



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Evaluación de la interacción fluido-estructura en estanques de hormigón armado

Memoria de Título presentada por

Manuel Esteban González Becerra

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía

Gilberto Hernán Leiva Henríquez

Agosto de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluación de la interacción fluido-estructura en estanques de hormigón armado

Nombre del candidato(a): Manuel Esteban González Becerra

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Gilberto Leiva, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 25/08/2025; **Firma:**

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25/08/2025; **Firma:**

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

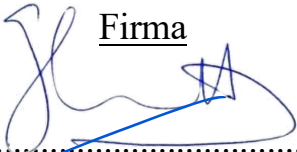
TITULO DE LA TESIS:

**EVALUACIÓN DE LA INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA EN
ESTANQUES DE HORMIGÓN ARMADO**

AUTOR:

MANUEL ESTEBAN GONZÁLEZ BECERRA

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Gilberto Leiva	
Miembro Comisión	Vivian Aranda	

Valparaíso, Chile, Agosto de 2025

Índice

1.	Introducción	2
1.1.	General.....	2
1.2.	Objetivos.....	3
1.2.1.	Objetivo general	3
1.2.2.	Objetivos específicos.....	3
1.3.	Alcances del estudio	3
2.	Respuesta sísmica de estanques de almacenamiento.....	4
2.1.	Solución analítica.....	4
2.2.	Modelo de Housner.....	8
2.2.1.	Modo impulsivo.....	9
2.2.2.	Modo convectivo	11
3.	Diseño sísmico de los estanques	13
3.1.	Metodología de diseño en la práctica actual	13
3.2.	Espectro de diseño NCh 2369:2003	14
3.3.	Espectro de diseño NCh 2369:2023	16
3.4.	Análisis sísmico ACI 350.3-20 (ACI, 2021b).....	18
3.4.1.	Frecuencias y periodos fundamentales	18
3.4.2.	Pesos equivalentes y resultante de fuerzas dinámicas laterales	19
3.4.3.	Altura de ola convectiva	20
3.4.4.	Presiones hidrodinámicas	20
3.5.	Resultados análisis sísmico.....	21
3.5.1.	Estanques analizados.....	21
3.5.2.	Pesos y alturas equivalentes	24
3.5.3.	Periodos fundamentales y coeficientes sísmicos	24
3.5.4.	Fuerzas dinámicas.....	25
3.5.5.	Momento volcante	25
3.5.6.	Altura de ola convectiva	25
3.5.7.	Presiones hidrodinámicas laterales	26
4.	Análisis por elementos finitos	27
4.1.	Objetivo del análisis.....	27
4.2.	Antecedentes de estudios previos	27
4.3.	Interacción fluido-estructura en el modelo	28
4.4.	Modelación	28

4.4.1.	Modelación del fluido.....	28
4.4.2.	Modelación de las paredes del estanque.....	29
4.4.3.	Modelación de vigas y pilares	29
4.5.	Obtención de resultados.....	30
4.5.1.	Formas modales y frecuencias fundamentales	30
4.5.2.	Desplazamientos, presiones y fuerzas nodales	30
4.5.3.	Fuerzas internas	30
4.6.	Modelos de análisis utilizado.....	31
5.	Resultados del análisis	34
5.1.	Análisis modal	34
5.1.1.	Modos convectivos.....	34
5.1.2.	Modos impulsivos.....	36
5.1.3.	Pesos equivalentes	37
5.2.	Análisis espectral	37
5.2.1.	Corte basal	37
5.2.2.	Momento volcante	38
5.2.3.	Alturas equivalentes	39
5.2.4.	Altura de ola convectiva	39
5.2.5.	Presiones hidrodinámicas	41
5.2.6.	Fuerzas internas	43
6.	Análisis de resultados.....	52
6.1.	Propiedades estructurales.....	52
6.1.1.	Pesos modales.....	52
6.1.2.	Periodos fundamentales.....	52
6.1.3.	Formas modales.....	53
6.2.	Análisis modal-espectral	55
6.2.1.	Espectros de diseño	55
6.2.2.	Corte Basal y momento volcante.....	57
6.2.3.	Alturas equivalentes	58
6.2.4.	Altura de ola convectiva	58
6.2.5.	Presiones hidrodinámicas	60
6.2.6.	Fuerzas internas	63
7.	Conclusiones	69
8.	Referencias.....	71

Índice de figuras

Figura N° 2-1: Representación de estanque y sistemas de coordenadas.....	4
Figura N° 2-2: Formas modales convectivas simétricas.....	6
Figura N° 2-3: Formas modales convectivas asimétricas.....	7
Figura N° 2-4: Volumen de control utilizado en el análisis del modo impulsivo	8
Figura N° 2-5: Modelo de análisis del modo convectivo	8
Figura N° 2-6: Modelo mecánico equivalente de Housner.....	9
Figura N° 2-7: Distribución horizontal de presión impulsiva.....	9
Figura N° 2-8 Distribución horizontal de presión convectiva	11
Figura N° 3-1: Espectro de diseño modo impulsivo NCh 2369 (2003).....	15
Figura N° 3-2: Espectro de diseño modo convectivo NCh 2369 (2003)	15
Figura N° 3-3: Espectro de diseño modo impulsivo NCh 2369 (2023).....	17
Figura N° 3-4: Espectro de diseño modo convectivo NCh 2369 (2023)	17
Figura N° 3-5: Modelo mecánico equivalente	18
Figura N° 3-6: Distribución de presión impulsiva y convectiva.....	21
Figura N° 3-7: Planos de forma estanque A	22
Figura N° 3-8: Planos de forma estanque B	22
Figura N° 3-9: Presiones dinámicas laterales A ACI 350.3-20 (2021)	26
Figura N° 3-10: Presiones dinámicas laterales B ACI 350.3-20 (2021)	26
Figura N° 4-1: Geometría elemento FLUID30.....	29
Figura N° 4-2: Geometría elemento SHELL181	29
Figura N° 4-3: Geometría elemento BEAM188	30
Figura N° 4-4: Fuerzas internas de Shell	31
Figura N° 4-5: Vista en corte modelo estanque A.....	32
Figura N° 4-6: Vista en planta pilares modelo estanque A	32
Figura N° 4-7: Vista en corte modelo estanque B.....	33
Figura N° 4-8: Vista en planta pilares modelo estanque B	33
Figura N° 5-1: Formas modales convectivas	35
Figura N° 5-2: Formas modales impulsivas	36
Figura N° 5-3: Desplazamientos de la superficie libre	40
Figura N° 5-4: Curva de ola convectiva-Estanques A y B.....	40
Figura N° 5-5: Presiones modo impulsivo en modelos de elementos finitos	41
Figura N° 5-6: Presiones modo convectivo en modelos de elementos finitos.....	42
Figura N° 5-7: Distribución de presiones hidrodinámicas - Estanques A y B	42

Figura N° 5-8: Tensión anular [tonf/m]	44
Figura N° 5-9: Corte radial [tonf/m].....	44
Figura N° 5-10: Corte tangencial [tonf/m]	45
Figura N° 5-11: Momento flector M ₁₁ [tonf-m/m]	45
Figura N° 5-12: Momento flector M ₂₂ [tonf-m/m].....	46
Figura N° 5-13: Distribución vertical y perimetral de la fuerza axial anular máxima.....	47
Figura N° 5-14: Distribución vertical y perimetral de corte radial en la base	48
Figura N° 5-15: Distribución vertical y perimetral del corte tangencial en la base.....	49
Figura N° 5-16: Distribución vertical y perimetral del momento flector M ₁₁ máximo	50
Figura N° 5-17: Distribución vertical y perimetral del momento flector M ₂₂ máximo	51
Figura N° 6-1: Comparación de formas modales convectivas.....	54
Figura N° 6-2: Comparación de espectro de diseño impulsivo	56
Figura N° 6-3: Comparación de espectro de diseño convectivo.....	56
Figura N° 6-4: Comparación de forma de ola convectiva	59
Figura N° 6-5: Comparación de distribución de presiones - Estanque A	60
Figura N° 6-6: Comparación de distribución de presiones - Estanque B	61
Figura N° 6-7: Distribución horizontal presión impulsiva	61
Figura N° 6-8: Distribución horizontal presión convectiva.....	62
Figura N° 6-9: Presión impulsiva - Estanque rígido.....	62
Figura N° 6-10: Comparación distribución de la fuerza axial anular máxima	64
Figura N° 6-11: Comparación distribución de corte radial en la base	65
Figura N° 6-12: Comparación distribución de corte tangencial en la base.....	66
Figura N° 6-13: Comparación distribución de momento M ₁₁ máximo.....	67
Figura N° 6-14: Comparación distribución de momento M ₂₂ máximo.....	68

Índice de tablas

Tabla 3-1: Dimensiones estanques.....	23
Tabla 3-2: Propiedades de los materiales.....	23
Tabla 3-3: Peso y alturas equivalentes ACI 350.3-20 (2021)	24
Tabla 3-4: Periodos por modo ACI 350.3-20 (2021)	24
Tabla 3-5: Coeficientes sísmicos	24
Tabla 3-6: Resultante de fuerzas dinámicas ACI 350.3-20 (2021)	25
Tabla 3-7: Momento volcante ACI 350.3-20 (2021)	25
Tabla 3-8: Altura de ola convectiva ACI 350.3-20 (2021).....	25
Tabla 5-1: Periodos modos convectivos	34
Tabla 5-2: Periodos modos impulsivos	36
Tabla 5-3: Pesos equivalentes ANSYS	37
Tabla 5-4: Corte mínimo NCh 2369 (2023).....	37
Tabla 5-5: Fuerzas impulsivas y convectivas resultantes ANSYS.....	38
Tabla 5-6: Momento volcante ANSYS	38
Tabla 5-7: Pesos equivalentes ANSYS	39
Tabla 5-8: Altura de ola convectiva	39
Tabla 5-9: Fuerzas internas máximas.....	43
Tabla 6-1: Comparación pesos modales	52
Tabla 6-2: Pesos modales ANSYS primer modo	52
Tabla 6-3: Comparación de periodos modo convectivo.....	53
Tabla 6-4: Comparación de periodos modo impulsivo	53
Tabla 6-5: Coeficientes sísmicos	55
Tabla 6-6: Comparación corte basal	57
Tabla 6-7: Comparación Momento Volcante	58
Tabla 6-8: Comparación alturas equivalentes	58
Tabla 6-9: Comparación de altura de ola – Estanque A.....	59
Tabla 6-10: Comparación de altura de ola – Estanque B.....	59
Tabla 6-11: Comparación fuerzas internas máximas	63

Evaluación de la interacción fluido-estructura en estanques de hormigón armado

Manuel González, Gilberto Leiva

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

En el presente estudio se evalúa la interacción fluido-estructura en estanques cilíndricos de hormigón armado utilizados para el almacenamiento de agua potable, mediante un modelo de elementos finitos implementado en el software ANSYS, que considera el acoplamiento de las ecuaciones de movimiento relativas al elemento estructural y al fluido acústico. El análisis se realizó para dos estanques cilíndricos reales, diseñados y construidos de acuerdo a la práctica en el país.

