráfico de la Figura 2.6 debe amplificarse por el valor correspondiente de $q_0(0)$ obtenido de la Figura 2.7.

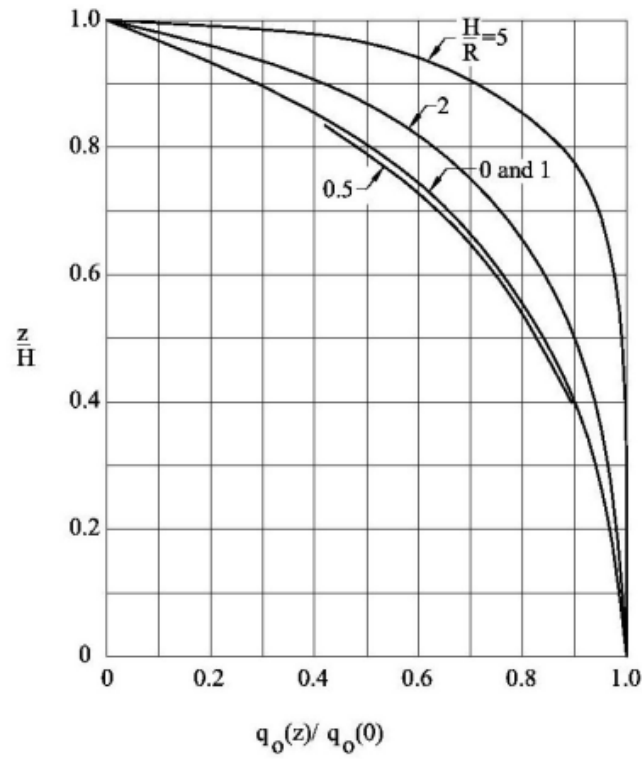


Figura 2.6 Distribución Adimensional Vertical de Presiones Impulsivas.
Fuente: NZSEE 2009

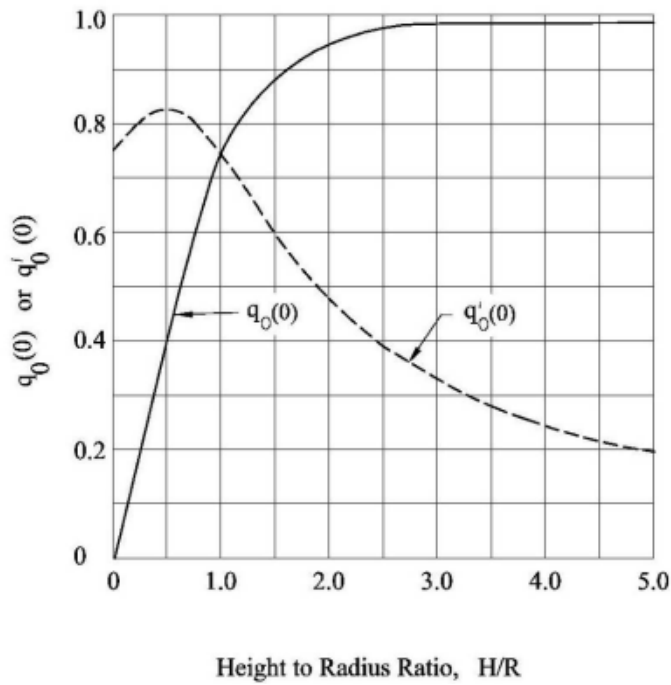


Figura 2.7 Valor Máximo de Presión Impulsiva Adimensional en la Base del Estanque.
Fuente: NZSEE 2009

Por otro lado, la distribución vertical de presiones para el primer modo convectivo en R se encuentra dada por la Ecuación 2.5.

$$p_{c1} = q_1(z) C_d(T_1) \gamma_l R \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde la $C_d(T_1)$ corresponde al coeficiente de acción horizontal para el periodo T_0 , según el espectro de respuesta utilizado, mientras que $q_1(z)$ corresponde a la distribución adimensional de presiones convectivas, y se obtiene de la Figura 2.8.

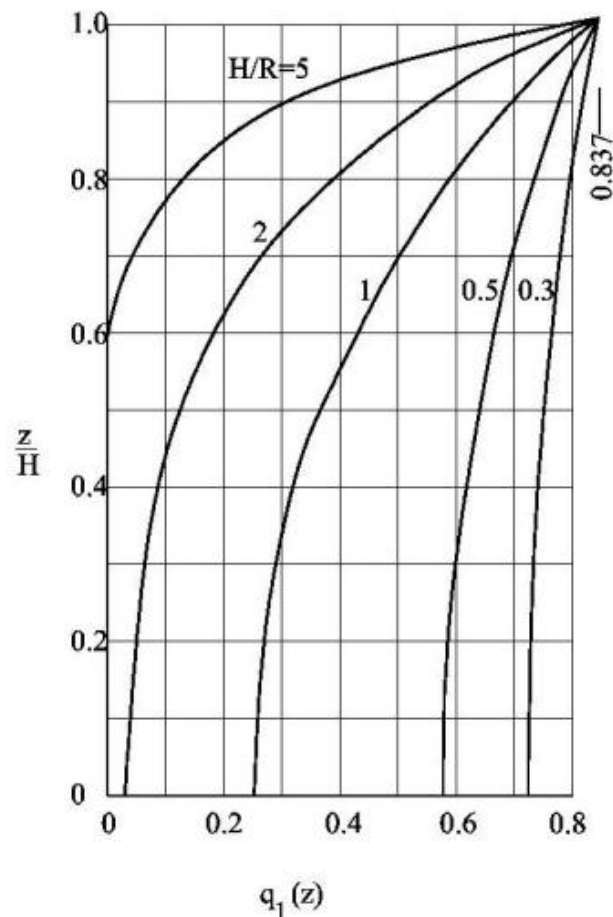


Figura 2.8 Distribución Vertical Adimensional de Presiones para el Primer modo Convectivo.

Fuente: NZSEE 2009

2.5. Cortes Basales y Momentos Volcantes

En el capítulo 3.5 del NZSEE 2009 se presentan las ecuaciones que permiten calcular las fuerzas de corte y momento volcante en la base del estanque, para las presiones hidrodinámicas correspondientes a los modos convectivo e impulsivo.

Para el modo convectivo, se tienen las Ecuaciones 2.6 y 2.7, que corresponden al corte basal y el momento volcante asociados el modo convectivo, respectivamente.

$$V_1 = C_d(T_1) m_1 g \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$M_1 = C_d(T_0) m_1 g h_1 \quad \text{Ec. 2.7}$$

Por otro lado, las Ecuaciones 2.8 y 2.9 permiten obtener el corte basal y el momento volcante asociados al modo impulsivo, respectivamente.

$$V_0 = C_d(T_0) m_0 g \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$M_0 = C_d(T_0) m_0 g h_0 \quad \text{Ec. 2.9}$$

Los componentes modales de masa, m_0 y m_1 se obtienen de la Figura 2.9 y se encuentran normalizados con respecto a la masa total de líquido contenida en el estanque, mientras que las alturas modales de masa asociadas a los modos convectivo e impulsivo se obtienen de la Figura 2.10 y se encuentran normalizados con respecto a la altura de la superficie libre del fluido.

La masa total de líquido contenida en el estanque m_l , para estanques cilíndricos verticales, puede obtenerse a partir de la Ecuación 2.10.

$$m_l = \pi R^2 H \gamma_l \quad \text{Ec. 2.10}$$

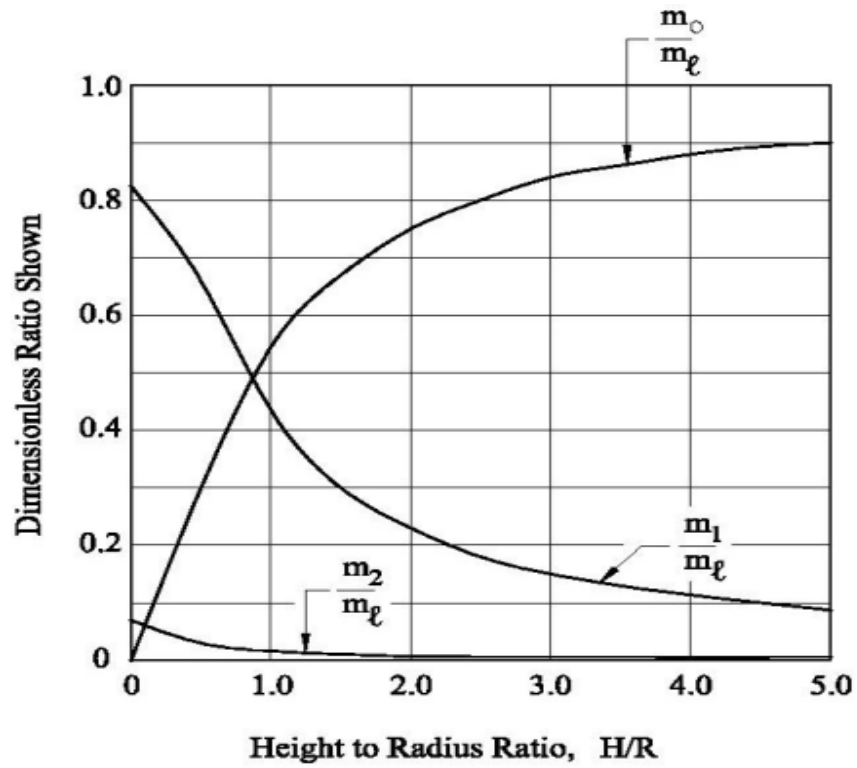


Figura 2.9 Componentes Modales de Masa
Fuente: NZSEE 2009

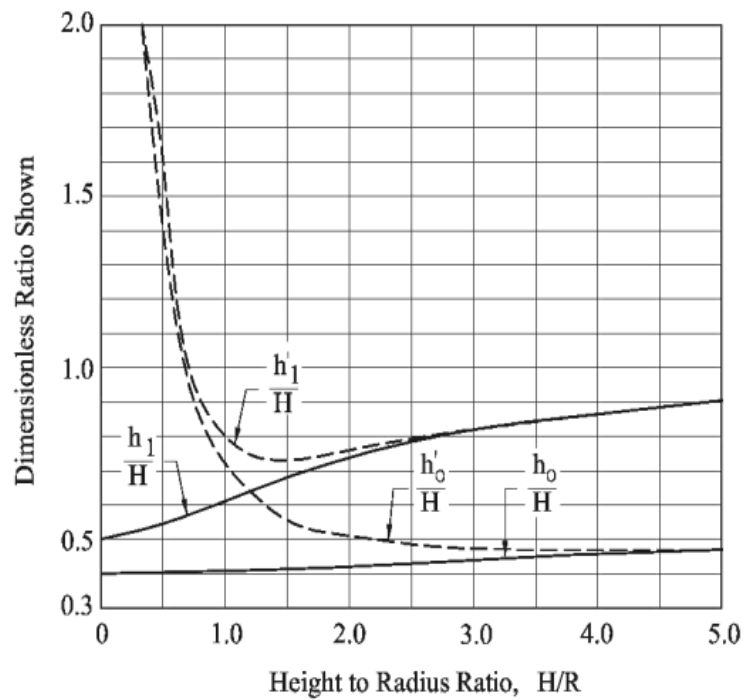


Figura 2.10 Alturas Modales de Masa
Fuente: NZSEE 2009

2.6. Respuesta Estructural

En el capítulo Appendix A del NZSEE 2009 se entregan una serie de gráficos adimensionales que permiten obtener las fuerzas de anillo N_θ y momento vertical M_z en la altura del manto, para distintos valores de H/R y R/t_w . Estos gráficos deben escalarse por las ecuaciones que se describen dentro de este capítulo con el fin de entregar la respuesta estructural al caso estudiado. Se definen los casos correspondientes a la respuesta hidrostática, del modo convectivo y la respuesta del modo impulsivo.

Los gráficos adimensionales de fuerza de anillo y momento vertical en el manto provienen de una modificación del estudio hecho por M. J. N. Priestley (1985), en el cual se supone que la máxima presión inducida por el sismo, para el caso estudiado, se distribuye de forma axialmente simétrica en todo el estanque, es decir, la presión máxima se extrapola a todo el manto de forma radial. Utilizando este método, Priestley describe una analogía de marco simple (BEF) en la cual modela el manto del estanque como una viga simplemente apoyada en su base, a la cual se le conectan puntales rotulados con el fin de modelar la rigidez entregada por la geometría de anillo del manto. Este modelo puede observarse en la Figura 2.11.

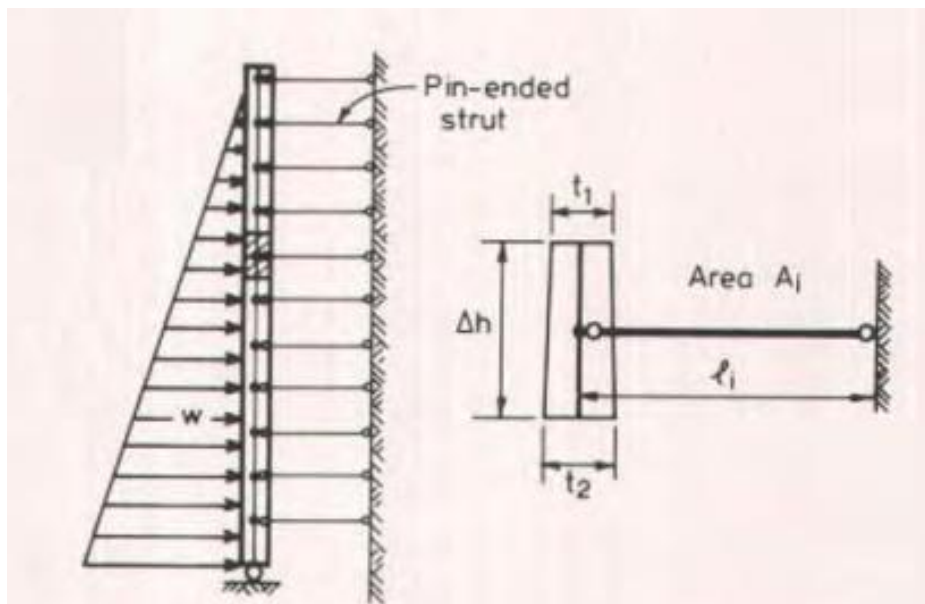


Figura 2.11 Analogía de Marco Discretizado.

Fuente: Priestley (1985)

Los gráficos adimensionales de fuerza de anillo y momento se denominan $N_{\theta n}$, mientras que los de momento se denominan M_{zn} , donde n corresponde al caso estudiado. La Ecuación 2.11 permite obtener la fuerza de anillo, mientras que la Ecuación 2.12 permite obtener el momento vertical en el manto.

$$N_{\theta} = N_{\theta n} R P \quad \text{Ec. 2.11}$$

$$M_z = M_{zn} R P t_w \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde P corresponde a la presión representativa para el caso estudiado, donde, para el caso hidrostático, P es la máxima presión hidrostática, y, para los modos impulsivo y convectivo, corresponde a las Ecuaciones 2.4 y 2.5, respectivamente. Para la obtención de los gráficos adimensionales, se refiere al lector al Appendix A del NZSEE 2009.