En primer lugar, se verificó los resultados del análisis de elementos finitos para los parámetros estructurales de los estanques, los que fueron comparados con los obtenidos mediante el procedimiento de diseño propuesto en la norma ACI 350.3-20 (2021). El análisis permitió identificar adecuadamente los modos impulsivos y convectivos del líquido, obteniendo una buena concordancia en términos de periodos, pesos equivalentes y formas modales. Se verificó que la flexibilidad estructural del estanque afecta significativamente la respuesta impulsiva, lo cual no es capturado por el método normativo que asume rigidez total.

En segundo término, se comparó los resultados para un análisis sísmico, mediante un análisis modal-espectral, de acuerdo a o las disposiciones de las versiones 2003 y 2023 de la norma chilena NCh 2369 de diseño sísmico de instalaciones industriales. En general, el análisis normativo entregó resultados más conservadores que el análisis de elementos finitos, aunque en ciertos aspectos, como las fuerzas internas, subestimó algunas solicitaciones.

Se observó que el uso del espectro de diseño de la versión 2023 de la norma NCh 2369 genera mayores exigencias sísmicas para el modo convectivo, mientras que para el modo impulsivo fue necesario corregir los resultados a partir del corte basal mínimo.

El estudio concluye que el uso de herramientas de elementos finitos permite capturar de forma más precisa el comportamiento sísmico de estanques de almacenamiento, siendo una alternativa válida para evaluar los criterios de diseño establecidos en la normativa vigente.

Palabras claves: Interacción fluido-estructura, estanques cilíndricos, análisis modal-espectral, elementos finitos, ANSYS, ACI 350.3-20, NCh 2369

1. Introducción

1.1. General

Los estanques de hormigón armado son estructuras fundamentales en diversas actividades industriales y de servicio a la población, particularmente en sistemas de distribución y almacenamiento de agua potable. Por lo tanto, es crucial asegurar la continuidad operacional de estas estructuras y la pérdida del contenido no es aceptable. En el contexto sísmico, se espera que estos sistemas se mantengan operativos aún después de la ocurrencia de sismos severos.

El desempeño sísmico de estanques ha sido estudiado en la literatura para una amplia gama de eventos sísmicos severos. Estas investigaciones destacan la importancia primordial de la protección sísmica y la modelación dinámica precisa de estas estructuras (Hosseini & Beskhyroun, 2023). Actualmente, los parámetros utilizados en el diseño se obtienen a partir de análisis lineales-elásticos, en los cuales las fuerzas resultantes de la interacción dinámica del líquido con la estructura se representan como presiones estáticas sobre las paredes del estanque. No obstante, con los avances actuales, surge la posibilidad de usar modelos computacionales de elementos finitos más sofisticados, que ajusten con una mayor complejidad el comportamiento del fluido y la interacción fluido-estructura frente a sollicitaciones sísmicas, dando la posibilidad de obtener resultados más precisos.

Siguiendo esta lógica, diversas investigaciones proponen el uso de modelos de elementos finitos para evaluar el comportamiento sísmico de estas estructuras. Estudios como los de Moslemi & Kianoush (2012), Ortiz (2016) y Saria et al. (2022), a través de análisis modal-espectral y/o tiempo-historia, comparan resultados obtenidos con el software ANSYS, con resultados analíticos y normativos. En este contexto, es posible realizar una evaluación de la metodología utilizada en el país para el diseño de estanques de hormigón armado.

A estos efectos, se analizarán dos estanques cilíndricos de hormigón armado, diseñados y construidos de acuerdo a la práctica de la ingeniería en el país. Se utilizará el programa ANSYS para desarrollar modelos de elementos finitos, considerando elementos capaces de modelar el fluido, la estructura y la interacción fluido-estructura. El estudio se llevará a cabo mediante un análisis modal-espectral con las disposiciones de la norma sísmica chilena. Los resultados obtenidos permitirán realizar un estudio comparativo entre el análisis con el software y con la metodología de diseño utilizada en Chile, incluyendo las disposiciones de la norma sísmica NCh 2369 en sus versiones 2003 y 2023, y la metodología de diseño propuesta por ACI 350.3-20 (2021).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento sísmico de estanques cilíndricos de hormigón armado destinados para el abastecimiento de agua potable, mediante un análisis modal-espectral, utilizando un modelo de elementos finitos que considere la interacción fluido-estructura.

1.2.2. Objetivos específicos

- Establecer los elementos comunes y específicos de diseño de estanques contenedores de líquido mediante un análisis comparativo de la normativa actual y estudios previos
- Evaluar la respuesta sísmica de un estanque tipo en términos de modos y periodos fundamentales
- Cuantificar y comparar fuerzas internas, corte basal y presiones hidrodinámicas obtenidas mediante distintos tipos de análisis y solicitaciones sísmicas
- Comparar los criterios y resultados derivados del uso de distintas versiones de la norma sísmica chilena aplicables a estanques

1.3. Alcances del estudio

El presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento sísmico de estanques de hormigón armado mediante modelos de elementos finitos en ANSYS. Para ello, se realiza un análisis modal-espectral considerando las disposiciones de dos versiones de la norma sísmica chilena.

El trabajo busca evaluar la capacidad de dicha metodología normativa para estimar adecuadamente la respuesta sísmica de este tipo de estructuras. Además, se propone generar una base metodológica replicable para estudios posteriores, abordando el proceso de modelación en el software y validando las disposiciones de diseño a través de la comparación de resultados entre los diferentes tipos de análisis

La memoria se organiza de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presentan el planteamiento del problema, los objetivos propuestos y los alcances del estudio.

En el capítulo 2 se describen los conceptos asociados a la interacción fluido estructura en estanques, abordando soluciones analíticas y aproximadas.

En el capítulo 3 se detalla la metodología actual de análisis de estanques, exponiendo las solicitaciones sísmicas, estanques a analizados y resultados del análisis sísmico basado en la normativa.

En el capítulo 4 se describe la configuración de los modelos de elementos finitos utilizados, incluyendo los elementos empleados y las condiciones de contorno.

En el capítulo 5 se presentan los resultados del análisis modal-espectral, incluyendo periodos fundamentales, formas modales, parámetros globales, distribuciones de presiones hidrodinámicas y fuerzas internas.

En el capítulo 6 se realiza un análisis comparativo de los resultados del análisis modal-espectral frente a los resultados del análisis con la metodología de diseño propuesta en la normativa, considerando distintos espectros de diseño.

Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las principales conclusiones del estudio.

2. Respuesta sísmica de estanques de almacenamiento

La respuesta sísmica de estanques ha sido un tema de estudio durante los últimos 60 años (Compagnoni et al., 2012). Diversos autores han propuesto modelos experimentales y teóricos que han sido fundamentales para desarrollar las expresiones presentes en las normativas de diseño actuales.

A continuación, se describe procedimientos de solución al problema de la interacción fluido-estructura en estanques cilíndricos, incluyendo expresiones analíticas y aproximadas.

2.1. Solución analítica

Los enfoques analíticos se fundamentan en la solución de la ecuación de Laplace para el potencial de velocidad ϕ del fluido. A partir de esta formulación y bajo ciertos supuestos sobre las características del fluido y su movimiento, se derivan las distribuciones de presión hidrodinámica asociadas a las respuestas impulsiva y convectiva (Hosseini & Beskhyroun, 2023).

Bajo este enfoque, las soluciones analíticas consideran los siguientes supuestos iniciales:

- Fluido incompresible
- Flujo irrotacional
- Fluido no viscoso
- Se desprecia la acción de la tensión superficial y capilaridad
- El estado del fluido queda definido por velocidad y presión
- No se considera el efecto de la temperatura en el análisis
- Estanque de paredes rígidas

La Figura N° 2-1 muestra el esquema del estanque cilíndrico y el sistema de coordenadas utilizado para el análisis. El movimiento del suelo se considera actuando solo en una dirección horizontal, representada en el análisis por la coordenada x del sistema cartesiano.

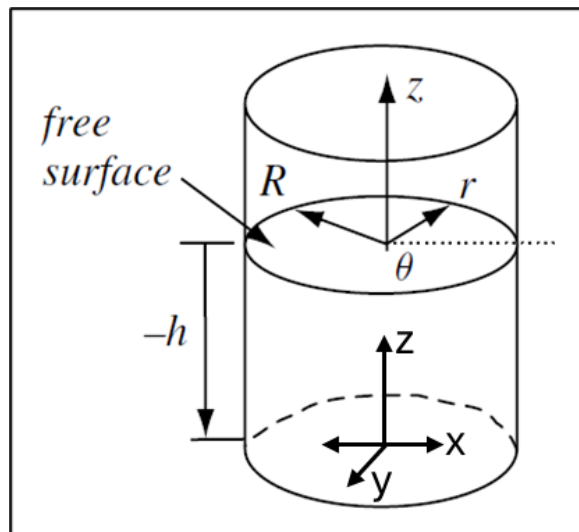


Figura N° 2-1: Representación de estanque y sistemas de coordenadas

Ibrahim (2005)

Dado el supuesto de flujo irrotacional, el movimiento del fluido puede describirse mediante el gradiente de una función potencial de velocidad ϕ , tal que el campo de velocidades $\vec{v}$ es:

$$\vec{v} = -\nabla\phi \quad (2-1)$$

Además, al tratarse de un fluido incompresible, la ecuación de continuidad queda:

$$\nabla\vec{v} = 0 \quad (2-2)$$

Combinando las Ecuaciones (2-1) y (2-2) se obtiene la ecuación de Laplace, considerando los supuestos iniciales, expresada como:

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (2-3)$$

Donde ∇^2 es el operador Laplaciano.

El potencial de velocidad puede separarse en dos componentes: uno impulsivo y otro convectivo,

$$\phi = \phi_c + \phi_i \quad (2-4)$$

Esta separación permite analizar dos efectos distintos en la respuesta sísmica del fluido. La componente impulsiva representa la porción del fluido que se mueve rígidamente junto con el estanque, generalmente ubicada en la zona inferior. Por otro lado, la componente convectiva representa el movimiento de oleaje de la parte superior del fluido.

El análisis de cada uno de estos modos se realiza despreciando la influencia del otro, es decir, la respuesta del modo impulsivo se calcula despreciando el efecto del oleaje y viceversa.

El termino impulsivo ϕ_i del potencial de velocidad se define como:

$$\phi_i = -\dot{x}_0\rho \cos(\theta) - \frac{1}{2} \int \dot{x}_0^2 dt \quad (2-5)$$

Donde $\dot{x}_0$ corresponde a la velocidad del estanque, y ρ y θ corresponden a las coordenadas en el sistema cilíndrico.