2.7. Conclusiones

En este capítulo se presentaron las respuestas dinámicas tanto para el líquido contenido en el estanque como para la estructura, caracterizando los parámetros clave que influyen en la respuesta sísmica de estanques verticales, completando así los objetivos I y II de este trabajo. En el siguiente capítulo, se detallan los modelos y configuraciones necesarias para simular este comportamiento en ANSYS.

CAPÍTULO 3: MODELAMIENTO DINÁMICO

3.1. Introducción

En el presente capítulo se describen los componentes y modelos utilizados para simular el comportamiento dinámico de los estanques para los módulos utilizados en el software ANSYS, con el fin de justificar las elecciones realizadas, desde la simulación de dinámica de fluidos en Fluent, la simulación estructural en Transient Structural, y el acoplamiento de ambas mediante System Coupling. Este programa fue elegido debido a que posee una amplia gama de módulos de simulación, orientados a las distintas ramas de la ingeniería, junto con entornos de modelación integrados para el diseño de geometrías tridimensionales. Para el desarrollo de, se utilizó la licencia estudiantil de ANSYS Workbench.

3.2. ANSYS Fluent

ANSYS Fluent es un módulo de ANSYS especializado en la resolución numérica de problemas relacionados a la dinámica de fluidos utilizando la metodología de volúmenes finitos.

El núcleo de cualquier simulación computacional de fluidos (CFD) son las ecuaciones que rigen el comportamiento de la dinámica de fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes. Este sistema de ecuaciones está compuesto por dos ecuaciones diferenciales parciales; la ecuación de conservación de la masa y la ecuación de la cantidad de movimiento, presentadas en las Ecuaciones 3.1 y 3.2 respectivamente.

$$\nabla \cdot U = 0 \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + \rho F \quad \text{Ec. 3.2}$$

En la Ecuación 3.1, U corresponde al campo de velocidades. De esta ecuación se deriva que se conserva la masa durante el movimiento dinámico del fluido, mientras que la Ecuación 3.2

corresponde a la segunda Ley de Newton, donde los términos a la izquierda representan las fuerzas inerciales del fluido, y los términos a la derecha representan las fuerzas actuantes en el fluido, tanto internas como externas, donde p corresponde a las presiones internas, μ al tensor de esfuerzos viscosos y F al vector de fuerzas externas.

Para fluidos incompresibles, las ecuaciones de Navier-Stokes no poseen una solución algebraica, por lo que su solución debe ser aproximada por algoritmos de resolución iterativos y la solución debe ser promediada en un área definida, lo que se denomina Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS).

3.2.1 Mallado

El mallado es el proceso en el cual se discretiza el volumen definido como dominio de fluido, con el fin de resolver las ecuaciones de Navier Stokes de forma promediada (RANS) en el volumen de cada celda. El dominio del fluido en este trabajo se discretizó utilizando Hex-Cells, celdas hexahédricas de formulación Euleriana, es decir, celdas cuyos nodos permanecen rígidos durante la simulación.

La transferencia de información entre celdas de este tipo se logra mediante la transferencia ortogonal de las propiedades del fluido en la celda para el tiempo estudiado, lo cual se ejemplifica en Figura 3.1. Con el fin de lograr una malla predominantemente ortogonal, se utilizó la metodología Multizone Sweep.

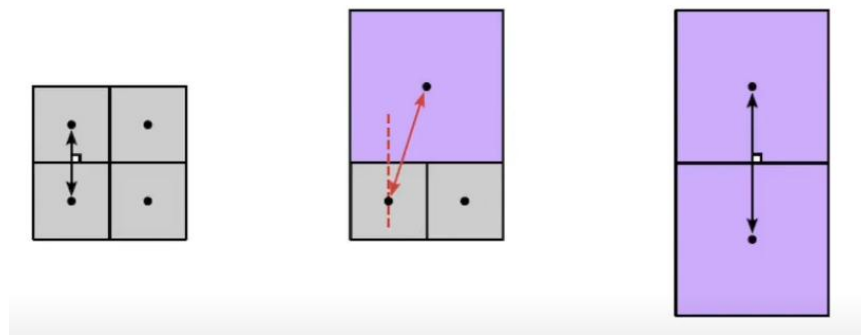


Figura 3.1 Transferencia de Información entre Celdas.

Fuente: Fluid Dynamics 101.

Por otro lado, con el fin de capturar los gradientes de presión y velocidad en los límites de la geometría con el fluido, es necesario incorporar capas de inflación, que corresponden a una capa de celdas cuyo

espesor disminuye a medida que se aproximan a la frontera del dominio del fluido. Esta capa de celdas se presenta en la Figura 3.2.

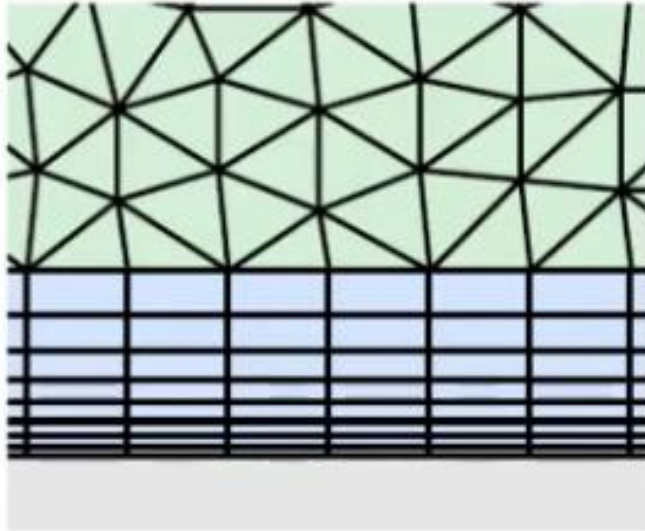


Figura 3.2 Capas de Inflación.

Fuente: Fluid Dynamics 101

3.2.2 Modelo Multifase

El modelo multifase Volume of Fluid (VOF) fue desarrollado por Hirt & Nichols (1981) con el fin de resolver problemas de simulaciones transitorias de fluidos con superficie libre, mediante la aplicación de un coeficiente de fracción de volumen en celdas con formulación Euleriana.

En este modelo, para cada fase considerada en la simulación, se le asigna a cada celda una fracción de volumen α correspondiente a la fracción de la fase presente en la celda proveniente del mallado, donde para cada volumen de control, la suma de todas las fases presentes corresponde a la unidad. Por otro lado, los campos de velocidades y presiones son compartidos por las fases y representan valores promediados en base al volumen de la celda, por ende, las variables y propiedades en cada celda pueden estar basadas en las propiedades de una de las fases, o ser una mezcla representativa de estas, en base a sus valores de fracción de volumen.

En otras palabras, si el fluido q_{th} posee una fracción de volumen en cada celda denominada α_q , entonces las siguientes tres condiciones son posibles.

- $\alpha_q = 0$: La celda se encuentra vacía (del fluido q_{th})
- $\alpha_q = 1$: La celda se encuentra llena (del fluido q_{th})
- $0 < \alpha_q < 1$: La celda contiene una interfaz entre el fluido q_{th} y una o más fases.

3.2.3 Modelo de Turbulencia

Los flujos turbulentos se caracterizan por campos de presiones y de velocidades con altos gradientes, los cuales mezclan cantidades como momento, energía, concentración de especies y, dado que estas concentraciones pueden ser de escala pequeña y alta frecuencia, resultan altamente costosas computacionalmente para ser simuladas de forma directa. Debido a esto, existen modelos que permiten aproximar estas turbulencias.

El modelo utilizado para el desarrollo de este trabajo corresponde al modelo $k - \omega SST$, el cual combina los métodos $k - \varepsilon$ y $k - \omega$, utilizando el modelo $k - \omega$ en las cercanías con la frontera del fluido y $k - \varepsilon$ en la sección de Free-Stream, lo que lo hace particularmente útil en simulaciones que incorporan turbulencia en la frontera del fluido y flujos poco turbulentos en otras áreas, como lo es la simulación del movimiento de oleaje *Sloshing*.

3.2.4 Algoritmo PISO

Como se mencionó previamente, la dificultad para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles se debe a que las ecuaciones de conservación de la masa y momento se encuentran acopladas.

Para resolver este problema, se desarrollaron algoritmos como PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*), diseñado específicamente para simulaciones transitorias. Este algoritmo predice un campo de velocidades e itera con respecto a este, desacoplando las ecuaciones de presión y velocidad, aproximando así de forma iterativa las ecuaciones de Navier-Stokes.

3.2.5 Mallado Dinámico

El mallado dinámico corresponde a una serie de opciones mediante las cuales la malla utilizada para el dominio del fluido puede variar con respecto al tiempo, en base a parámetros determinados o externos. Dentro de las opciones disponibles, Smoothing permite deformar los nodos de la malla a partir de la información sobre la deformación en una frontera definida, mediante formulaciones Lagrangianas, transfiriendo la deformación de los nodos desde la deformada de la frontera hacia los nodos interiores, en base a parámetros automáticos provenientes de las propiedades de la malla, o definidos por el usuario.

Para definir esta frontera, se utiliza la opción de mallado dinámico Fluid Solid Interface (FSI), la cual permite seleccionar una o más caras de la geometría del fluido, en la cual se importarán deformaciones desde una simulación externa.

3.2.6 Mesh Movement

La opción de Mesh Movement en ANSYS Fluent permite trasladar rígidamente la malla del dominio a una velocidad definida por una función elegida por el usuario. Esta opción utiliza la formulación ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian), con lo que las ecuaciones de Navier-Stokes se redefinen de forma que incorporan el movimiento de la malla como sistema de referencia, resultando en flujos que son calculados con la velocidad relativa del fluido.

3.3. ANSYS Transient Structural

El módulo Transient Structural de ANSYS está diseñado para resolver problemas estructurales dependientes del tiempo, en los que se desea capturar la evolución dinámica de deformaciones, esfuerzos y aceleraciones bajo la acción de cargas transitorias o de contacto.

3.3.1 Mallado

El mallado en ANSYS Transient Structural depende de la geometría elegida en la simulación. En caso de ser una simulación con elementos idealizados como tipo Shell, se utilizan elementos tipo SHELL181 para el mallado. Esta formulación corresponde a un elemento cuadrilátero con cuatro nodos y seis grados de libertad por nodo, basado en la teoría de placas de Mindlin-Reissner. Esta formulación permite capturar deformaciones por flexión y esfuerzos de membrana. Propiedades como el espesor y la masa se asignan a de forma automática cada elemento.

La metodología de mallado Multizone permite dividir el dominio en distintas regiones según su geometría, generando un mallado formado únicamente por elementos cuadriláteros.

3.3.2 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde en Transient Structural son utilizadas para dar las condiciones y acciones externas que rigen el comportamiento del modelo durante la simulación. Estas pueden incluir restricciones mecánicas como condiciones de apoyo, cargas, velocidades impuestas, condiciones térmicas entre otras. Las condiciones de apoyo se diferencian en la restricción del movimiento y/o rotación de los nodos. Entre las condiciones de apoyo disponible se encuentran apoyo fijo, apoyo simple y apoyo deslizante.

Además, Transient Structural permite aplicar velocidades forzadas directamente sobre un cuerpo o superficie, las que pueden ser definidas mediante una función en el tiempo. Esta opción es útil cuando se desea imponer un movimiento controlado sobre una parte del modelo, lo que genera aceleraciones y, en consecuencia, fuerzas inerciales que influyen en la respuesta estructural.

3.4. ANSYS System Coupling

El módulo de System Coupling permite unir dos solvers de especialidades distintas para la transferencia de información entre ellos durante una simulación transitoria, actuando como un gestor

de información En este módulo, se definen los pares de zonas de transferencia de información designados en cada solver, donde Transient Structural recibe presiones y transmite deformaciones, y Fluent transmite presiones y recibe deformaciones en la frontera definida.

Durante cada iteración de la simulación transitoria System Coupling realiza iteraciones escalonadas, en las que, en base a las cantidades mínimas y máximas definidas, el mismo instante de tiempo es realizado de forma consecutiva hasta lograr cumplir con un criterio de convergencia establecido o alcanzar las iteraciones escalonadas máximas.

En el caso probable de que las mallas entre las que se transfiere la información no coincidan, System Coupling utiliza un método de interpolación basado en la proyección generalizada entre las superficies de la malla de cada dominio. Esto quiere decir que la cantidad a ser transferida es interpolada con metodologías que dependen del tipo de información que esta sea; por ejemplo, las presiones son integradas como cargas superficiales que se aplican en los nodos o elementos estructurales más cercanos, mientras que los desplazamientos son proyectados utilizando interpolaciones del tipo inverse distance weighting, el cual corresponde a un promedio ponderado de los valores en los puntos vecinos.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se definieron los módulos utilizados para lograr la simulación que tiene como objetivo este trabajo, estableciendo las elecciones realizadas para la modelación en base a un marco teórico justificado, logrando así completar parcialmente los objetivos específicos III y IV y de forma completa el objetivo V.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1. Introducción

En este capítulo se describen de forma específica los parámetros utilizados en los módulos de ANSYS para la obtención de la simulación acoplada para luego establecer la metodología empleada para la obtención de los resultados finales del presente trabajo.

4.2. Preparación de la Simulación

Para el estudio de la respuesta dinámica en estanques excitados basalmente, se definieron tres relaciones de aspecto H/R a ser investigadas, las cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Relaciones de Aspecto Estudiadas

H/R	H [m]	R [m]	t_w [mm]
0.5	4	8	8
1	8	8	8
2	6	3	8

La modelación de estas geometrías en ANSYS corresponde una geometría simplificada, a fin de emular el modelo teórico utilizado por Priestley (1985), definido como el manto de la estructura modelado como una superficie simplemente apoyada en sus bordes superior e inferior, mientras que el dominio del fluido se modela mediante un cilindro sólido. Para lograr el desarrollo del modo convectivo, a cada geometría se le dieron tres metros de revancha con respecto a la altura libre del fluido. La geometría del dominio del fluido utilizada para la relación de aspecto H/R=1 se presenta en la Figura 4.1, mientras que la correspondiente al manto del estanque se presenta en la Figura 4.2.

La geometría, compuesta por el dominio del fluido como volumen sólido y el correspondiente manto del estanque, se dividen entre los solvers Fluent y Transient Structural, mediante la supresión de la geometría no relevante para cada simulación.

Ansys
2025 R1
STUDENT

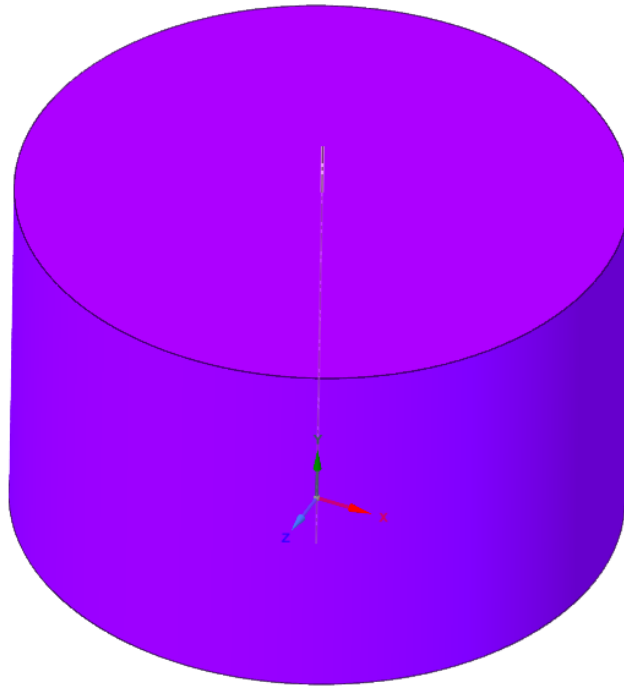


Figura 4.1 Geometría del Fluido para $H/R=1$.