La solución al potencial de velocidad convectivo, ϕ_c , obtenida al resolver la ecuación de Laplace mediante separación de variables e imponiendo condiciones de borde en las paredes y el fondo del estanque, se expresa como la de un sistema de infinitos grados de libertad, cada uno asociado a un modo de vibración. Ibrahim (2005) presenta el desarrollo de la solución explícita de las ecuaciones de movimiento.

El termino convectivo ϕ_c del potencial de velocidad es:

$$\phi_c(\rho, \theta, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} [C_{nk}(t) \cos(n\theta) + D_{nk}(t) \sin(n\theta)] J_n(\lambda_{nk}\rho) \frac{\cosh(\lambda_{nk}(z+h))}{\cosh(\lambda_{nk}h)} \quad (2-6)$$

Donde $C_{nk}(t)$ y $D_{nk}(t)$ dependen de las condiciones dinámica y cinemática de superficie libre, $J_n(.)$ corresponde a la función de Bessel de primer tipo de orden n , $\lambda_{nk} = \xi_{nk}/R$ son las raíces de las derivadas de la función de Bessel, h es la profundidad del fluido y z es la coordenada vertical del sistema cilíndrico.

Si $C_{nk}(t)$ y $D_{nk}(t)$ se asumen como armónicos y se imponen las condiciones de borde de superficie libre, se obtienen las frecuencias naturales como:

$$\omega_{nk}^2 = g \frac{\xi_{nk}}{R} \tanh\left(\xi_{nk} \frac{h}{R}\right) \quad (2-7)$$

Donde ω_{nk} es la frecuencia angular, R es el radio del estanque y g es la aceleración de la gravedad.

La forma de la superficie, representada por la coordenada η , medida desde la superficie libre no deformada puede expresarse como:

$$\eta(\rho, \theta, t) = \frac{1}{g} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} [C_{nk} \cos(n\theta) + D_{nk} \sin(n\theta)] J_n(\lambda_{nk} \rho) \omega_{nk} \cos(\omega_{nk} t) \quad (2-8)$$

Con la expresión anterior es posible obtener la forma de los modos convectivos. La deformación de la superficie libre resulta de la combinación de modos simétricos (asociados al término coseno) y modos asimétricos (asociados al término seno). Los índices n y k determinan el número de oscilaciones en la dirección angular y radial, respectivamente. En las Figura N° 2-2 y Figura N° 2-3 se muestra la forma de la superficie libre para los diferentes modos convectivos, donde se puede apreciar como varia la forma dependiendo de los valores que tomen los parámetros.

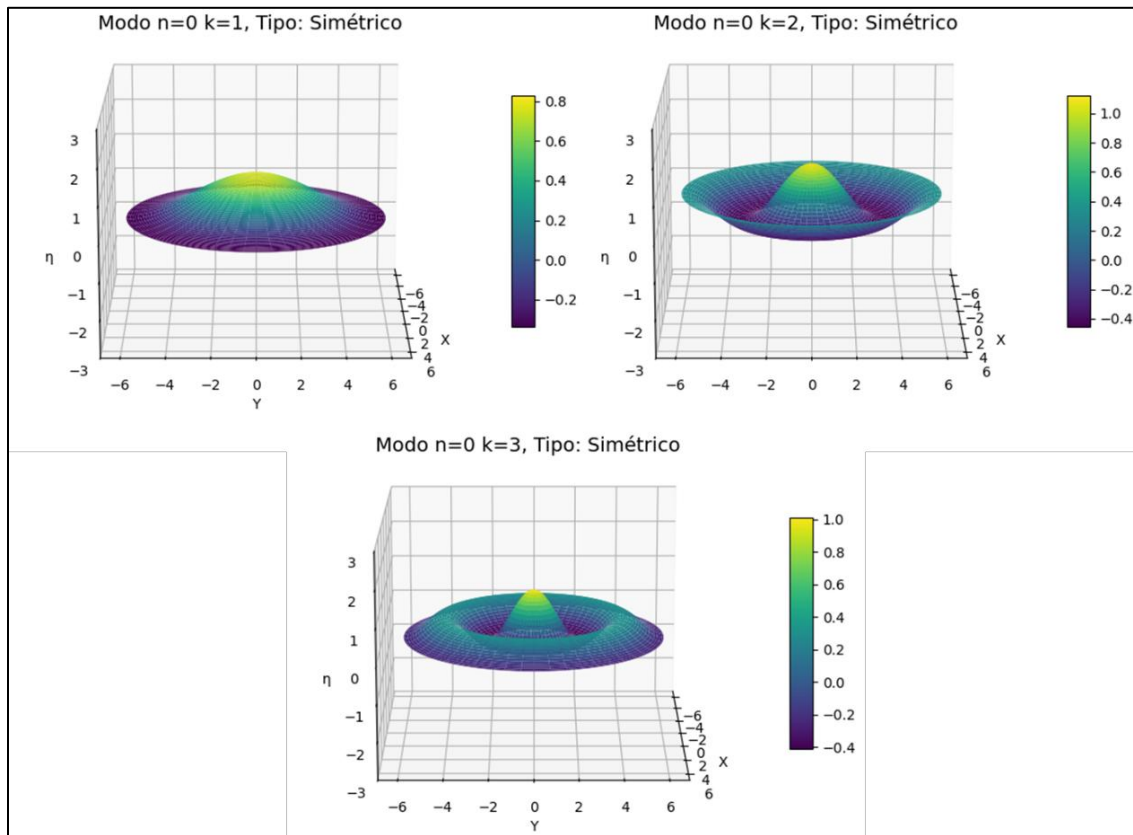


Figura N° 2-2: Formas modales convectivas simétricas

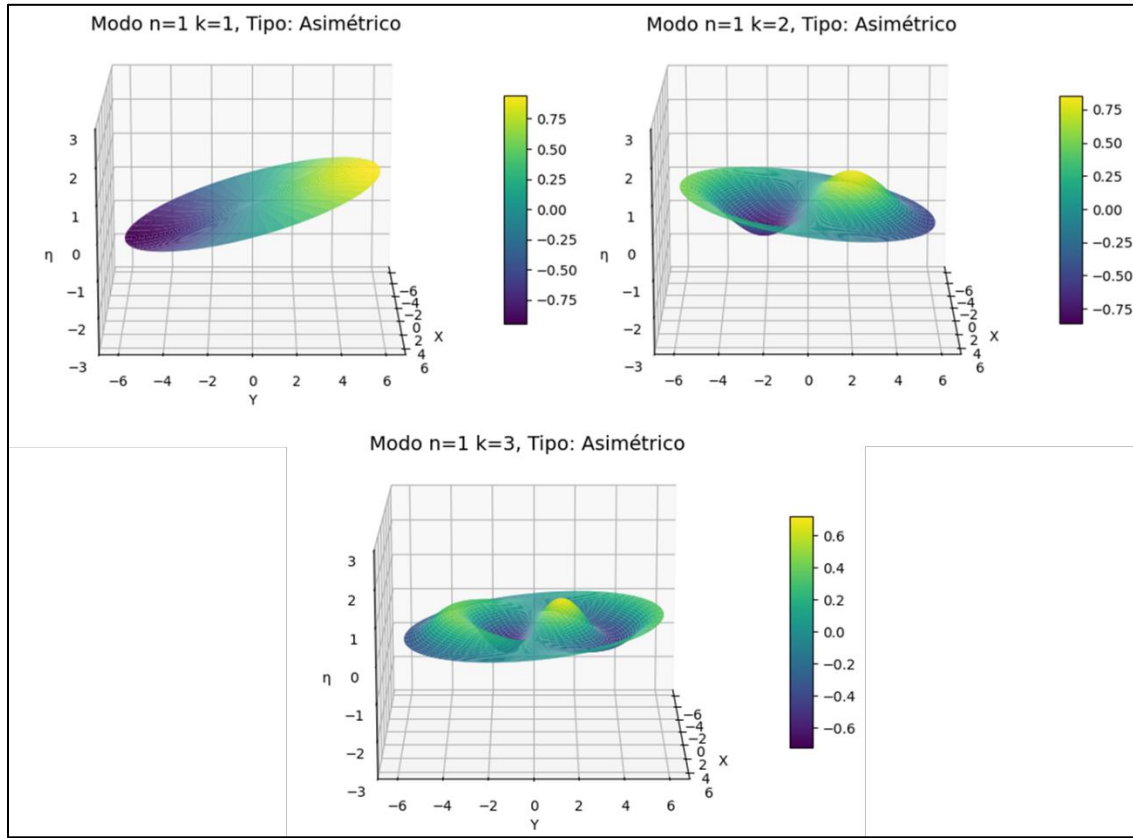


Figura N° 2-3: Formas modales convectivas asimétricas

Una vez obtenidos las soluciones modales del sistema, representados por el modo impulsivo y los convectivos, es posible proceder con el análisis del fluido frente un movimiento horizontal del suelo.

En este enfoque, las dos variables fundamentales que describen el estado del fluido son el potencial de velocidad ϕ y la presión p , las cuales están relacionadas mediante dos ecuaciones principales: la ecuación de Laplace para el potencial de velocidad, ya presentada, y la ecuación de movimiento del fluido, también conocida como la ecuación de Kelvin. Esta ecuación se deriva a partir de las ecuaciones de Euler, aplicando la condición de flujo irrotacional y reorganizando términos, se expresa como:

$$\frac{1}{\rho}p + \frac{1}{2}v^2 + gZ' - \frac{\partial \phi}{\partial t} = C(t) \quad (2-9)$$

Donde gZ' es el potencial gravitatorio y $C(t)$ es una función arbitraria del tiempo.

Al resolver la Ecuación (2-9) con el potencial de velocidad previamente determinado, se obtiene la distribución de presiones hidrodinámicas en el interior del fluido. Conocida la presión, es posible calcular los parámetros de respuesta global del sistema, tales como los desplazamientos del fluido, corte basal, momento volcante y la distribución de presión sobre las paredes y el fondo del estanque.

2.2. Modelo de Housner

Es evidente que las expresiones analíticas presentadas son difícilmente aplicables a la práctica de la ingeniería. En este contexto, Housner (1957, 1963), propuso soluciones simplificadas al problema, las cuales son la base del enfoque normativa actual de diseño.

Housner (1957) analiza por separado las presiones hidrodinámicas desarrolladas por los modos impulsivo y convectivo cuando el fluido es sometido a una aceleración horizontal del suelo. El fluido se considera incompresible y con desplazamientos pequeños.