Ansys
2025 R1
STUDENT

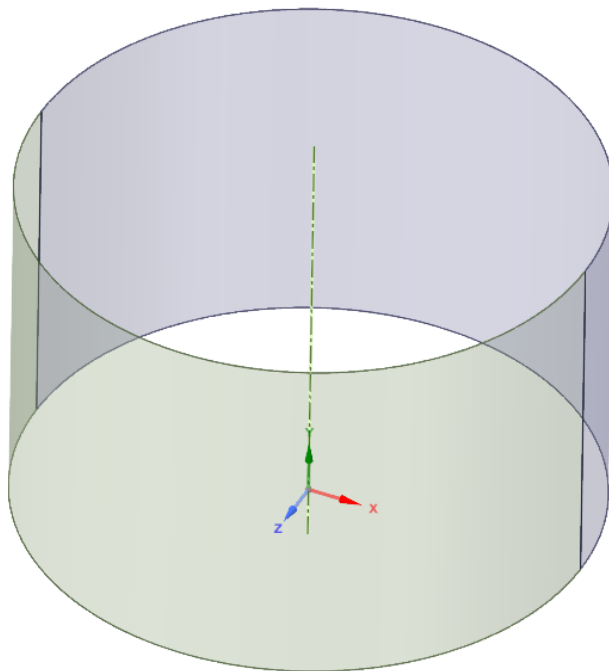


Figura 4.2 Geometría del Manto para $H/R=1$.

4.2.1 Simulación en Fluent

Previamente a la simulación en Fluent, la geometría del fluido es mallada utilizando elementos hexaédricos de tamaño de celda 0.2 m, lo cual es suficiente para todas las relaciones de aspecto estudiadas, según el trabajo realizado por Zulfiqar et al. (2023), quienes realizaron un estudio de sensibilidad con respecto a la malla. Dicho esto, en la Tabla 2 se presentan tanto el máximo tamaño de las celdas, como la cantidad de celdas por simulación.

Tabla 2 Tamaño y Número de Celdas en Fluent

Fluent		
H/R	Tamaño [m]	N° Celdas
0.5	0.15	465,440
1	0.2	414,000
2	0.1	389,120

Este mallado es para todas las relaciones de aspecto, y para H/R=1 puede observarse en la Figura 4.4. Luego, en Fluent se activa el modelo de fase Volume of Fluid, definiendo el espacio utilizado por el fluido como el correspondiente a la altura libre (H) para cada caso, donde el resto del dominio queda definido como aire. Se define también el modelo de turbulencia $k - \omega SST$. El fluido utilizado en la modelación corresponde a Water Liquid (agua líquida) de la biblioteca de ANSYS Fluent, con una densidad de 998.2 Kg/m^3 .

Para definir la oscilación forzada, se obtienen los periodos de vibración para los modos convectivo e impulsivo de cada relación de aspecto a partir de las Ecuaciones 2.1 y 2.2, y utilizando la opción Mesh Movement, se define la siguiente velocidad harmónica forzada.

$$v_{ij}(t) = -\frac{A}{\omega_{ij}} \cos(\omega_{ij}t) \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde A corresponde a la amplitud de la aceleración basal, definida de forma arbitraria como 0.3g para todos los modos y relaciones de aspecto estudiados, y ω_{ij} corresponde a la frecuencia angular correspondiente al modo i de la relación de aspecto j .

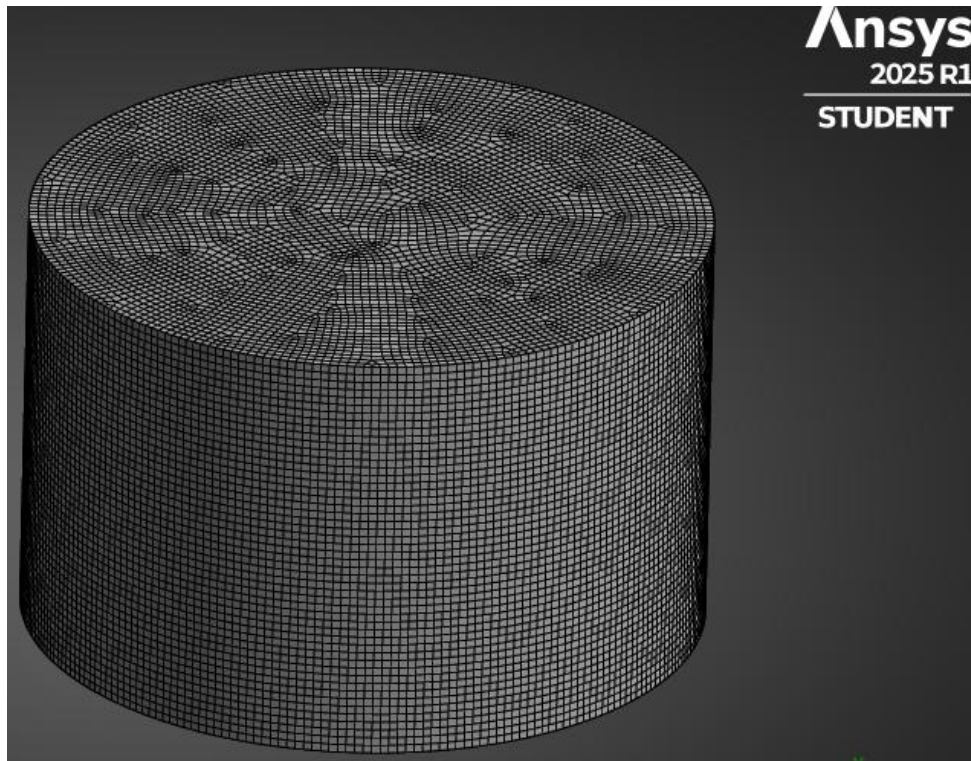


Figura 4.3 Mallado del Dominio del Fluido.

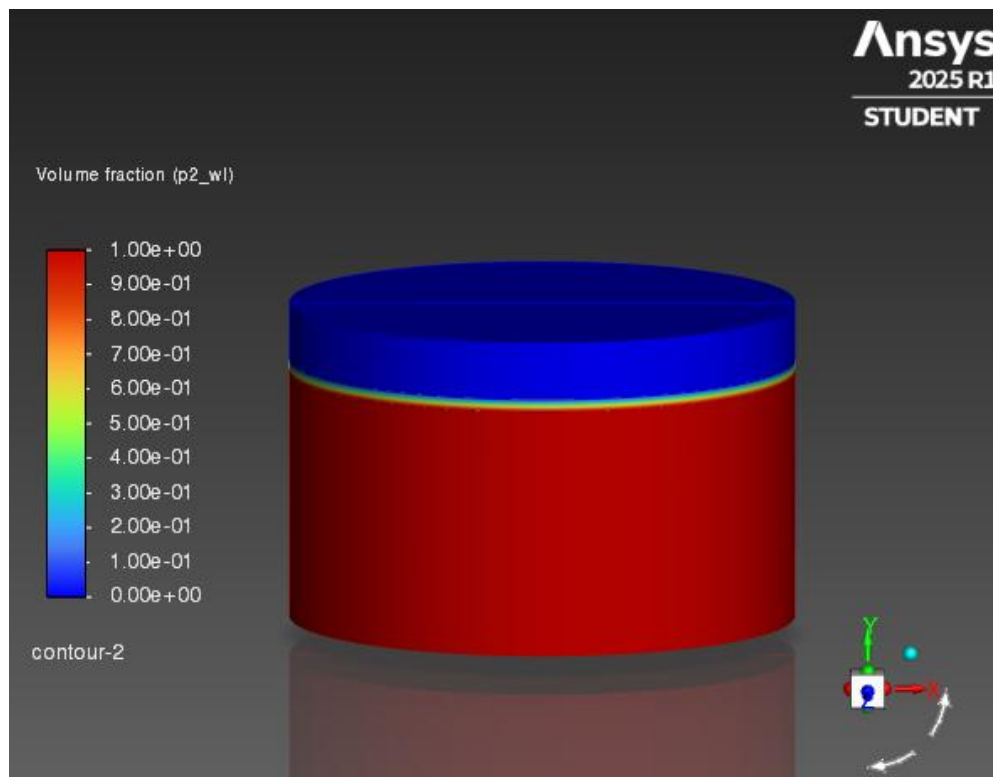


Figura 4.4 Modelo en ANSYS Fluent para $H/R=1$.

Se define también la aceleración de gravedad en la dirección -Y junto con las opciones de mallado dinámico, donde se especifican la zona de interacción fluido estructura, correspondiente a la cara cilíndrica del dominio del fluido además de la metodología de deformación de malla Smoothing. Finalmente, se especifican 20 iteraciones por time step, junto con aplicar el algoritmo PISO para la resolución aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes. El modelo en Fluent se presenta en la Figura 4.4.

4.2.2 Simulación en Transient Structural

En Transient Structural, el manto es definido como simplemente apoyado en sus bordes superior e inferior y mallado utilizando elementos SHELL181 bidimensionales, cuyas dimensiones por simulación se especifican en la Tabla 3, con la metodología Multizone, como se presenta en la Figura 4.5. El manto se define como la zona de interacción fluido estructura. Como material, se escoge Structural Steel de la biblioteca de ANSYS.

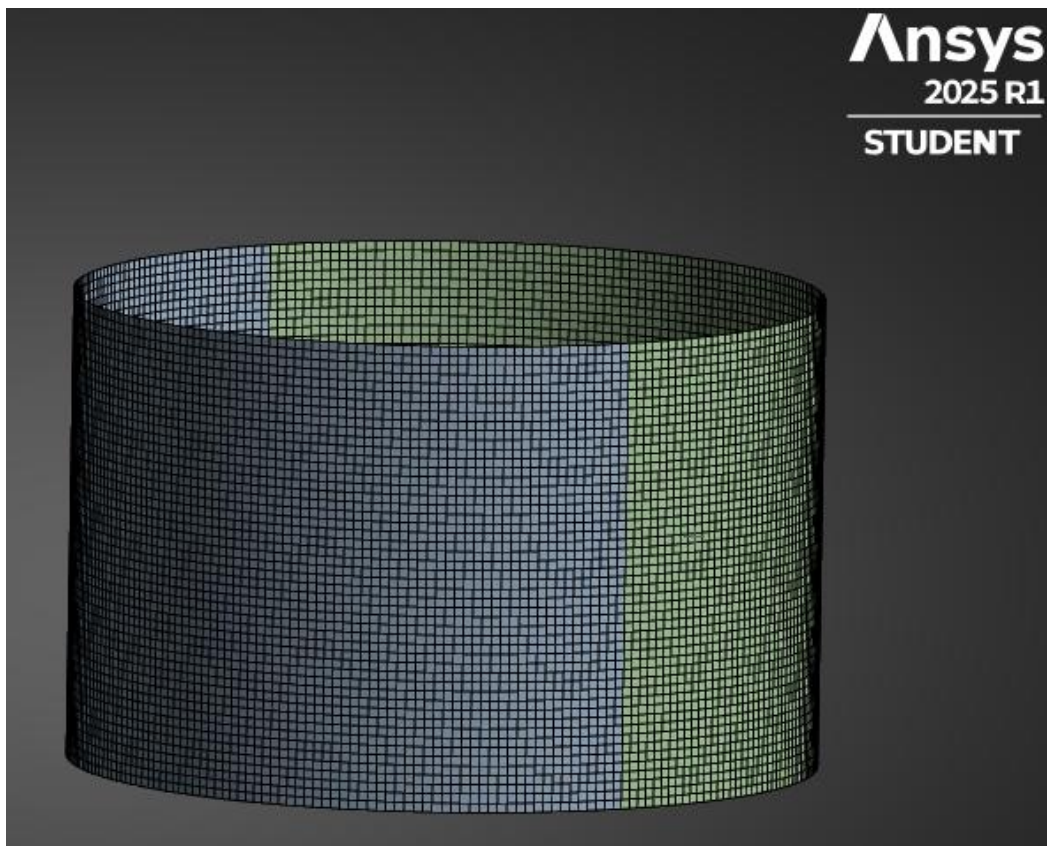


Figura 4.5 Modelo en Transient Structural.

En la Tabla 3 se muestran el tamaño de los elementos, junto con la cantidad de nodos para cada simulación.

Tabla 3 Tamaño de Elementos y Cantidad de Nodos en Transient Structural

Transient Structural		
H/R	Tamaño [m]	N° Nodos
0.5	0.15	13,776
1	0.2	15,262
2	0.1	15,040

4.3. System Coupling

Ambos solvers se unen mediante System Coupling, donde los time steps se definen en base al modo estudiado. Para el modo convectivo se utilizan time steps de 0.01 s según el trabajo realizado por Sanapala et al., (2016), mientras que para el modo impulsivo se utilizan time steps de 0.0005 s. En ambos casos se establecen un mínimo de tres y un máximo de ocho iteraciones escalonadas.

4.4. Procesado de Datos

Los resultados obtenidos pueden dividirse en dos grupos; aquellos correspondiente a la respuesta estructural del estanque y la distribución de presiones hidrodinámicas. Los resultados de interés con respecto a la respuesta hidrodinámica del fluido corresponden a las distribuciones de presiones para los modos convectivo e impulsivo, junto con la respuesta hidrostática, mientras que la respuesta estructural de interés corresponde a los esfuerzos tensionales de anillo, el momento fuera del plano y las fuerzas de corte en los apoyos. Para la obtención de las respuestas para los modos convectivo e impulsivo, se le restará la respuesta hidrostática, con el fin de obtener la respuesta dinámica pura.

4.4.1 Respuesta Hidrodinámica

Para el estudio de la respuesta hidrodinámica se obtienen las distribuciones de presiones en altura para los casos tres casos estudiados; hidrostático, convectivo e impulsivo. La distribución de presiones se

obtiene desde la base del estanque ($H=0$) hasta la superficie libre del fluido en reposo ($H=H$), para todos los casos de estudio.

Como fue mencionado previamente, para la obtención de la distribución de presiones hidrodinámica de los modos convectivo e impulsivo, es necesario la sustracción de las presiones hidrostáticas a los datos obtenidos de Fluent. Para el modo convectivo la respuesta se obtiene en $t = T_1$, mientras que para el modo impulsivo la respuesta se encuentra desfasada $-\frac{\pi}{2}$ con respecto a la respuesta estructural.

Para la obtención de las distribuciones de presión adimensionales se estudian las ecuaciones presentadas en el capítulo 2.4, donde las distribuciones adimensionales se obtienen del despeje presentado en las Ecuaciones 4.2 y 4.3, para los modos convectivo e impulsivo, respectivamente, mientras que el gráfico de presiones de fondo máximas adimensionales para el modo impulsivo se obtiene mediante la Ecuación 4.4.

$$q_c(z) = \frac{P_c(z)}{0.3 \gamma_l P(H)} \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$q_i(z) = \frac{P_i(z)}{P_i(0)} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$q_0(0) = \frac{0.3 \gamma_l R}{P_i(0)} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde $P_c(z)$ y $P_i(z)$ corresponden a las distribuciones de presión para los modos convectivo e impulsivo en altura, para cada razón de H/R estudiada.

4.4.2 Respuesta Estructural

Una vez obtenidas las tensiones de anillo y esfuerzos a partir del momento vertical desde Transient Structural, se busca obtener los gráficos adimensionales de fuerza de anillo y momento vertical, mediante el despeje de las ecuaciones descritas en el capítulo 2.6, recordando,

$$N_{\theta} = N_{\theta n} R P \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$M_z = M_{zn} R P t_w \quad \text{Ec. 4.6}$$

Por otro lado, los esfuerzos de anillo se calculan mediante las ecuaciones 4.4 y 4.5.

$$f_{h\theta} = \frac{N_{\theta}}{t_w} \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$f_{b\theta} = \frac{6 M_z}{t_w} \quad \text{Ec. 4.8}$$

De lo anterior se despejan las ecuaciones que permiten obtener los gráficos adimensionales para cada caso estudiado, presentadas como las Ecuaciones 4.6 y 4.7.

$$N_{\theta n} = \frac{f_{h\theta} t_w}{P R} \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$M_{zn} = \frac{f_{b\theta} t_w}{6 P R} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Donde P es la presión representativa para cada modo de estudio, y para propósito de despejar las distribuciones de fuerza y momento vertical adimensional, corresponden a la presión en H para el modo convectivo y en la base del estanque para el modo impulsivo, obtenidas a partir de los resultados de Fluent, en el tiempo correspondiente al modo estudiado, para cada caso de H/R. Luego, los resultados obtenidos fueron graficados para ser comparadas visualmente con respecto a los gráficos expuestos en el anexo A del NZSEE 2009.

Otros resultados de la respuesta estructural estudiados corresponden a las fuerzas de corte en la base del modelo, obtenidas de la reacción del apoyo simple, con las que, utilizando las ecuaciones descritas en el capítulo 2.5 del presente documento, se puede obtener la fracción de masa de cada modo para

así ser comparada con los resultados de Veletsos (1984). De acuerdo con lo propuesto por Veletsos (1984), se tienen las siguientes expresiones:

$$V_1 = C_d(T_1) m_1 g \quad \text{Ec. 4.11}$$

$$V_0 = C_d(T_0) m_0 g \quad \text{Ec. 4.12}$$

4.5. Conclusiones

En el presente capítulo se describió la metodología utilizada para este trabajo, desde los casos de estudio, la preparación de la simulación hasta el procesado de los datos, tanto para la respuesta hidrodinámica como estructural, logrando así los objetivos específicos VI, VII y VIII.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. Introducción

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones para los casos convectivo e impulsivo, para las distintas razones de H/R estudiados. Los resultados se dividen entre aquellos correspondientes a los componentes hidrodinámicos y la respuesta estructural del estanque.

5.2. Periodos Modales

En la Tabla 4 se presentan los periodos modales obtenidos para los distintos H/R estudiados, en base a las ecuaciones presentadas en el Capítulo 2.3.2.

Tabla 4 Periodos Modales

H/R	Periodo [s]	
	Convectivo	Impulsivo
0.5	4.91	0.08
1	4.29	0.11
2	2.56	0.05

5.3. Distribución Adimensional de Presiones

En la Figura 5.1 se presentan las distribuciones adimensionales de presión para el modo impulsivo, mientras que en la Figura 5.2 se presentan las distribuciones de presión adimensional para el primer modo convectivo obtenidas para los distintos H/R estudiados. Por otro lado, en la Figura 5.3 se presentan los valores máximos de presiones impulsivas en la base del estanque.

Distribución Adimensional de Presiones Impulsivas

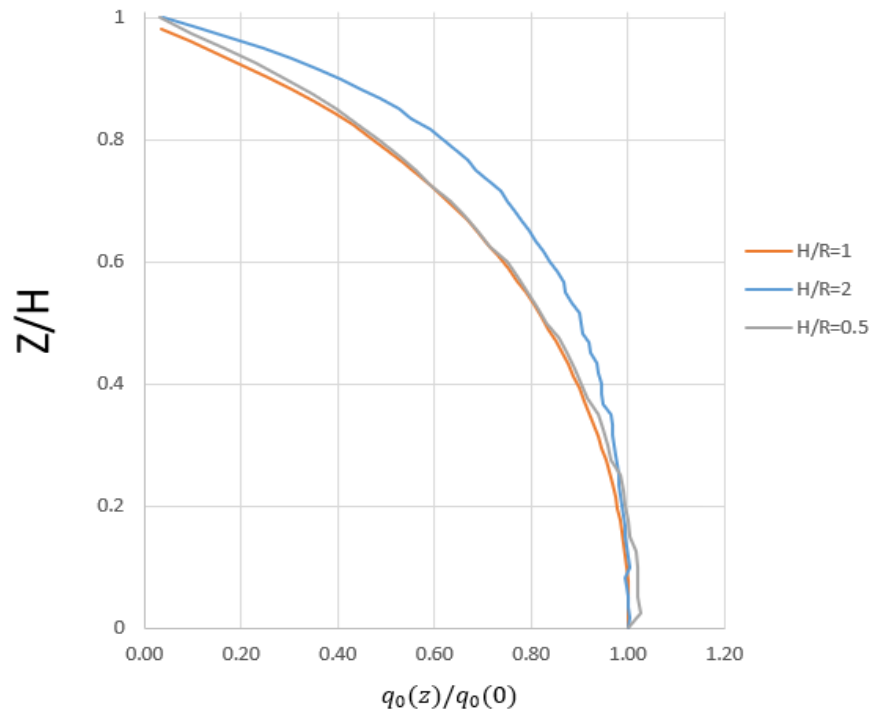


Figura 5.1 Distribución Adimensional de Presiones Impulsivas.

Distribución Adimensional de Presiones Convectivas

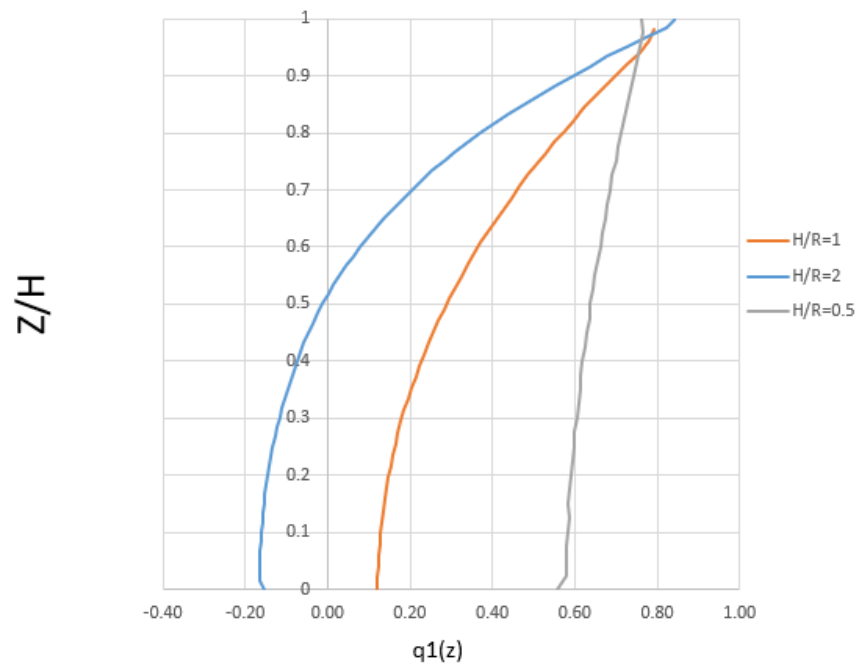


Figura 5.2 Distribución Adimensional de Presiones Convectivas.

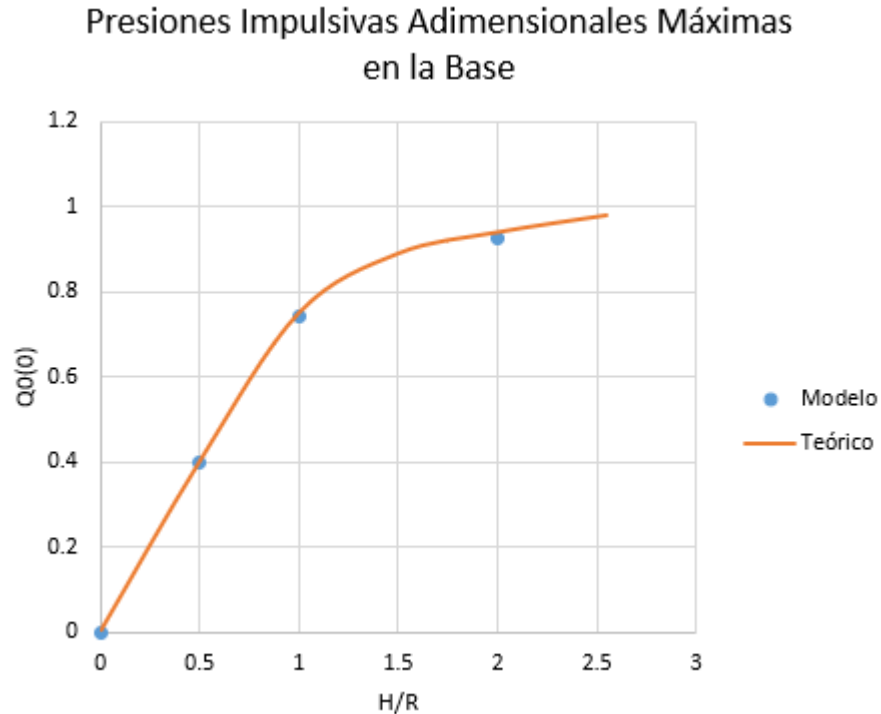


Figura 5.3 Presiones Impulsivas Adimensionales Máximas en la Base.

5.4. Respuesta Estructural

En esta sección se presentan las respuestas estructurales obtenidas para los distintos H/R estudiados. Primero se presentan los resultados para el caso hidrostático, entre las Figuras 5.4 y la 5.9, luego la distribución obtenida para el modo convectivo, desde la Figura 5.10 hasta la 5.15, para finalizar con el modo impulsivo, entre las Figuras 5.16 y 5.21. Para todos los gráficos, se presenta también su contra parte teórica, obtenida del NZSEE 2009.

Por otro lado, en la Figura 5.22 se presentan los porcentajes de masa modales obtenidos para las distintas razones de H/R estudiadas, comparados también con los valores teóricos, según se describen en el NZSEE 2009.

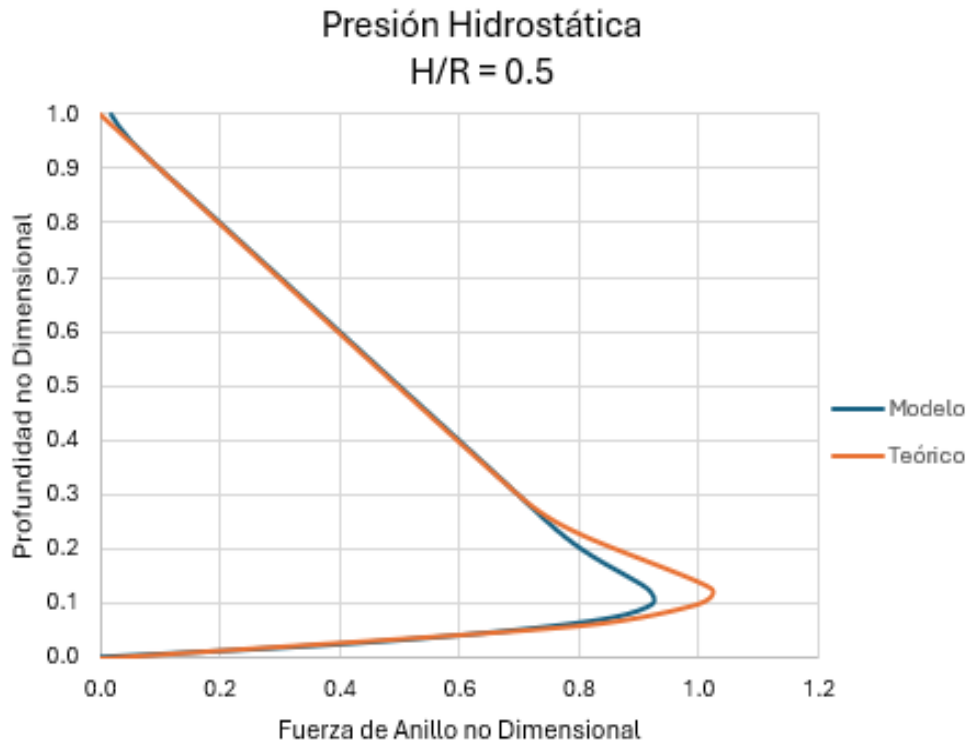


Figura 5.4 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Hidrostático H/R=0.5.

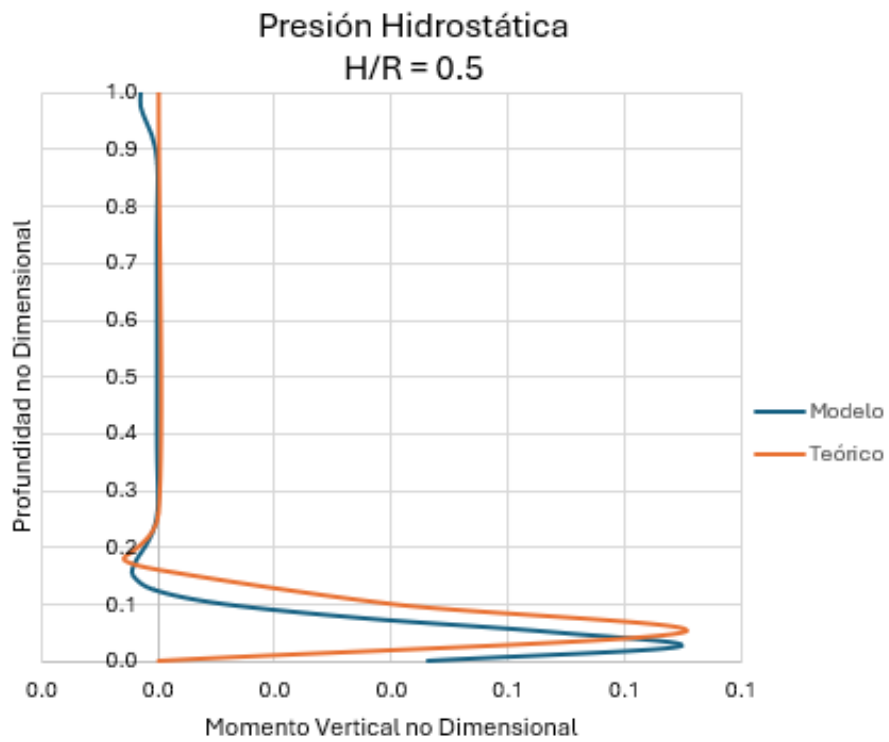


Figura 5.5 Momento Vertical Adimensional, Caso Hidrostático H/R=0.5.