Para el modo impulsivo, el fluido se considera contenido entre membranas verticales paralelas, bajo el supuesto de que el movimiento del estanque no genera velocidad en dirección normal al plano de análisis. Bajo estas simplificaciones, se aplicó la ecuación de continuidad sobre un volumen de control (Figura N° 2-4) para obtener la relación entre velocidades. Luego, evaluando las ecuaciones de movimiento, se derivan las soluciones que permiten determinar la distribución de presiones impulsivas.

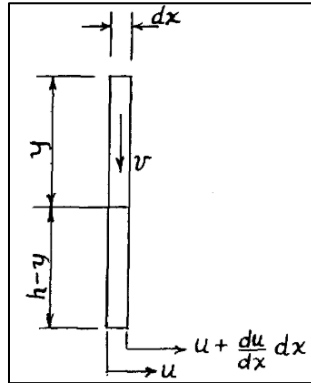


Figura N° 2-4: Volumen de control utilizado en el análisis del modo impulsivo

Housner (1957)

Para el modo convectivo fundamental, el fluido se representó restringido por membranas horizontales rígidas, libres de rotar en el plano (Figura N° 2-5). Aplicando la ecuación de continuidad sobre una franja del fluido y utilizando el principio de Hamilton, se obtienen las ecuaciones que permiten determinar la respuesta dinámica del modo.

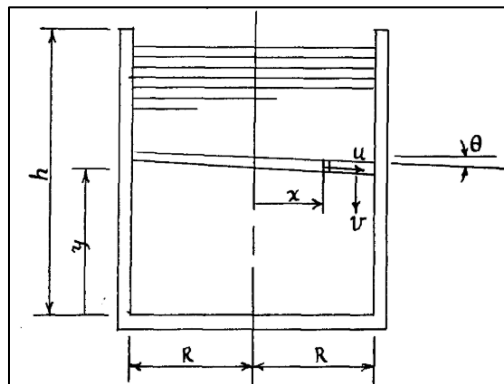


Figura N° 2-5: Modelo de análisis del modo convectivo

Housner (1957)

A partir de los resultados anteriores, Housner (1963), propuso un modelo mecánico equivalente, en el cual el fluido se representa mediante dos componentes: una masa impulsiva, conectada rígidamente a las paredes del estanque, y una masa convectiva, conectada a las paredes a través de resortes con cierta rigidez. En la Figura N° 2-6 se muestra el modelo, a la izquierda se muestra el estanque, sujeto a una aceleración horizontal del suelo, con la superficie libre deformada (modo convectivo fundamental), y a la derecha, su representación mediante el sistema masa – resorte.

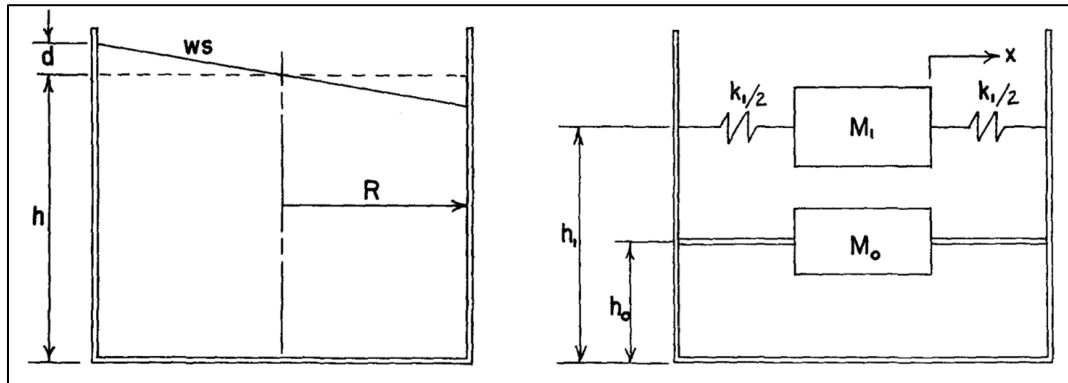


Figura N° 2-6: Modelo mecánico equivalente de Housner

Housner (1963)

A continuación, se presentan los resultados globales, para los modos impulsivo y convectivo, obtenidos por Housner.

2.2.1. Modo impulsivo

La distribución horizontal de la presión impulsiva, mostrada en la Figura N° 2-7, indica que, como consecuencia del movimiento horizontal del suelo, las presiones actúan en dirección opuesta al sismo. Esto produce un aumento de las presiones estáticas sobre un lado del estanque y una disminución en el lado opuesto.

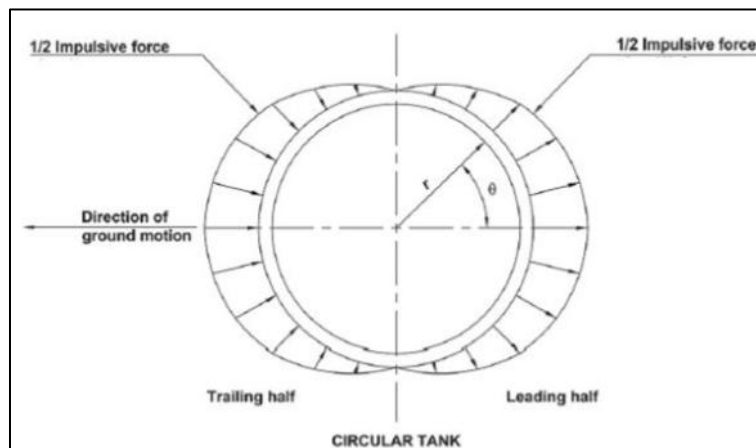


Figura N° 2-7: Distribución horizontal de presión impulsiva

ACI 350.3 (2021)

La fuerza lateral resultante impulsiva P_i actuando sobre cada mitad del estanque, es:

$$P_i = \frac{1}{2} W \frac{\dot{u}_0 \tanh\left(\sqrt{3} \frac{R}{h}\right)}{\sqrt{3} \frac{R}{h}} \quad (2-10)$$

Donde W es el peso del líquido y $\dot{u}_0$ es la aceleración del muro.

La masa impulsiva equivalente del fluido M_0 es:

$$M_0 = M \frac{\tanh\left(\sqrt{3} \frac{R}{h}\right)}{\sqrt{3} \frac{R}{h}} \quad (2-11)$$

Donde M es la masa total del fluido en el estanque.

Calculando el momento volcante provocado por la presión (sobre paredes y fondo) es posible calcular la altura de la masa impulsiva equivalente:

$$h_0 = \frac{3}{8} h \left[1 + \frac{4}{3} \left(\frac{\sqrt{3} \frac{R}{h}}{\tanh\left(\sqrt{3} \frac{R}{h}\right)} - 1 \right) \right] \quad \text{para} \quad \frac{h}{R} \leq 1.5 \quad (2-12)$$

La presión impulsiva sobre los muros del estanque se expresa como:

$$p_{iw} = -\sqrt{3} \rho \dot{u}_0 h \left(\frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) \tanh\left(\sqrt{3} \frac{R}{h} \cos(\phi)\right) \quad (2-13)$$

Donde ρ es la densidad del fluido y, ϕ e y corresponden a las coordenadas en el sistema cilíndrico (azimutal y vertical, respectivamente).

La presión sobre el fondo del estanque p_b se expresa como:

$$p_b = -\rho \dot{u}_0 h \frac{\sqrt{3} \sinh\left(\sqrt{3} \frac{x}{h}\right)}{2 \cosh\left(\sqrt{3} \frac{R}{h}\right)} \quad (2-14)$$

Donde x es la coordenada cartesiana que coincide con la dirección del sismo.

2.2.2. Modo convectivo

La distribución horizontal de la presión convectiva, mostrada en la Figura N° 2-8, es similar a la del modo impulsivo, actuando también en dirección opuesta al movimiento sísmico y generando un aumento de presión en un lado del estanque y una disminución en el lado opuesto.

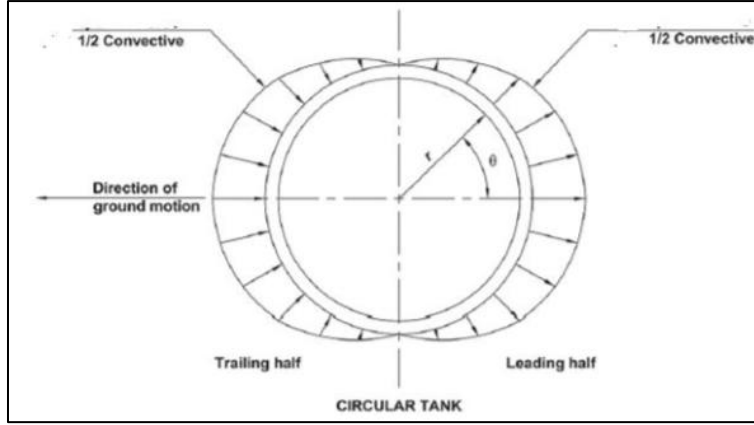


Figura N° 2-8 Distribución horizontal de presión convectiva
ACI 350.3 (2021)

La frecuencia fundamental del modo convectivo se expresa como:

$$\omega^2 = \frac{g}{R} \sqrt{\frac{27}{8}} \tanh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right) \quad (2-15)$$

La fuerza lateral resultante convectiva P_c actuando sobre cada mitad del estanque, es:

$$P_c = -\frac{11}{48} \pi R^4 \rho \omega^2 \theta_h \sin(\omega t) \quad (2-16)$$

Donde θ_h es la amplitud de la oscilación del modo convectivo fundamental.

La masa convectiva equivalente del fluido es:

$$M_1 = M \left(\frac{1}{4} \left(\frac{11}{12} \right)^2 \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{R}{h} \tanh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right) \right) \quad (2-17)$$

Calculando el momento volcante provocado por la presión (sobre paredes y fondo) es posible calcular la altura de la masa impulsiva equivalente:

$$h_1 = h \left(1 - \frac{\cosh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right) - \frac{135}{88}}{\sqrt{\frac{27}{8}} \cdot \frac{h}{R} \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \cdot \frac{h}{R} \right)} \right) \quad (2-18)$$

La presión convectiva sobre los muros se expresa como:

$$p_{cw} = \rho \omega^2 \theta_h \frac{R^2}{3} \left(1 - \frac{\cos^2(\phi)}{3} - \frac{\sin^2(\phi)}{4} \right) \cos(\phi) \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{y}{R}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)} \sin(\omega t) \quad (2-19)$$

La presión sobre el fondo del estanque se expresa como:

$$p_b = -\rho \omega^2 \sqrt{\frac{3}{8}} \frac{R^2}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}\right)} \left(\frac{x}{R} - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{R} \right)^3 - \frac{1}{4} \frac{x}{R} \left(\frac{z}{R} \right)^2 \right) \theta_h \sin \omega t \quad (2-20)$$

Este enfoque propuesto por Housner ha sido adoptado como base para diversas normativas internacionales. Tanto la norma ACI 350.3-20 (2021) como la NZS 3106:2009 (2009) incorporan este modelo mecánico equivalente para representar la interacción fluido-estructura de forma simplificada. Estas disposiciones normativas transforman las formulaciones originales en expresiones simplificadas para el diseño, mediante distribuciones lineales de presiones hidrodinámicas y gráficos que permiten obtener propiedades como masas y alturas equivalentes o periodos fundamentales. De esta manera, se facilita su aplicación práctica sin requerir una modelación compleja de la estructura.