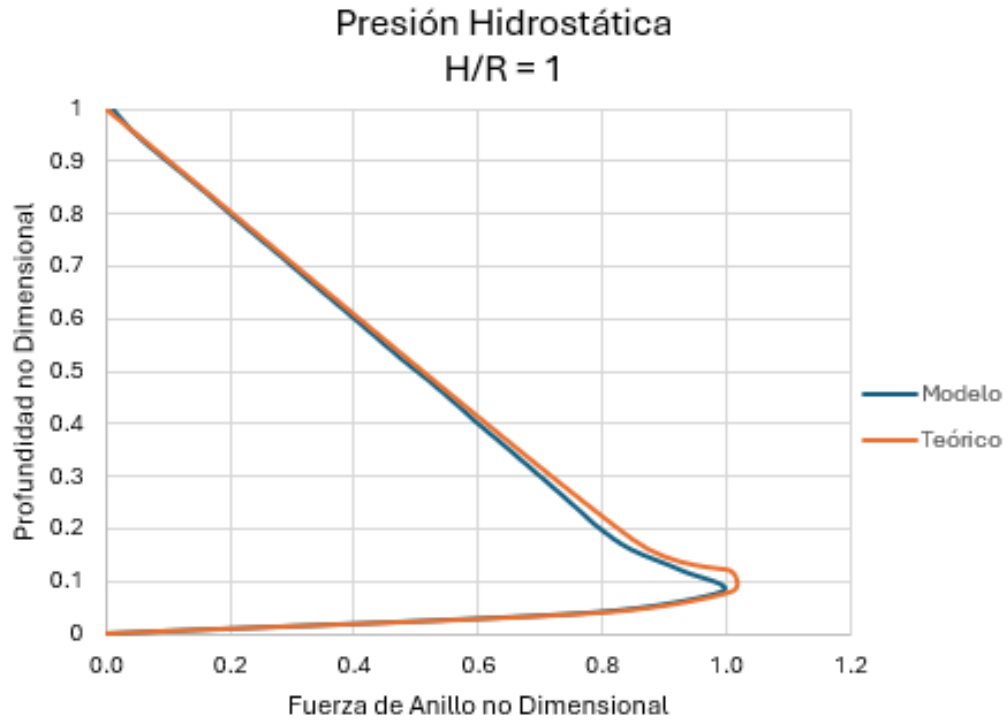


Figura 5.6 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Hidrostático H/R=1.

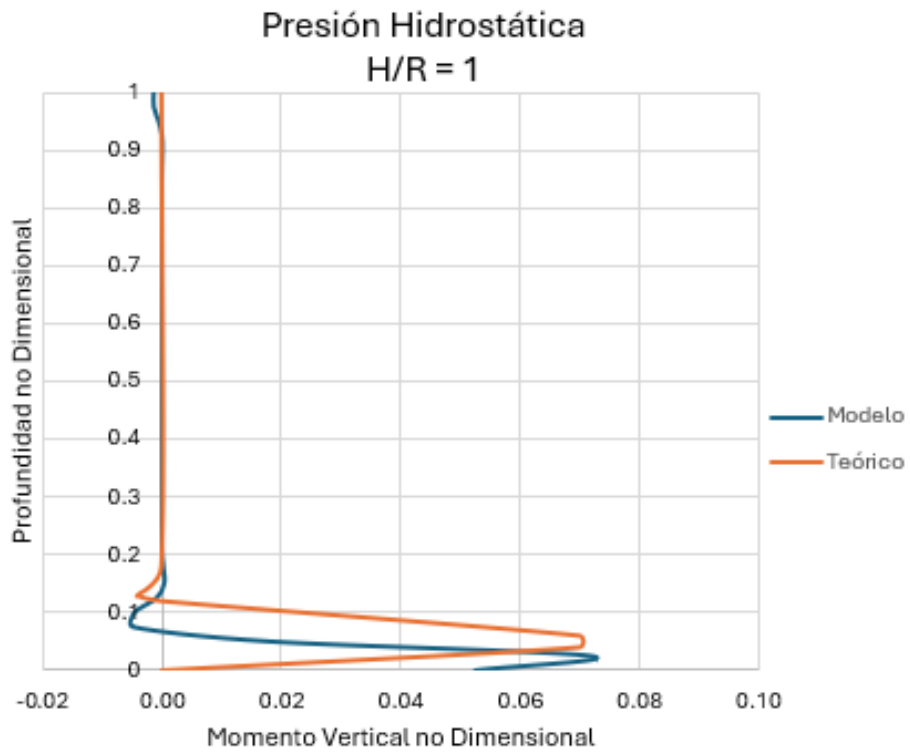


Figura 5.7 Momento Vertical Adimensional, Caso Hidrostático H/R=1.

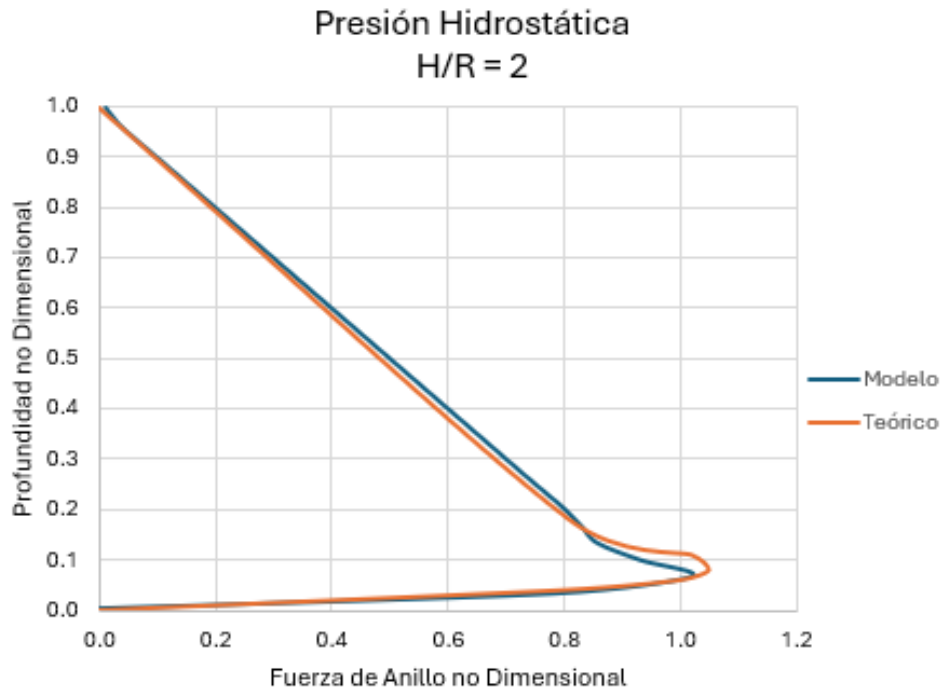


Figura 5.8 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Hidrostático H/R=2.

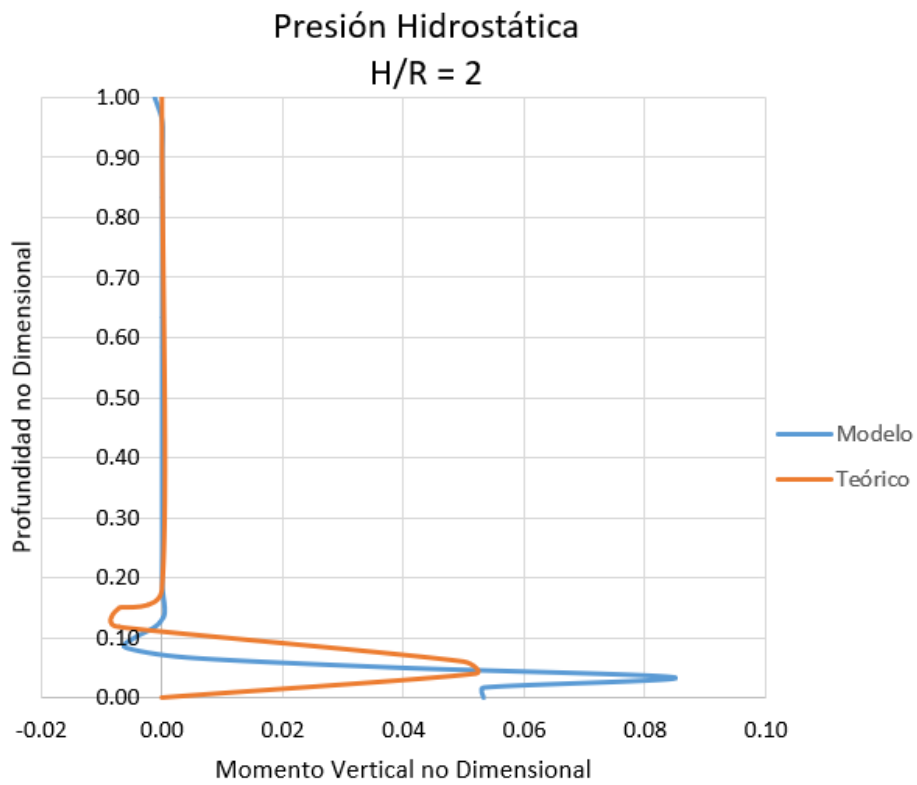


Figura 5.9 Momento Vertical Adimensional, Caso Hidrostático H/R=2.

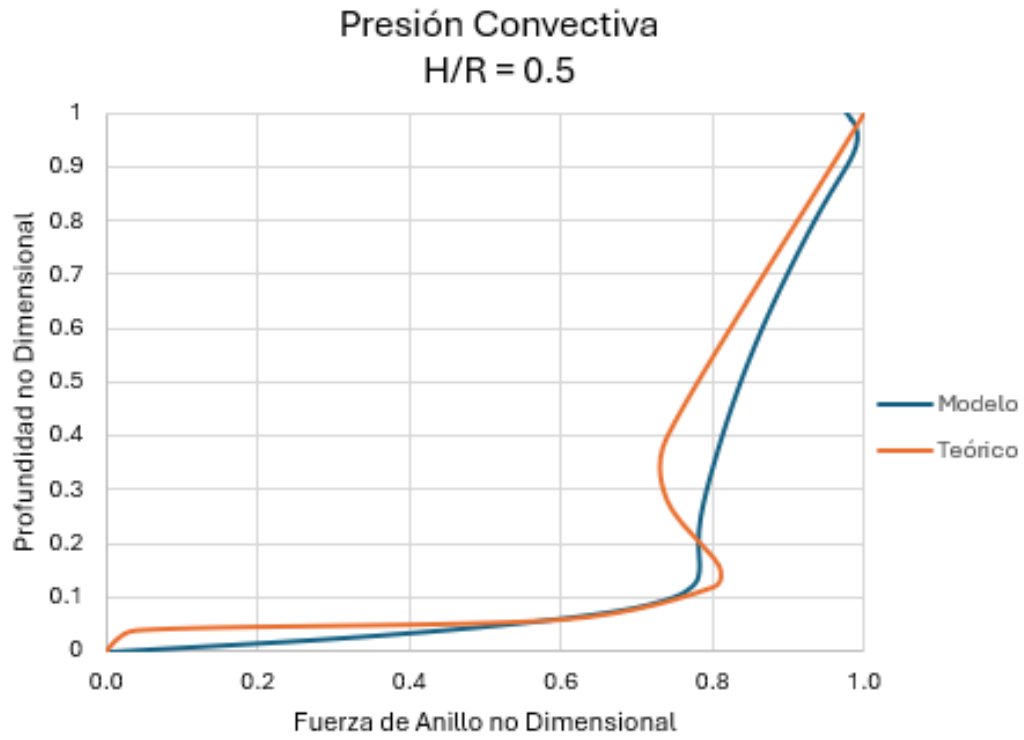


Figura 5.10 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Convectivo H/R=0.5.

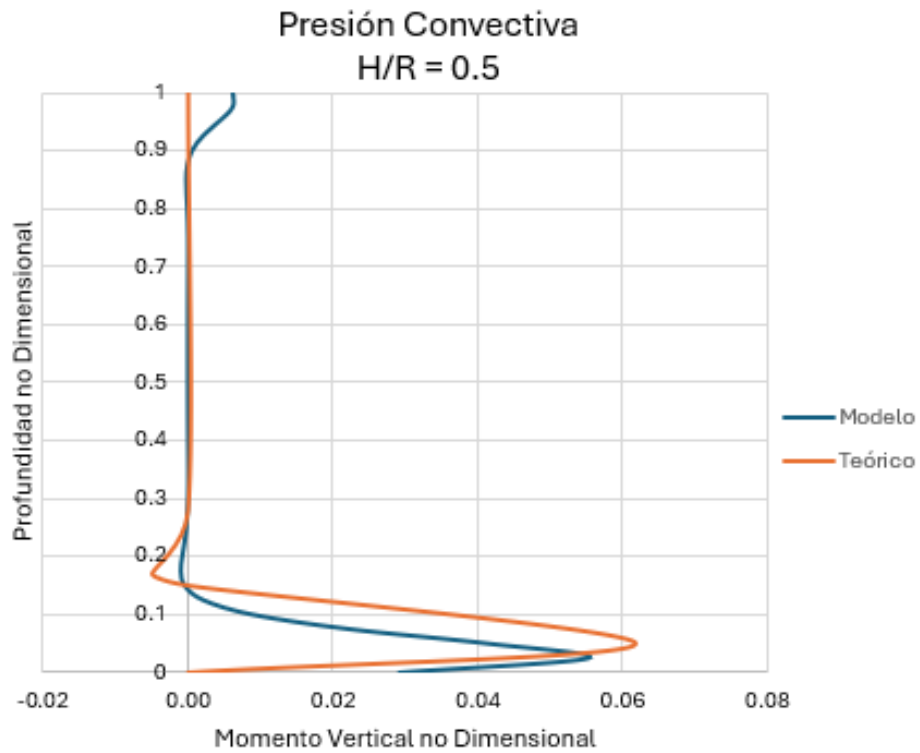


Figura 5.11 Momento Vertical Adimensional, Caso Convectivo H/R=0.5

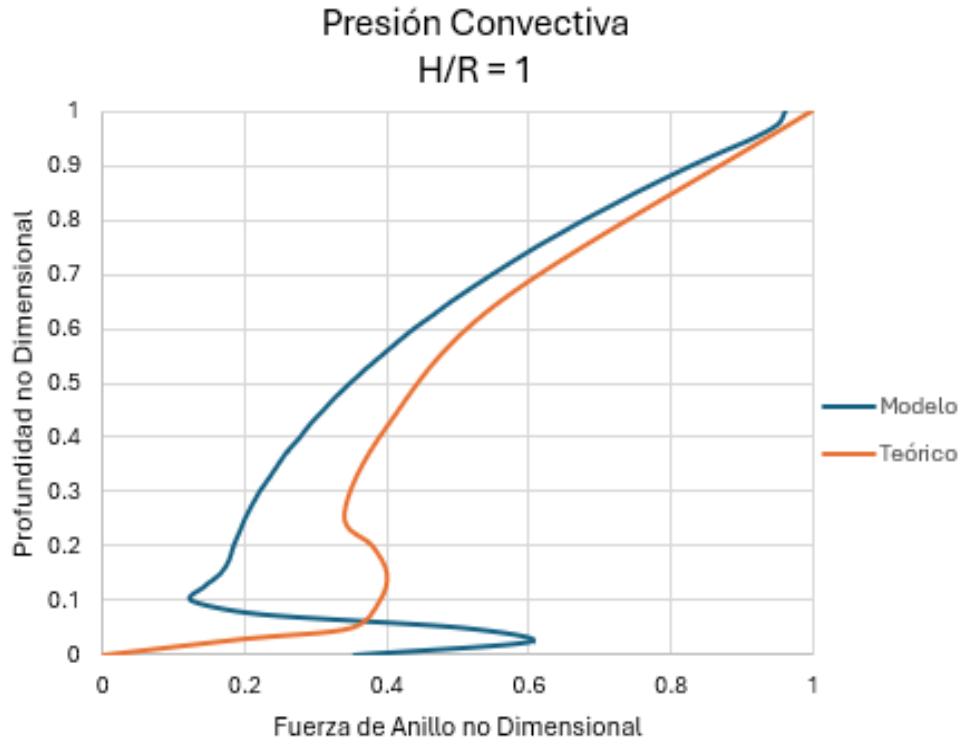


Figura 5.12 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Convectivo H/R=1.