3. Diseño sísmico de los estanques

El diseño de estanques de hormigón armado apoyados sobre el suelo contempla una serie de pasos, que incluyen la determinación de las solicitaciones, el análisis estructural y el diseño propiamente tal de los elementos componentes de la estructura. A efectos del presente estudio se considerará sólo las solicitaciones sísmicas.

En Chile, la norma NCh 2369 (INN, 2023), que reemplazó a la norma NCh 2369 (INN, 2003), establece los requisitos para la determinación de la sollicitación sísmica en estructuras industriales, incluyendo estanques. En el presente estudio se comparará los resultados obtenidos utilizando las disposiciones de ambas versiones de la norma.

Una vez determinado el nivel de la sollicitación sísmica, en términos de un espectro de respuesta, se procede con el análisis sísmico, determinando las fuerzas que actúan sobre la estructura del estanque. Para llevar a cabo este análisis NCh 2369 (INN, 2023) acepta el uso de diversas normas internacionales, entre estas, destacan la norma norteamericana ACI 350.3-20 (ACI, 2021b) y la neozelandesa NZS 3106:2009 (Standards New Zealand, 2009), que proporcionan las expresiones necesarias para estimar los parámetros de evaluación global de la estructura y las fuerzas sísmicas usadas para el diseño de los elementos.

El diseño estructural del estanque se desarrolla siguiendo los criterios dispuestos en la norma ACI 350-20 (ACI, 2021a), la cual establece los requisitos para estructuras de hormigón armado contenedoras de líquido.

A continuación, se describe brevemente las disposiciones normativas utilizadas en el diseño de estanques cilíndricos.

3.1. Metodología de diseño en la práctica actual

Actualmente, el diseño estructural de estanques de hormigón armado lleva a cabo mediante modelos de elementos finitos, bajo un enfoque lineal elástico. Para esto se utiliza un software especializado, como SAP2000, en el cual se modela la geometría del estanque, las condiciones de apoyo y las fuerzas actuantes, para luego realizar el análisis estructural.

Las sollicitaciones de diseño se introducen como cargas externas estáticas sobre la estructura. En particular, las presiones hidrodinámicas (separadas por modo) se incorporan utilizando las distribuciones obtenidas al aplicar las expresiones indicadas en la norma correspondiente. Estas distribuciones están simplificadas y consisten en expresiones lineales.

De este modo, las presiones impulsivas y convectivas pueden ser combinadas con otras sollicitaciones sísmicas, tales como las fuerzas inerciales de los muros, la presión por aceleración vertical y, en caso de contar con un estanque enterrado o semienterrado, los empujes sísmicos del suelo. Una vez incorporado estas fuerzas, junto con otros estados de carga, como presiones hidrostáticas y peso propio, se puede proseguir con el análisis estructural y el diseño de los elementos de hormigón armado.

3.2. Espectro de diseño NCh 2369:2003

Se obtiene el espectro de diseño a partir de lo dispuesto por la norma NCh 2369 (INN, 2003), incluyendo las disposiciones específicas para los modos impulsivos y convectivos para estanques verticales apoyados sobre el suelo. Se adopta el espectro de diseño con parámetros definidos para zona sísmica 3 y suelo tipo 2.

En la sección 11.8 de la norma se establecen los siguientes requerimientos para estanques de hormigón armado:

- Para modo impulsivo:
 - o Coeficiente de reducción sísmica $R = 3$
 - o Amortiguamiento $\xi = 0.03$
- Para modo convectivo:
 - o Amortiguamiento $\xi = 0.005$
 - o Aceleración espectral mínima igual a $0.10A_0/g$

De acuerdo con ACI 350.3-20 (ACI, 2021b), para el modo convectivo se adopta un valor de $R = 1$

La aceleración espectral de diseño S_a para cada uno de los modos se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S_a = \frac{2,75A_oI}{R} \left(\frac{T'}{T} \right)^n \left(\frac{0,05}{\xi} \right)^{0,4} \quad (3-1)$$

Donde A_o es la aceleración efectiva máxima del suelo, I es el coeficiente relativo a la importancia de la estructura, R es el factor de modificación de la respuesta, ξ es la razón de amortiguamiento, T es el periodo evaluado y T' y n corresponden a parámetros que dependen al tipo del suelo.

Para el modo impulsivo, la norma indica que el valor de S_a no debe superar un valor máximo, el cual resulta en la parte plana del espectro. Este valor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$S_{a(max)} = IC_{max} \quad (3-2)$$

Donde C_{max} se determina a partir de la Tabla 5.7 de la norma.

Dado que el modo impulsivo posee un periodo muy bajo, cae dentro de la zona plana del espectro, por lo que adopta el valor máximo de aceleración espectral definido por la norma. En cambio, para el modo convectivo no se establece un valor máximo, lo cual no tiene mayor incidencia en el análisis, ya que este modo presenta periodos altos y, en consecuencia, la aceleración espectral en esa zona del espectro ya es reducida.

En las Figura N° 3-1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura N° 3-2, se presenta el espectro de diseño elaborado con parámetros correspondientes para los modos impulsivo y convectivo, respectivamente.

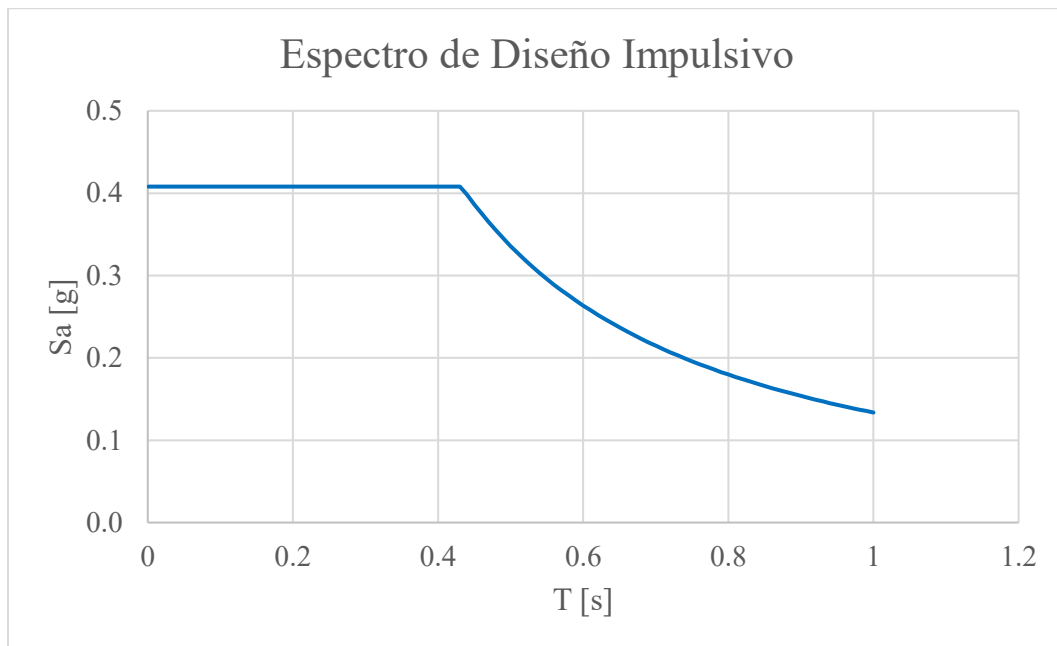


Figura N° 3-1: Espectro de diseño modo impulsivo NCh 2369 (2003)

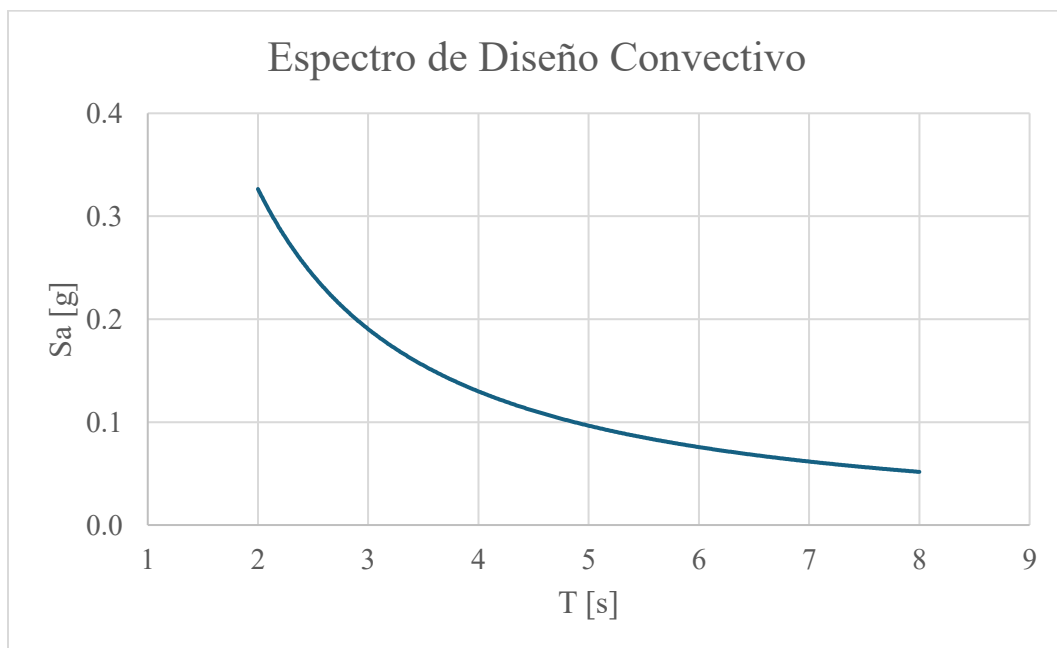


Figura N° 3-2: Espectro de diseño modo convectivo NCh 2369 (2003)

3.3. Espectro de diseño NCh 2369:2023

De forma similar, se obtiene el espectro de diseño basado en las disposiciones de la norma NCh 2369 (INN, 2023), la cual introduce modificaciones en la forma de obtener el espectro. Para efectos del análisis, se adopta el espectro de diseño con parámetros definidos para zona sísmica 3 y suelo tipo B, ajustado para los modos impulsivo y convectivo.

En la sección 11.2.2 de la norma se establecen los siguientes requerimientos para estanques de hormigón armado:

- Para modo impulsivo:
 - o Coeficiente de reducción sísmica $R = 3$
 - o Amortiguamiento $\xi = 0.03$
- Para modo convectivo:
 - o Coeficiente de reducción sísmica $R = 1$
 - o Amortiguamiento $\xi = 0.005$
 - o Aceleración espectral mínima igual a $0.10SA_0/g$

La aceleración espectral de referencia, definida en la sección 5.4.2, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S_{aH(T_H)} = 1.4SA_0 \left(\frac{1 + 4.5 \left(\frac{T_H}{T_0} \right)^p}{1 + \left(\frac{T_H}{T_0} \right)^3} \right) \quad (3-3)$$

Donde S , T_0 y p son parámetros relativos al tipo de suelo, obtenidos de Tabla 5 de la norma, y T_H es el periodo evaluado.

En la norma se establece que la Ecuación (3-3) es válida para valores de amortiguamiento ξ entre 0.02 y 0.05, lo que implica que para el modo convectivo de estanques de hormigón no sería aplicable. Sin embargo, debido a la inexistencia de disposiciones adicionales se aplicará la Ecuación (3-3) de la misma forma que para el modo impulsivo.

La aceleración espectral de diseño se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S_{a(T_H)} = 0.7 \frac{IS_{aH}(T_H)}{R} \left(\frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4} \quad (3-4)$$

A diferencia de la versión anterior de la norma, no existe un valor máximo de aceleración espectral para el modo impulsivo. Sin embargo, se indica un valor de coeficiente sísmico mínimo, indicando su uso en análisis estáticos. Además, si el corte basal obtenido con el análisis modal espectral es menor al corte mínimo Q_{min} , se debe aplicar un factor de corrección Q_{min}/Q_0 , donde Q_{min} se calcula a partir de las siguientes ecuaciones:

$$Q_{min} = C_{min} \cdot P \quad (3-5)$$

$$C_{min} = \frac{2.75ISA_0}{g(R+1)} \left(\frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4} \text{ para } 0.06 [s] < T^* < 0.25 [s] \quad (3-6)$$

$$C_{min} = 0.25ISA_0/g \text{ para } T^* \geq 0.25 [s] \quad (3-7)$$

Donde P corresponde al peso de la estructura y T^* al periodo fundamental de vibración.

La norma indica que el factor de corrección se debe aplicar para todas las fuerzas y esfuerzos internos derivados con el espectro de diseño. Debido a que la interacción fluido-estructura tiene dos respuestas separadas, se calculará el coeficiente mínimo, corte basal mínimo y posible factor de corrección a los modos impulsivo y convectivo por separado, utilizando el peso efectivo obtenido para cada uno. Para el modo impulsivo se utilizará la Ecuación (3-9), aunque el periodo fundamental se encuentre fuera del rango establecido. En cambio para el modo convectivo utilizara la disposición específica de aceleración espectral mínima expuesta en la sección 11.2.2.2 de la norma.

En las Figura N° 3-3 y Figura N° 3-4, se presenta el espectro de diseño para los modos impulsivo y convectivo, respectivamente.

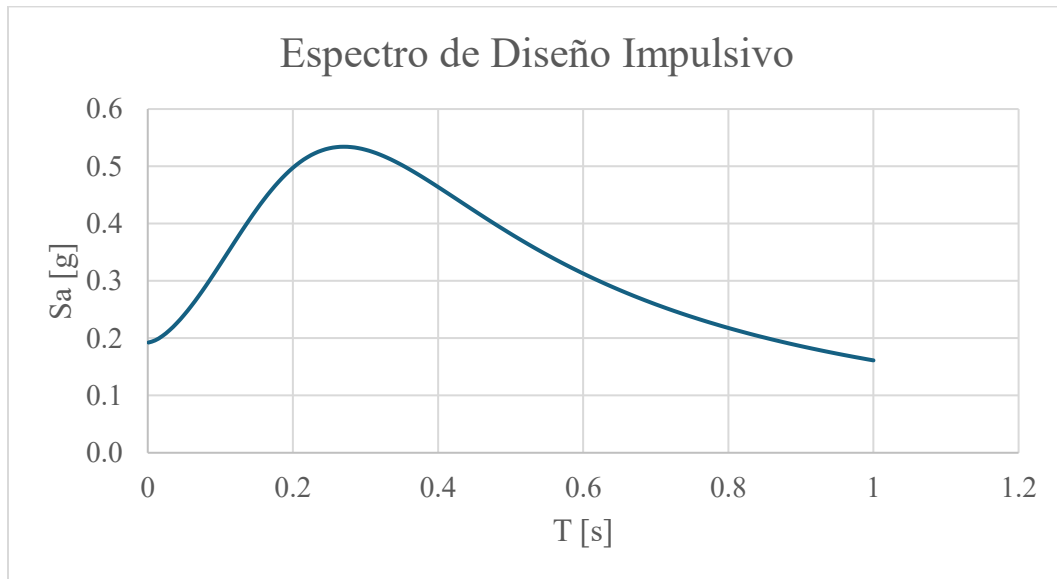


Figura N° 3-3: Espectro de diseño modo impulsivo NCh 2369 (2023)

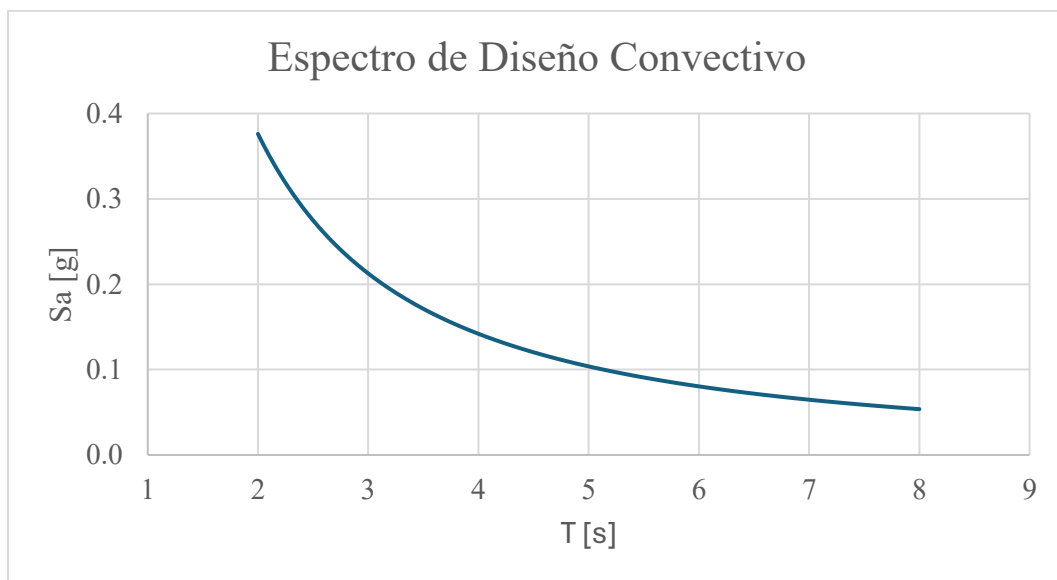


Figura N° 3-4: Espectro de diseño modo convectivo NCh 2369 (2023)

3.4. Análisis sísmico ACI 350.3-20 (ACI, 2021b)

Las ecuaciones analíticas y el modelo mecánico equivalente desarrollados por Housner (1957, 1963), con el objetivo de representar de forma simplificada la interacción fluido – estructura, han servido de base, junto a otros estudios, para las disposiciones presentes en las normas como ACI 350.3-20 (ACI, 2021b) y NZS 3106:2009 (Standards New Zealand, 2009).

Con el fin de hacer estas formulaciones más aplicables al diseño de estanques, las normas simplifican las expresiones originales, proponiendo expresiones lineales para la distribución de presiones hidrodinámicas sobre las paredes y el fondo del estanque.

El modelo mecánico equivalente, presentado en la Figura N° 3-5 y expuesto en el capítulo 9 de ACI 350.3-20 (ACI, 2021b), presenta el sistema de masa-resorte desarrollado por Housner (1963). Este modelo incorpora los efectos de los modos del fluido, impulsivo (W_i), que está conectado rígidamente con las paredes del estanque a una altura h_i y convectivo (W_c), que se conecta a las paredes del estanque mediante resortes a una altura h_c .

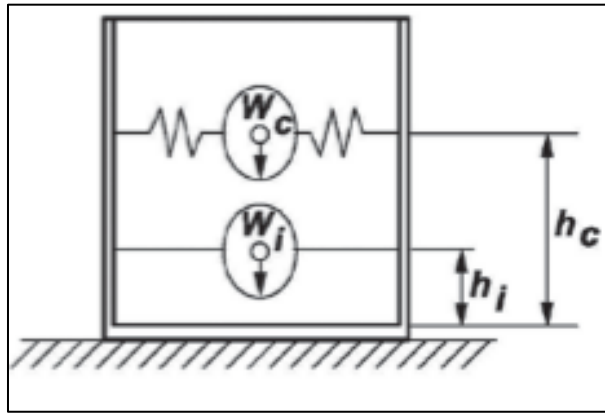


Figura N° 3-5: Modelo mecánico equivalente

ACI 350.3-20 (ACI, 2021b)

3.4.1. Frecuencias y periodos fundamentales

El periodo de vibración del primer modo convectivo T_c se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad (3-8)$$

$$\omega_c = \frac{\lambda}{\sqrt{D}} \quad (3-9)$$

$$\lambda = \sqrt{3.68 g \tanh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right)} \quad (3-10)$$

Donde H_L corresponde a la altura del líquido y D al diámetro del estanque.

El periodo fundamental del modo impulsivo T_i se determina considerando una estructura con la masa propia del estanque y sumándole la masa impulsiva del fluido. Se determina utilizando las siguientes ecuaciones:

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (3-11)$$

$$\omega_i = C_l \times \frac{1}{H_L} \sqrt{\frac{E_c g}{\gamma_c}} \quad (3-12)$$

$$C_l = C_w \times 10 \sqrt{\frac{t_w}{r}} \quad (3-13)$$

$$C_w = 9.375 \times 10^{-2} + 0.2039(H_L/D) - 0.1034(H_L/D)^2 - 0.1253(H_L/D)^3 + 0.1267(H_L/D)^4 - 3.186 \times 10^{-2}(H_L/D)^5 \quad (3-14)$$

$$\text{Para } \frac{D}{H_L} > 0.667$$

Donde E_c corresponde al módulo de elasticidad del hormigón, γ_c es el peso específico del hormigón, t_w es el espesor del muro del estanque y r es el radio.