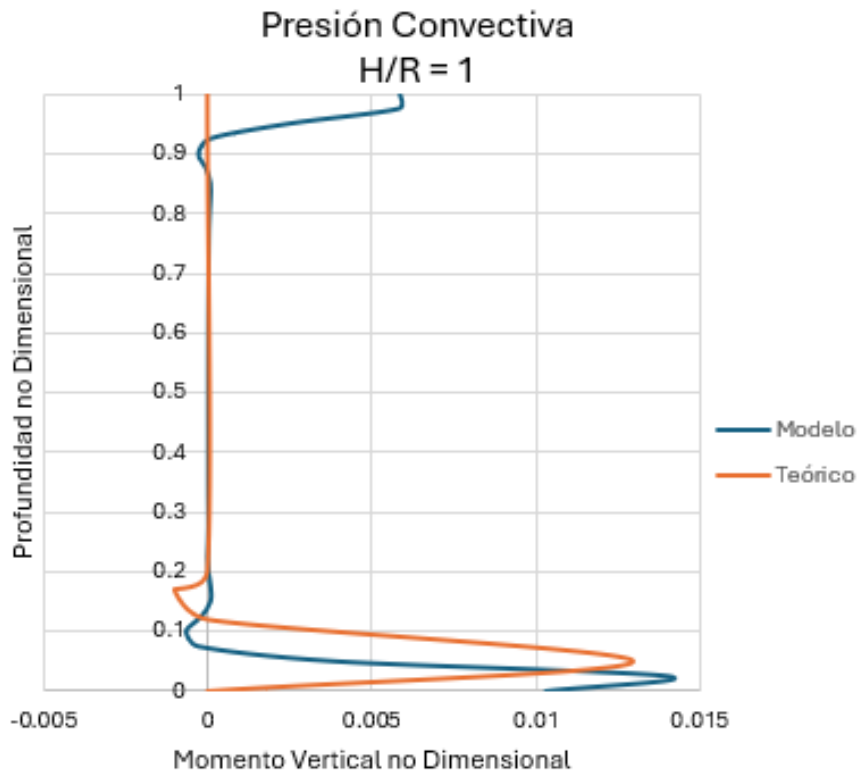


Figura 5.13 Momento Vertical Adimensional, Caso Convectivo H/R=1.

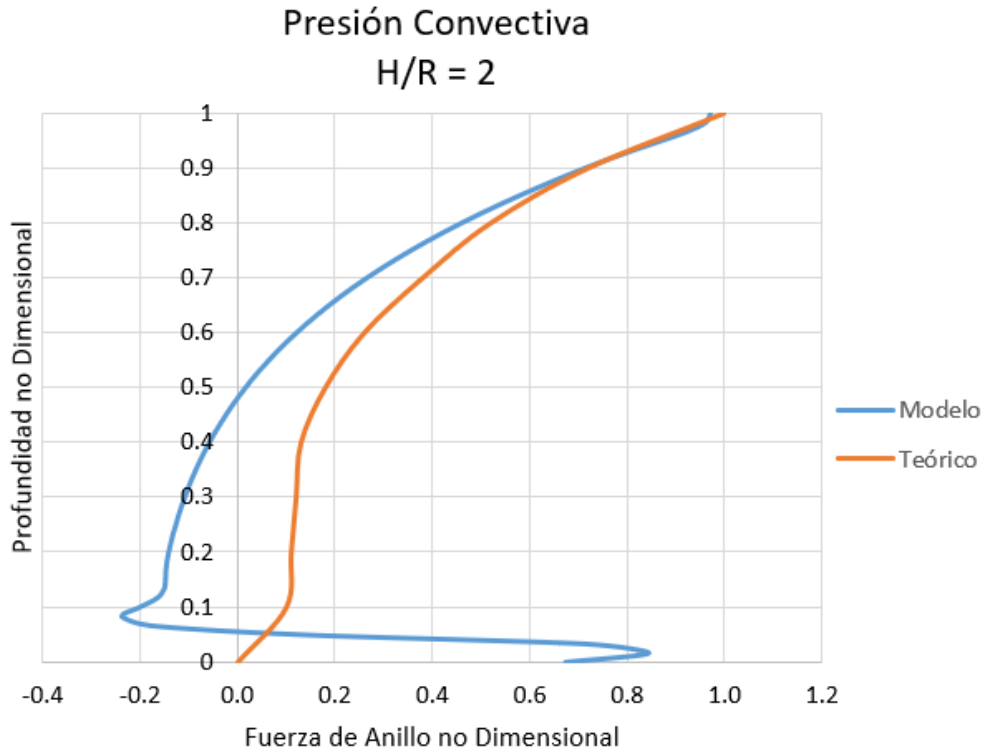


Figura 5.14 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Convectivo H/R=2

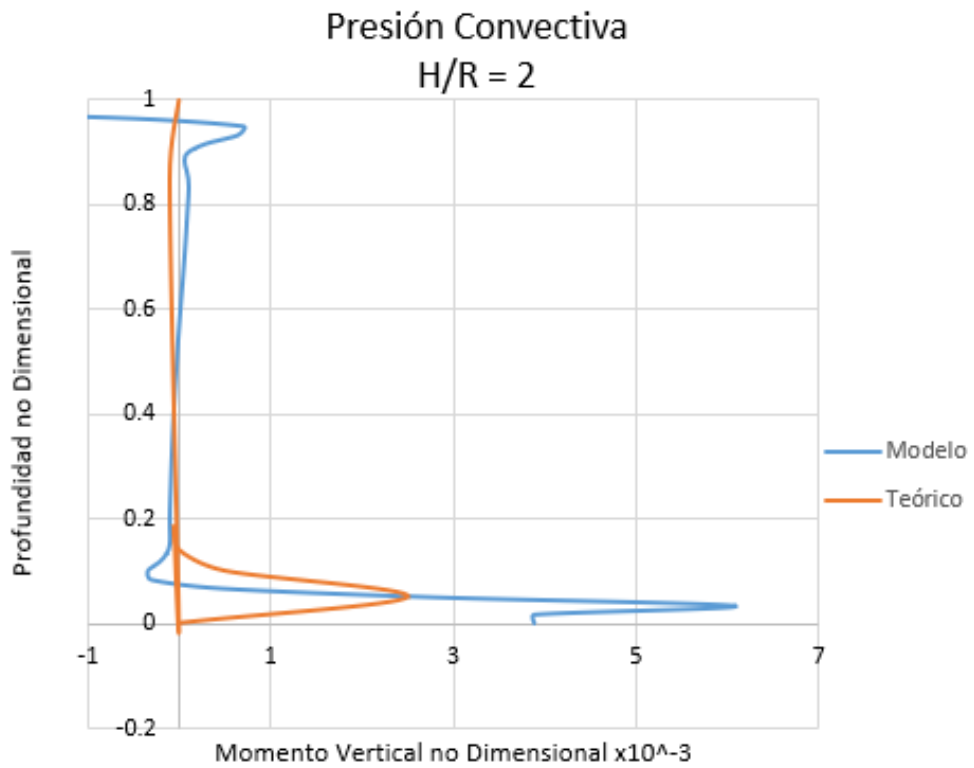


Figura 5.15 Momento Vertical Adimensional, Caso Convectivo H/R=2.

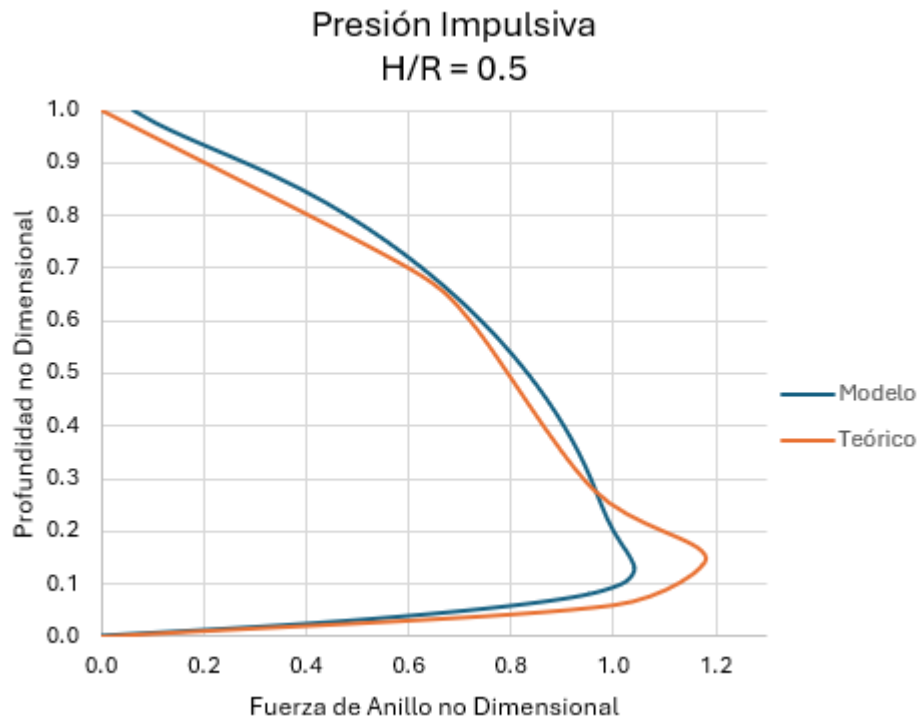


Figura 5.16 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Impulsivo H/R=0.5.

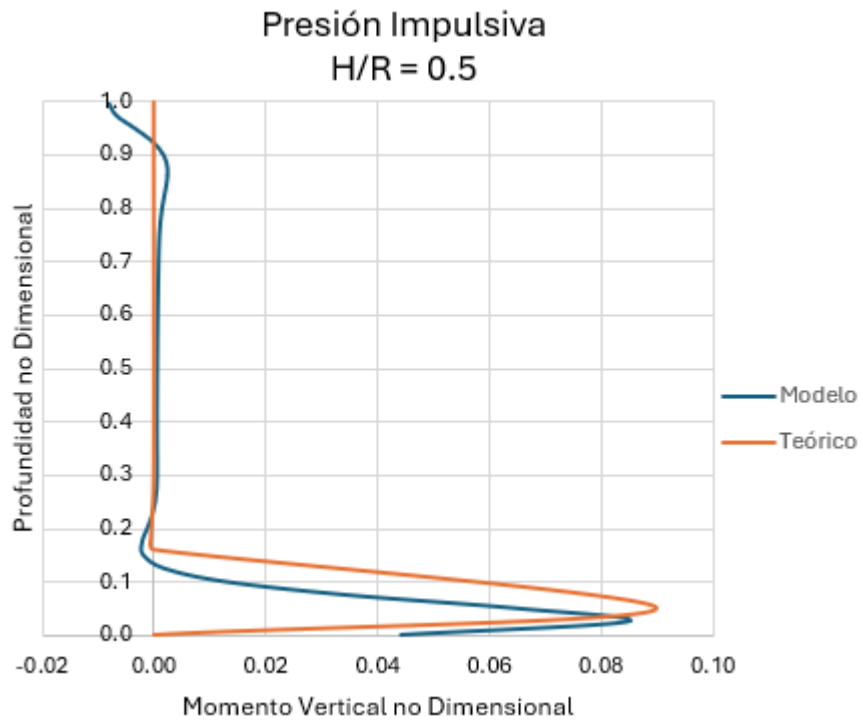


Figura 5.17 Momento Vertical Adimensional, Caso Impulsivo H/R=0.5.

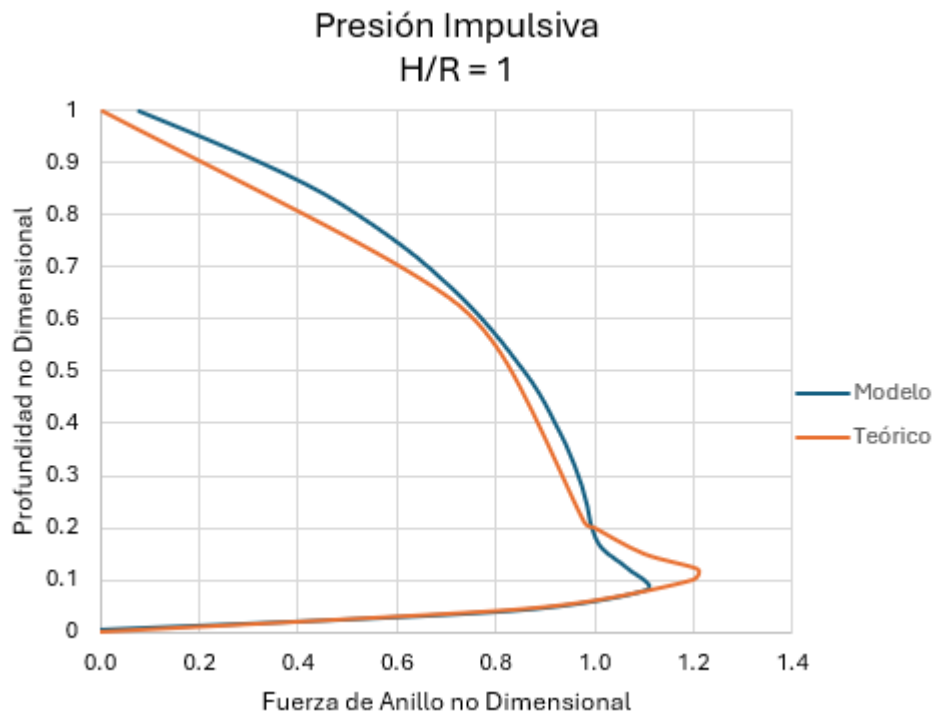


Figura 5.18 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso impulsivo $H/R=1$.