3.4.2. Pesos equivalentes y resultante de fuerzas dinámicas laterales

El peso y la altura equivalente (incluyendo las presiones de la base) de la componente impulsiva de fluido se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$W_i/W_L = \frac{\tanh[0.866(D/H_L)]}{0.866(D/H_L)} \quad (3-15)$$

$$h'_i/H_L = 0.45 \text{ para } D/H_L < 0.75 \quad (3-16)$$

$$h'_i/H_L = \frac{0.866(D/H_L)}{2 \tanh[0.866(D/H_L)]} - 0.125 \text{ para } D/H_L \geq 0.75 \quad (3-17)$$

El peso y la altura equivalente (incluyendo las presiones de la base) de la componente convectiva de fluido se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$W_c/W_L = 0.230(D/H_L) \tanh[3.68(H_L/D)] \quad (3-18)$$

$$h'_c = 1 - \frac{\cosh[3.68(H_L/D)] - 2.01}{3.68(H_L/D) \sinh[3.68(H_L/D)]} \quad (3-19)$$

Las resultantes de las fuerzas dinámicas laterales se obtienen utilizando el coeficiente sísmico, peso equivalente y factor de reducción correspondiente a cada modo. Estas corresponden a la resultantes de las presiones hidrodinámicas impulsiva (P_i) y convectiva (P_c) y a la fuerza inercial del muro (P_w).

$$P_i = C_i I \times \frac{W_i}{R_i} \quad (3-20)$$

$$P_c = C_c I \times \frac{W_c}{R_c} \quad (3-21)$$

$$P_w = C_i I \times \frac{\epsilon W_w}{R_i} \quad (3-22)$$

3.4.3. Altura de ola convectiva

La altura de ola se obtiene con las siguientes expresiones:

$$d_{max} = \frac{D}{2} C_c I \quad (3-23)$$

$$d_{max} = \frac{0.204D}{\left(\frac{2g}{\omega_c^2 C_c D} - 1\right) \tanh\left(\frac{3.68H_L}{D}\right)} I \quad (3-24)$$

Donde D corresponde al diámetro del estanque, C_c es el coeficiente sísmico convectivo, I es el factor de importancia de la estructura, ω_c es la frecuencia angular del primer modo convectivo y H_L es la altura de líquido.

La primera ecuación corresponde a una expresión simplificada que entrega valores conservadores, mientras que la segunda ecuación es extraída del trabajo de Housner (1963).

3.4.4. Presiones hidrodinámicas

Para simplificar las expresiones basadas en la solución exacta, ACI 350.3-20 (ACI, 2021b) propone el uso de expresiones lineales simplificadas para el cálculo de presiones hidrodinámicas.

La presión impulsiva en dirección vertical se expresa como:

$$P_{iy} = \frac{\frac{P_i}{2} \left[4H_L - 6h_i - (6H_L - 12h_i) \left(\frac{y}{H_L} \right) \right]}{H_L^2} \quad (3-25)$$

Donde P_i corresponde a la fuerza resultante impulsiva obtenida del análisis modal-espectral

La distribución radial (Figura N° 2-7) se expresa como:

$$p_{iy} = (2P_{iy}/\pi r) \cos(\theta) \quad (3-26)$$

De igual manera para la presión convectiva se presentan las siguientes expresiones:

Para $h_c < (2/3)H_L$:

$$P_{cy} = \frac{\frac{P_c}{2} \left[4H_L - 6h_c - (6H_L - 12h_c) \left(\frac{y}{H_L} \right) \right]}{H_L^2} \geq 0 \quad (3-27)$$

Para $h_c \geq (2/3)H_L$:

Para $y \leq (3h_c - 2H_L)$:

$$P_{cy} = 0$$

Para $y > (3h_c - 2H_L)$:

$$P_{cy} = \frac{P_c [y + 2H_L - 3h_c]}{9(H_L - h_c)^2} \quad (3-28)$$

Donde P_c corresponde a la fuerza resultante impulsiva obtenida del análisis modal-espectral.

La distribución radial (Figura N° 2-8) se expresa como:

$$p_{cy} = (16P_{cy}/9\pi r) \cos(\theta) \quad (3-29)$$

La Figura N° 3-6 presenta la distribución vertical de las fuerzas dinámicas horizontales, comparando la distribución exacta de Housner (línea segmentada) con la distribución lineal simplificada para los modos convectivo e impulsivo.

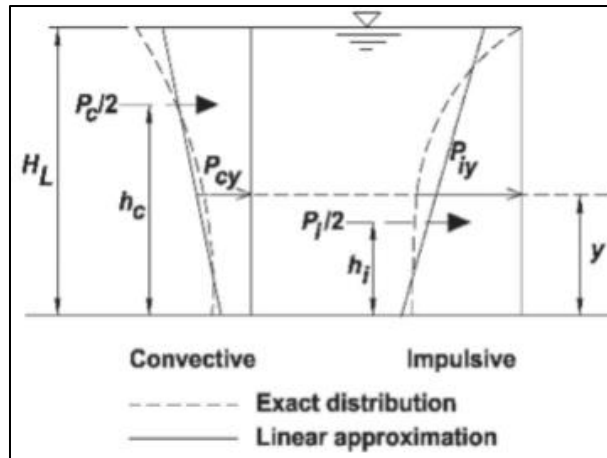


Figura N° 3-6: Distribución de presión impulsiva y convectiva

ACI 350.3-20 (ACI, 2021b)

3.5. Resultados análisis sísmico

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis sísmico según las disposiciones antes presentadas de las normas NCh 2369 (INN, 2003), NCh 2369 (INN, 2023) y ACI 350.3-20 (ACI, 2021b). El análisis se ha aplicado a los dos estanques descritos a continuación, denominados A y B.

3.5.1. Estanques analizados

Las estructuras analizadas en este estudio corresponden a dos estanques cilíndricos de hormigón armado, construidos y actualmente en servicio. Ambos estanques son de geometría similar, como se muestra en las Figura N° 3-7 y Figura N° 3-8. Su estructura está constituida por la losa de fundación, las paredes, la losa de techo, pilares interiores y vigas de techo.

En la Tabla 3-1 se presenta las dimensiones geométricas de los estanques.

En la Tabla 3-2 se presenta las propiedades de los materiales utilizados en el análisis para cada uno de los estanques tipo.

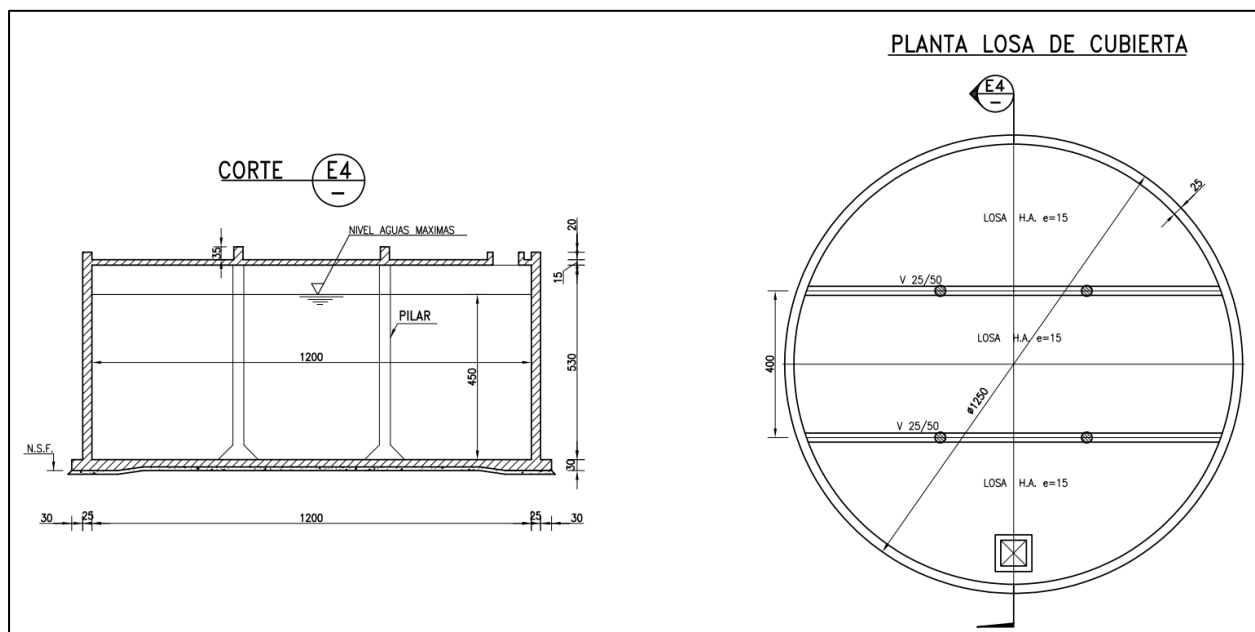


Figura N° 3-7: Planos de forma estanque A

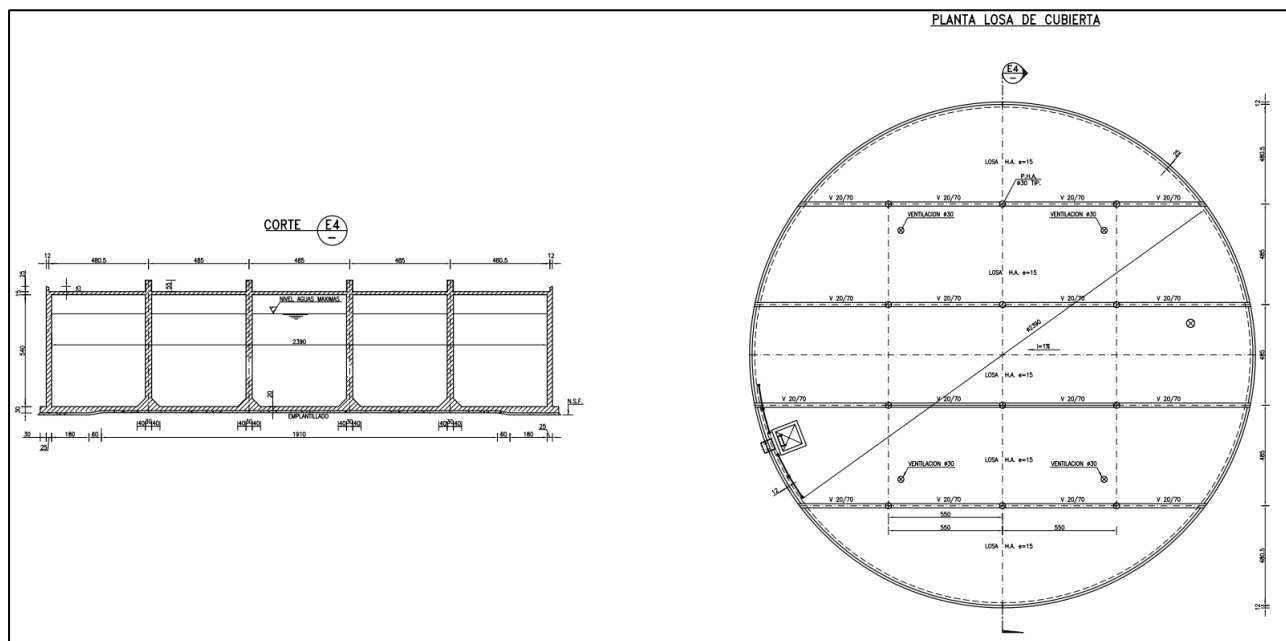


Figura N° 3-8: Planos de forma estanque B

Tabla 3-1: Dimensiones estanques

Parámetros geométricos estanques tipo		
Estaque	A	B
Volumen [m ³]	500	2000
Diámetro [m]	12	23.9
Altura liquido [m]	4.5	4.5
Altura muro [m]	5.3	5.4
Espesor muro [m]	0.25	0.25
Espesor losa fundación [m]	0.3	0.3
Espesor losa techo [m]	0.15	0.15
b _{viga} [m]	0.25	0.2
h _{viga} [m]	0.5	0.7
Diámetro pilares [m]	0.3	0.3

Tabla 3-2: Propiedades de los materiales

Propiedades de materiales	
Densidad liquido [kg/m ³]	1000
Velocidad del sonido [m/s]	1500
Densidad hormigón [kg/m ³]	2500
Módulo de elasticidad hormigón [kgf/cm ²]	238752

3.5.2. Pesos y alturas equivalentes

La Tabla 3-3 resume los pesos equivalentes W_i y W_c y las alturas de aplicación (incluyendo presiones sobre la base) de las componentes impulsiva y convectiva, h_i y h_c respectivamente. También se incluye el peso efectivo de los muros (εW_w) y del techo del estanque (W_r).