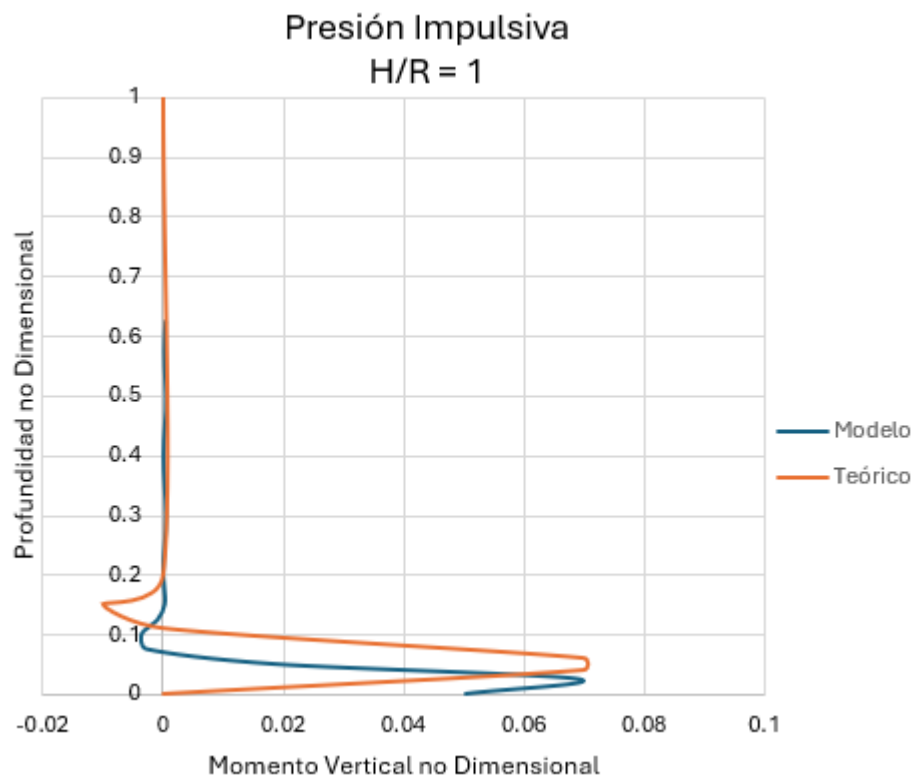


Figura 5.19 Momento Vertical Adimensional, Caso Impulsivo $H/R=1$.

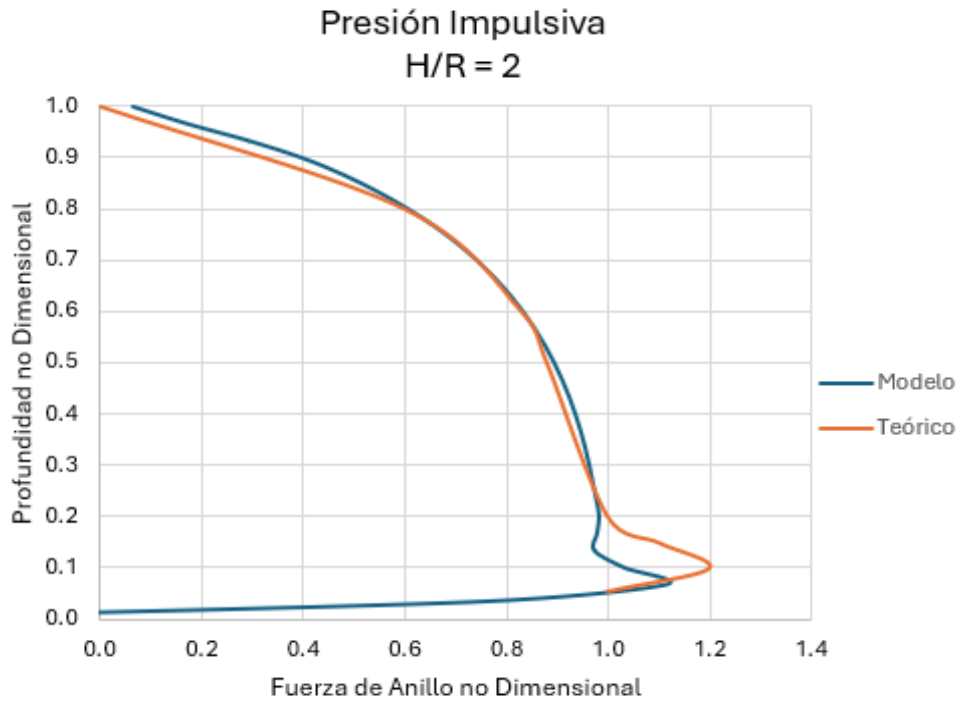


Figura 5.20 Fuerza de Anillo Adimensional, Caso Impulsivo H/R=2.

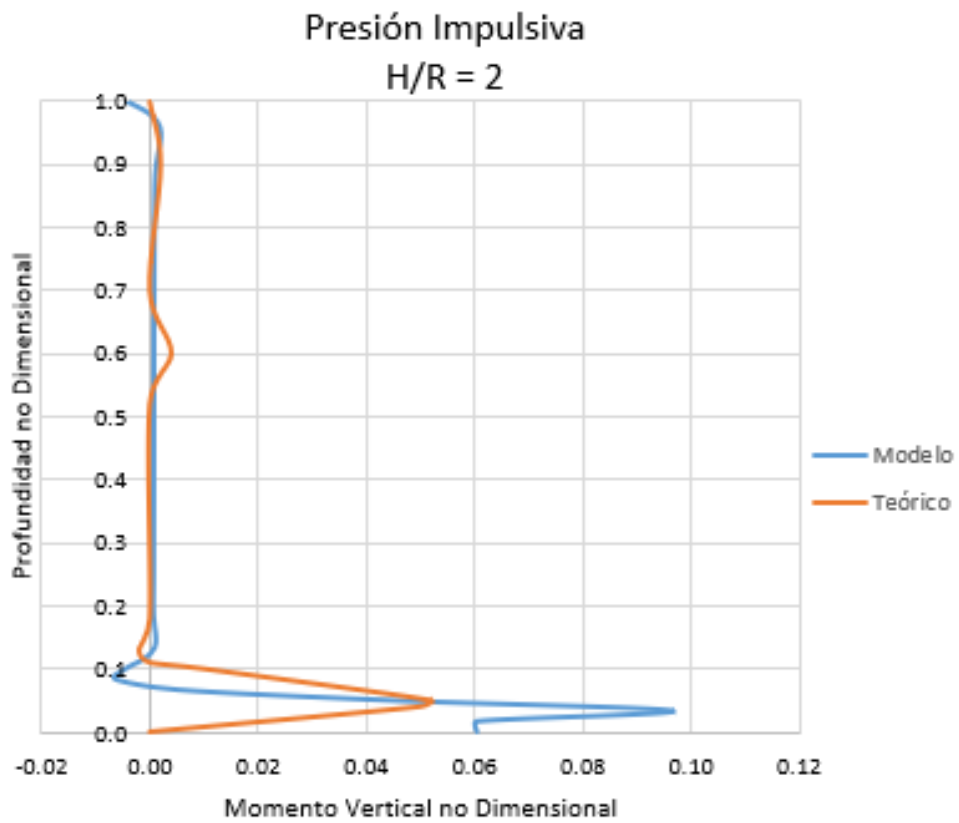


Figura 5.21 Momento Vertical Adimensional, Caso Impulsivo H/R=2.

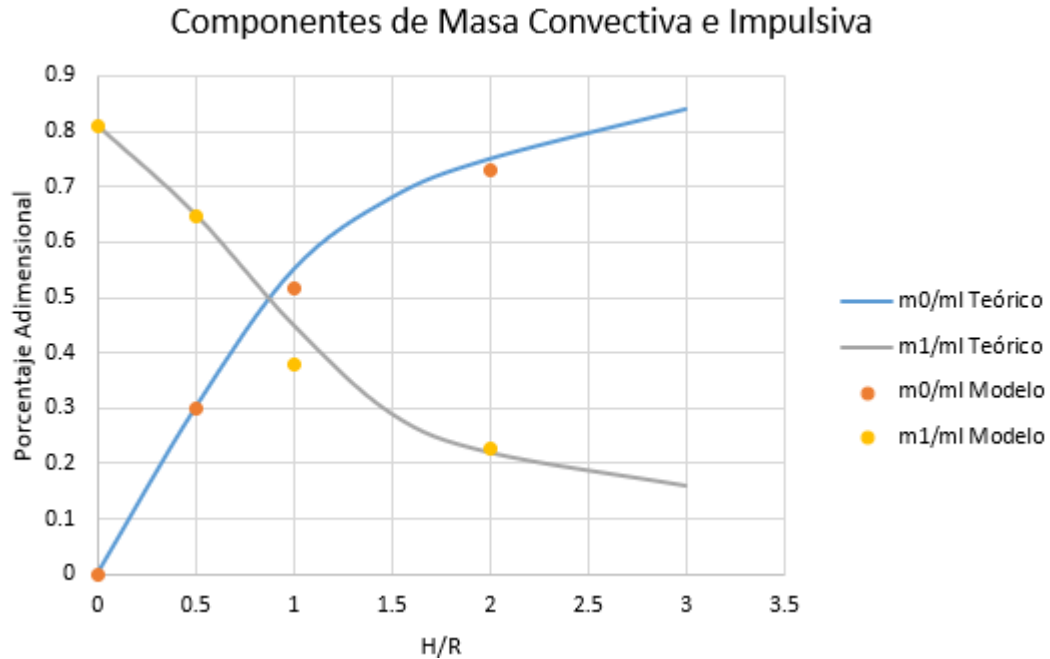


Figura 5.22 Componentes de Masas Modales.

Finalmente, en la Tabla 5 se presentan los valores de los esfuerzos obtenidos, comparando la metodología de cálculo teórica según se propone en el NZSEE 2009 con lo obtenido de las simulaciones, para los distintos modos y casos de estudio.

Tabla 5 Valores de Esfuerzos en el Manto

H/R	Anillo [MPa]			Momento [MPa]		
	Hidrostático					
	Teórico	Modelo	% Diferencia	Teórico	Modelo	% Diferencia
0.5	43.1	48.1	10.9	21.2	27.9	27.6
1	81.5	76.3	6.6	32.9	33.7	2.5
2	23.1	21.9	5.6	11.2	9.3	19.2
	Convectivo					
0.5	19.3	23.7	20.6	8.0	8.0	0.9
1	19.7	18.4	6.6	1.7	1.7	3.5
2	3.7	2.4	44.8	0.04	0.16	118.5
	Impulsivo					
0.5	11.2	13.0	15.1	5.1	6.4	22.3
1	20.9	17.5	17.4	7.3	6.9	6.0
2	2.7	3.3	19.2	1.0	1.8	58.2

5.5. Conclusiones

En el presenta capítulo se entregaron los resultados obtenidos de las simulaciones siguiendo la metodología expuesta en el Capítulo 4, correspondientes a la respuesta hidrodinámica y estructural, cumpliendo así con el objetivo V.

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

6.1. Introducción

En esta sección se presenta la discusión de las respuestas obtenidas a partir de las simulaciones, comparándolas con aquellas obtenidas de la metodología empírica presentada en el NZSEE 2009.

6.2. Respuesta del Modo Impulsivo

Las diferencias encontradas entre las respuestas obtenidas del cálculo teórico y aquellas obtenidas de la simulación pueden atribuirse a las diferencias entre la rigidez considerada en el modelo de Priestley, la cual es discretizada mediante arriostamientos y la rigidez natural de anillo en el modelo de elementos finitos. Lo anterior es aún más obvio cuando se observan los resultados correspondientes a los momentos verticales, donde aquellos presentados en el Anexo A del NZSEE 2009 no presentan rigidez en la base del estanque, mientras que los obtenidos de la simulación presentan rigidez, de nuevo, entregada por la geometría de anillo.

Por otro lado, la respuesta modal obtenida para el modo impulsivo no se encuentra en el tiempo correspondiente al periodo ($t=T$), sino que se encuentra desfasada por un ángulo de desfase θ con un valor de $-\frac{\pi}{2}$. Lo anterior es consistente con lo esperado para sistemas no amortiguados excitados mediante una oscilación armónica con frecuencia igual a la de la resonancia del sistema, según se presenta en la Ecuación 6.1, recordando que la respuesta de un sistema de 1 DOF excitado mediante una fuerza armónica se evalúa mediante la Ecuación 5.2

$$\tan \theta = \frac{-2\xi r}{1 - r^2} \quad Ec. 5.1$$

$$u(t) = \frac{u_{st} \sin(\bar{\omega}t + \theta)}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad Ec. 5.2$$

Donde ξ corresponde a la razón de amortiguamiento del sistema, y r a la razón entre la frecuencia excitadora y la frecuencia natural del sistema. Se observa que, para la Ecuación 5.1, cuando $r = 1$ y $\xi = 0$, el ángulo de desfase tiende a ser $-\frac{\pi}{2}$. Se asume que esto ocurre debido a que el amortiguamiento no llega a desarrollarse, dado el bajo valor que se tiene para los periodos impulsivos. Esta diferencia se observa para la obtención de los resultados de presiones dinámicas y respuesta estructural en su totalidad. El instante de tiempo correspondiente a la respuesta se evalúa con la Ecuación 5.3.

$$t = \frac{3\pi}{2\omega_{ij}} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Uno de los factores más importantes para obtener esta simulación es obtener los resultados de la deformación hidrostática en régimen antes de simular la vibración para el modo impulsivo. Esto se logra utilizando mediante una simulación previa, utilizando System Coupling entre los módulos Transient Structural y Fluent, sin establecer una oscilación armónica en Fluent y, una vez terminada esta simulación del orden de 0.1 s, con time steps de 0.01 s, resumir la simulación estableciendo la oscilación armónica correspondiente en Fluent, donde en las simulaciones estudiadas se utilizaron time steps de 0.0005 s. Cabe mencionar que el tiempo en Fluent es calculado en base a cada simulación, por lo que no hace falta modificar la ecuación de la oscilación para considerar el tiempo utilizado para la simulación en régimen.

Junto con lo anterior, otra consideración importante es la elección de los time steps necesarios para capturar el comportamiento dinámico de este modo, y se correlaciona con la decisión de utilizar una excitación armónica basada en velocidades y no en aceleración. Esto último se debe a que el gradiente de aceleración es muy alto cuando se observa gráficamente, comparado con el gradiente de velocidades, sobre todo para el modo impulsivo, como se puede notar en la Figura 6.1, donde en negro se muestra la función de aceleración armónica, en azul la función de velocidades armónica, y en rojo el valor de $X=T$ correspondiente al periodo impulsivo de $H/R=2$.

Utilizar la función de velocidades en lugar de la función de excitación armónica de aceleraciones permite utilizar time steps mucho mayores, sin ningún compromiso en tanto a la respuesta,

justificando así la elección de utilizar una excitación basada en la velocidad comparada con la aceleración.

Finalmente se puede apreciar que el perfil de presiones dinámicas correspondiente al modo impulsivo, como se aprecia en la Figura 5.1, resulta ser altamente similar al modelo teórico descrito por Veletsos. Esto puede atribuirse a la nula presencia de amortiguación en el sistema, debido a que el modo impulsivo tiene un periodo muy bajo.

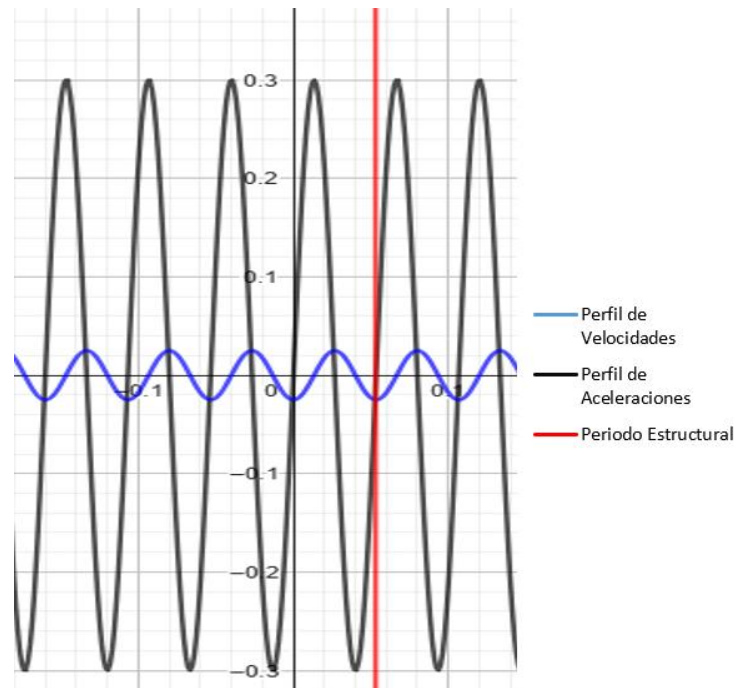


Figura 6.1 Comparación Visual de Gradientes.

6.3. Respuesta del Modo Convectivo

Se puede apreciar en las figuras correspondientes a la respuesta estructural del sistema para el modo convectivo que, en específico para este modo, afecta la rigidez del anillo. Esto se puede observar claramente en los casos $H/R=1$ y $H/R=2$, sin embargo, estas presiones inducidas nunca superan el valor máximo, el cual se obtiene para $z = H$ en todos los casos.

En este modo también existe un desfase entre el periodo y los resultados máximos, sin embargo, este desfase es relativamente pequeño, del orden de 0.05-0.1 s (para las simulaciones estudiadas), y puede

atribuir a diversos factores, entre ellos; amortiguamiento, error matemático entre iteraciones, etc. Los resultados presentados en este informe corresponden a aquellos instantes en donde la respuesta máxima estructural se condice con la teórica, y debido a la baja diferencia en el tiempo que esto ocurre, se asume justificable y buena práctica.

Sin embargo, se puede apreciar que para la respuesta estructural los gráficos siguen la forma general obtenida por el modelo de Priestley, donde la principal diferencia es la rigidez de anillo. Por otro lado, para la distribución de presiones hidrodinámicas, las diferencias pueden ser un poco mayores, sobre todo a medida que se acercan a la base del estanque. Uno de los hallazgos realizados en estas simulaciones es que en caso de no presentarse suficiente revancha (espacio entre la altura libre del fluido y el límite del dominio) la distribución de presiones del modo convectivo no llega a desarrollarse, resultando en presiones máximas menores.

Con respecto a la diferencia de las presiones hidrodinámicas a medida que se aproximan a la base del estanque, este fenómeno puede atribuirse a la inercia del fluido en la simulación, debido a que es más difícil para el fluido cambiar su velocidad a medida que se aproxima a la base del estanque. Esta diferencia puede verse representada también en los perfiles de esfuerzos y momento, junto con las fuerzas de corte en la base.

Cabe destacar que la validez de la simulación del oleaje en Fluent fue verificada de forma extensiva en el trabajo realizado por Toussi et al. (2016), quienes demostraron que para diversas excitaciones basales y razones H/R la respuesta real del movimiento es reproducida mediante metodologías CFD utilizando el software OpenFOAM para las frecuencias excitaciones resonantes con respecto al modelo de Housner (1963) el modelo Volume of Fluid, también empleado en este trabajo.

Finalmente, si bien el gradiente de velocidades en la ecuación de excitación armónica para el modo convectivo es menor que en el modo impulsivo, por motivos de homologación de la metodología se implementa también una excitación armónica basada en un perfil de velocidades y no de aceleraciones.

6.4. Análisis General de las Respuestas

Se observa que los esfuerzos en el manto obtenidos a partir de las simulaciones se asemejan bastante con los resultados teóricos, obtenidos de la metodología de cálculo dispuesta en el NZSEE 2009, con diferencias máximas del 118%. Lo anterior puede resultar engañoso, debido a que los esfuerzos estudiados son relativamente bajos, haciendo que las diferencias porcentuales puedan ser altas para diferencias absolutas relativamente bajas.

Se observa también que la mayor diferencias en las respuestas ocurre para $H/R=2$ se puede asumir que esto ocurre debido a que, mientras mayor es la relación H/R , mayor influencia posee la rigidez del anillo, con respecto a los esfuerzos, resultando en diferencias mayores.

Uno de los resultados que se buscaba pero que no se logró obtener corresponde al momento volcante asociado a los modos impulsivo y convectivo. Para intentar obtenerlo, se reemplazaron los apoyos simples en la base del estanque por apoyos empotrados, pero los resultados no se condicen con lo descrito por el modelo de Veletsos. Se asume que esta metodología no funciona debido a que el estudio se debe hacer con respecto a un punto, en la base del estanque, mientras que utilizar el borde completo inferior hace que se mezclen fuerzas.

6.5. Metodología

En este trabajo se empleó la metodología de análisis bidireccional acoplado, en la que la información se transmite entre ambos solvers en cada instante de tiempo, sin embargo, esta no es la única metodología para representar las respuestas modales de estanques. Trabajos anteriores, como el de Francisco A. (2012) representan este fenómeno utilizando el modelo de masas concentradas, con resultados mixtos, concluyendo que este modelo no logra representar adecuadamente el perfil de esfuerzos en el manto.

Es interesante mencionar que debido a las bajas deformaciones esperadas para casos en los que no ocurre pandeo (del tipo que sea) en el manto del estanque, puede ser suficiente utilizar simulaciones

unidireccionales, transfiriendo las presiones desde Fluent hacia Transient Structural, disminuyendo los tiempos necesarios para la obtención de los resultados.

En base a los resultados obtenidos, se puede observar que la suposición de que las respuestas obtenidas de las simulaciones de Fluent y Transient Structural pueden descomponerse en los componentes de la respuesta hidrostática y la respuesta modal mediante la sustracción de la respuesta hidrostática, lo que se condice con la metodología del NZSEE 2009, en la cual los esfuerzos obtenidos de la respuesta hidrostática se combinan con la sumatoria mediante la metodología SRSS de los modos convectivo e impulsivo.

Una duda que podría surgir con respecto a la representación del modelo es con respecto a la elección de representarlo como el manto apoyado en ambos bordes y no solo en el inferior, lo que se justifica debido a que el modelo de Priestley si bien no asume rigidez en la parte superior del manto, asume que existe un techo que limita los desplazamientos. Esto significa que para el desarrollo de los esfuerzos debe asumirse que el techo se encuentra simplemente apoyado, con el fin de representar la restricción de desplazamientos que entrega el techo del estanque, lo que, si bien puede resultar un poco conservador, se asume que la fuerza de corte en un estanque con rigidez en su techo distribuiría las presiones de forma similar a un doble apoyo simple.

6.6. Limitaciones

En este trabajo se buscó replicar el modelo de Priestley para la parte estructural, representando solamente el manto del estanque, simplemente apoyado en ambos bordes. Este modelo es extremadamente básico en su concepción, debido a que no incorpora las rigideces entregadas por el resto de los componentes presentes en un estanque real, por ejemplo, techo, anillo basal, anillos rigidizadores perimetrales, rigideces locales por conexión de tuberías, etc.

Por otro lado, con respecto a la base de la metodología empleada, este trabajo se basa en el documento NZSEE 2009, mientras que el código de diseño más utilizado es el API 650. Si bien ambos documentos se basan en la respuesta dinámica descrita en los modelos de Housner y Veletsos, los

resultados obtenidos, en específico para la respuesta estructural del anillo, podrían no ser homologables entre códigos.

Una de las limitaciones más importantes para este trabajo corresponde a los límites que impone ANSYS en su licencia estudiantil, donde se limitan a 32,000 los nodos disponibles para las simulaciones en Transient Structural y 512,000 de celdas para las simulaciones de dinámicas de fluidos, llevando así al estudio de valores de H y R relativamente bajos con respecto al de estanques reales.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

A partir de los resultados desarrollados en este trabajo, se puede concluir que la metodología de análisis de estanques en base a simulaciones acopladas bidireccionalmente representa y reproduce correctamente el comportamiento dinámico de estanques, según los modelos de Housner, Priestley y Veletsos, según se describen en el documento NZSEE 2009.

De lo anterior, se concluye también que la metodología desarrollada, junto con los modelos y supuestos utilizados para las simulaciones, modelan correctamente los modelos propuestos en el NZSEE 2009, donde las diferencias obtenidas entre los modelos teóricos y los resultados de las simulaciones son aceptables y explicables en base a la teoría correspondiente al análisis estructural.

Para la investigación futura se proponen la preparación de geometrías que permitan estudiar el comportamiento de la estructura considerando la masa de techo y la rigidez del anillo, y si los resultados para las compresiones de anillo se condicen con lo descrito en el NZSEE 2009. También, y siguiendo esta línea de investigación, estudiar si excitar la estructura, con techo, manto y anillo basal, a la frecuencia convectiva, entrega los esfuerzos de compresión que se describen en el NZSEE 2009.

Se propone también la investigación correspondiente a los momentos volcantes, tanto considerando como no las fuerzas basales, para la obtención de las alturas modales según el modelo de Veletsos.

Se propone también la investigación de los efectos que pueden tener las sillas de anclaje cuando estas se encuentran unidas al manto, además de investigar las variaciones en los perfiles de esfuerzos cuando se añaden componentes que complicarían el análisis de estanques, como tuberías, anillos rigidizadores, etc.

Finalmente, y como el objetivo final de esta línea de investigación, se propone la investigación para el desarrollo de una metodología para el diseño completo de estanques verticales de acero, utilizando como base la metodología desarrollada en este trabajo.

GLOSARIO

A	= Amplitud máxima de aceleración basal, definida como 0.3g para todos los casos, m/s^2 .
$C_d(T_0)$	= Coeficiente de respuesta obtenido desde el espectro de aceleraciones para el modo impulsivo.
$C_d(T_1)$	= Coeficiente de respuesta obtenido desde el espectro de aceleraciones para el modo convectivo.
E	= Módulo de elasticidad del acero, MPa.
$f_{h\theta}$	= Esfuerzo de anillo debido al caso θ , MPa.
$f_{b\theta}$	= Esfuerzo de anillo debido al momento del caso θ . MPa.
g	= Aceleración de gravedad, $9.81 m/s^2$.
H	= Altura de la superficie libre de fluido, m.
h_i	= Altura modal asociada al modo impulsivo, m.
h_c	= Altura modal asociada al modo convectivo, m.
k_h	= Coeficiente de flexibilidad para cálculo del modo impulsivo.
R	= Radio del estanque, m.
t_w	= Espesor del manto del estanque, mm.
T_0	= Periodo del modo impulsivo, s.
T_1	= Periodo del modo convectivo, s.
P	= Presión representativa para el caso estudiado.
$p_i(z)$	= Distribución de presiones para el modo impulsivo en altura, Pa.
$p_c(z)$	= Distribución de presiones para el modo convectivo en altura, Pa.
$q_0(z)$	= Gráfico adimensional de distribución de presiones en altura para el modo impulsivo.
$q_0(0)$	= Valor máximo de presión impulsivo adimensional en la base del estanque.
$q_1(z)$	= Gráfico adimensional de distribución de presiones en altura para el modo convectivo.

N_{θ}	=	Fuerzas de anillo por unidad de longitud, N/m.
$N_{\theta n}$	=	Gráfico adimensional de fuerzas de anillo por unidad de longitud.
M_z	=	Momento vertical en el manto por unidad de longitud, N m
M_{zn}	=	Gráfico adimensional de momento vertical por unidad de longitud.
m_0	=	Masa modal asociada al modo impulsivo, Kg.
m_1	=	Masa modal asociada al modo convectivo, Kg.
m_l	=	Masa total del líquido contenido en el estanque, Kg.
M_0	=	Momento volcante en la base del estanque asociado al modo impulsivo, N m.
M_1	=	Momento volcante en la base del estanque asociado al modo convectivo, N m.
V_0	=	Corte basal asociado al modo impulsivo, N.
V_1	=	Corte basal asociado al modo convectivo, N.
λ_i	=	Coefficiente para el cálculo del periodo convectivo i .
γ_l	=	Peso específico del fluido, N/m^3 .
ω_{ij}	=	Frecuencia angular del modo i para el caso j .

REFERENCIAS

- FRANCISCO JAVIER ASTORGA MENDOZA. (2012). *MODELAMIENTO DE UN ESTANQUE DE ACERO INOXIDABLE PARA ALMACENAMIENTO DE VINOS MEDIANTE MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS*. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- George W. Housner. (1963). The Dynamic Behavior of Water Tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53.
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*. En *JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS* (Vol. 39).
- M. J. N. Priestley. (1985). *Analysis and Design of Circular Prestressed Concrete Storage Tanks*. New Zealand Society for Earthquake Engineering. (2009). *Seismic Design of Storage Tanks: 2009 Recommendations of a NZSEE Study Group on Seismic Design of Storage Tanks*.
- Sanapala, V. S., Velusamy, K., & Patnaik, B. S. V. (2016). CFD simulations on the dynamics of liquid sloshing and its control in a storage tank for spent fuel applications. *Annals of Nuclear Energy*, 94, 494–509. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.04.018>
- Toussi, I. B., Mohammadian, A., & Kianoush, R. (2016). *Experimental and Numerical Investigation of Liquid Storage Tanks Under Seismic Excitation Degree of Master of Applied Science in Civil Engineering*.
- Veletsos, A. S. ., (1984). *Seismic response and design of liquid storage tanks. Published in Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems, ASCE, New York*.
- Zulfiqar, Y., Zulfiqar, A., Ahmad, H. W., Chaudry, U. M., Khan, M. K., & Jun, T. S. (2023). Detailed Structural Analysis of Cylindrical Steel Tank Subjected to Various Seismic Peak Ground Values Using FSI Approach. *Applied Mechanics*, 4(3), 990–1014. <https://doi.org/10.3390/applmech4030051>

ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
<p>El trabajo presentado en esta tesis contribuye al ODS-9, debido a que es un trabajo principalmente enfocado en estructuras que se encuentran en la industria, en donde la innovación corresponde al desarrollo de una nueva metodología para su análisis.</p>

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Cristóbal Inostroza Acuña
Título de la memoria : Análisis de estanques sujetos a aceleraciones basales mediante simulaciones acopladas bidireccionalmente.

Fecha de la presentación oral : 29 agosto

Profesor(es) Guía : Rodrigo Silva M.
Profesor(es) Revisor(es) : Patricio Cendoya H., Victor Aguilar V.
Concepto :
Calificación :

Resumen

El diseño estructural, con sus raíces en el análisis estructural mediante ecuaciones y relaciones empíricas, se basa hoy en día principalmente en el análisis estructural mediante elementos finitos. Sin embargo, problemáticas como la dificultad de para representar la interacción fluido estructura y el costo computacional inherente de las simulaciones computacionales de fluidos llevaron a que los estanques no pudieran hacer esta transición.

Este trabajo se propone como objetivo desarrollar una metodología para el análisis dinámico de estanques mediante elementos finitos, representando el fenómeno de interacción fluido estructura mediante simulaciones bidireccionalmente acopladas utilizando ANSYS, replicando el comportamiento predicho por los modelos empíricos desarrollados por Housner (1963), Veletsos (1984) y Priestley (1985), según se describen en el documento NZSEE 2009.

Para esto, se desarrolla una metodología mediante la cual se obtienen los perfiles de presiones y la respuesta estructural dinámicos a partir de simulaciones acopladas en las cuales el fluido es excitado mediante una oscilación armónica resonante con los principales modos de vibrar del sistema, lo que fue hecho para distintas relaciones de aspecto H/R.

Los resultados obtenidos de este trabajo indican que es posible representar los modelos dinámicos de estanques utilizando simulaciones que incorporan la interacción fluido estructura mediante acoplamiento bidireccional.