Tabla 3-3: Peso y alturas equivalentes ACI 350.3-20 (2021)

Parámetro	Estanque A	Estanque B
W_i [tonf]	215.5	438
W_c [tonf]	274.3	1476.5
εW_w [tonf]	81.3	116
W_r [tonf]	55.9	206.4
h_i [m]	4.94	9.79
h_c [m]	4.52	11.09

3.5.3. Periodos fundamentales y coeficientes sísmicos

En la Tabla 3-4 se presentan los periodos asociados a los modos impulsivo y convectivo del líquido para cada estanque.

Tabla 3-4: Periodos por modo ACI 350.3-20 (2021)

Parámetro	Estanque A	Estanque B
T_i [s]	0.03	0.05
T_c [s]	3.86	6.60

En la Tabla 3-5 se presentan los coeficientes sísmicos obtenidos al aplicar las disposiciones de la norma sísmica respectiva.

Tabla 3-5: Coeficientes sísmicos

Modo	Estanque A NCh 2369 (2003)	Estanque A NCh 2369 (2023)	Estanque B NCh 2369 (2003)	Estanque B NCh 2369 (2023)
Impulsivo [g]	0.408	0.405	0.408	0.405
Convectivo [g]	0.136	0.149	0.067	0.070

3.5.4. Fuerzas dinámicas

La Tabla 3-6 muestra las fuerzas dinámicas laterales resultantes obtenidas para ambos modos de respuesta, así como la fuerza sobre la estructura.

Tabla 3-6: Resultante de fuerzas dinámicas ACI 350.3-20 (2021)

Parámetro	Estanque A NCh 2369 (2003)	Estanque A NCh 2369 (2023)	Estanque B NCh 2369 (2003)	Estanque B NCh 2369 (2023)
Modo impulsivo [tonf]	87.9	87.3	178.7	177.3
Techo estanque [tonf]	22.8	22.6	84.2	83.6
Estanque (efectivo) [tonf]	33.2	32.9	47.3	47.0
Modo convectivo [tonf]	37.4	40.9	98.5	103.8
Total SRSS	148.7	148.6	325.5	324.9

3.5.5. Momento volcante

La Tabla 3-7 resume los momentos volcantes generados por las fuerzas dinámicas. Estos momentos se calculan respecto a la base del estanque e incluyen el efecto de las presiones sobre esta.

Tabla 3-7: Momento volcante ACI 350.3-20 (2021)

Parámetro	Estanque A NCh 2369 (2003)	Estanque A NCh 2369 (2023)	Estanque B NCh 2369 (2003)	Estanque B NCh 2369 (2023)
Modo impulsivo [tonf-m]	434.2	430.8	1785	1771
Techo estanque [tonf-m]	122.6	121.7	461.1	457.5
Estanque (efectivo) [tonf-m]	94.5	93.8	137.2	136.2
Modo convectivo [tonf-m]	168.8	185.0	1111.4	1171.1
Total SRSS	672.8	672.3	2629.7	2638.8

3.5.6. Altura de ola convectiva

La Tabla 3-8 muestra la altura estimada de la componente convectiva del movimiento, utilizando las dos expresiones descritas anteriormente.

Tabla 3-8: Altura de ola convectiva ACI 350.3-20 (2021)

Ecuación	Estanque A NCh 2369 (2003)	Estanque A NCh 2369 (2023)	Estanque B NCh 2369 (2003)	Estanque B NCh 2369 (2023)
(3-23) [cm]	81.7	89.5	79.7	84
(3-24) [cm]	75.2	84.2	63.7	67.4

3.5.7. Presiones hidrodinámicas laterales

Las Figura N° 3-9 y N° 3-10 muestra la distribución de presiones dinámicas laterales aplicadas al muro de cada estanque. En los casos de presión impulsiva y convectiva se presentan los valores máximos obtenidos en el perímetro del estanque, evidenciando como varía la magnitud ante el cambio de norma.

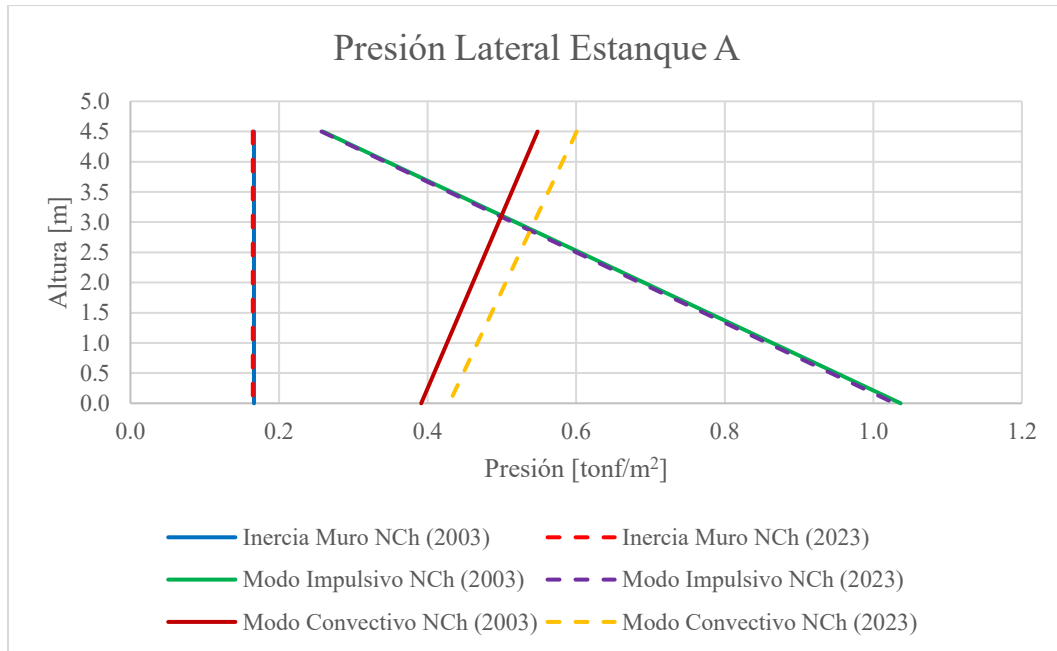


Figura N° 3-9: Presiones dinámicas laterales A ACI 350.3-20 (2021)

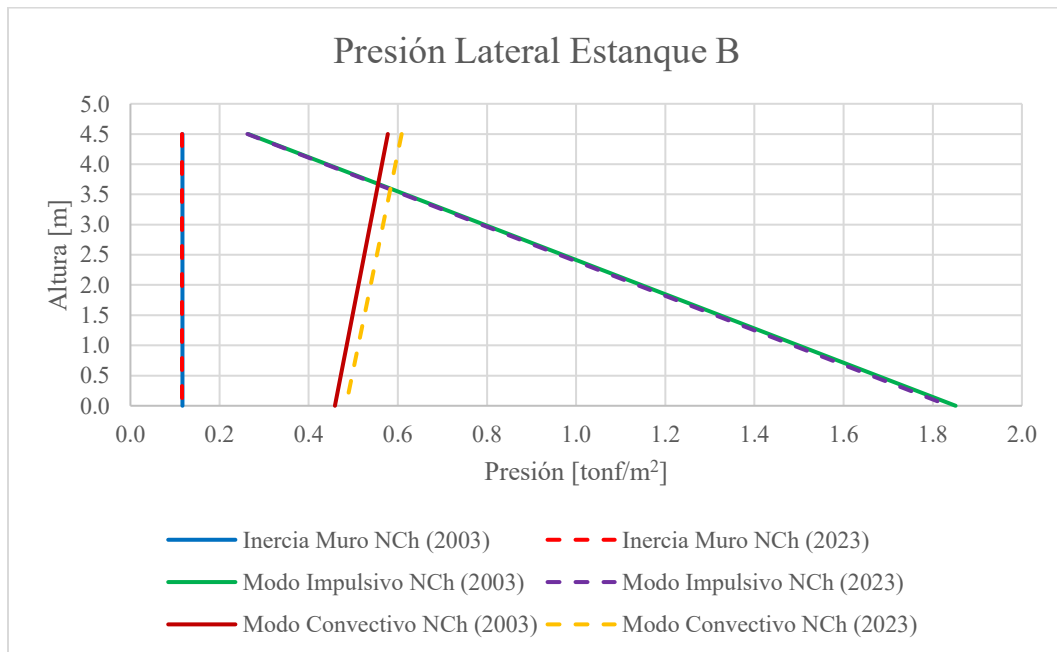


Figura N° 3-10: Presiones dinámicas laterales B ACI 350.3-20 (2021)

4. Análisis por elementos finitos

4.1. Objetivo del análisis

El objetivo es analizar el comportamiento dinámico de un estanque de hormigón armado sometido a solicitaciones sísmicas, incorporando en el modelo la interacción fluido – estructura. Este enfoque permite representar con mayor precisión la respuesta del sistema frente a un sismo, capturando los efectos generados en el fluido y las fuerzas inducidas sobre la estructura.

Para evaluar la interacción fluido-estructura se empleará el software Ansys® Mechanical APDL, Release 24.2 (ANSYS, Inc., 2024). El software permite modelar tanto el fluido como la estructura del estanque utilizando elementos finitos, posibilitando el análisis de un sistema acoplado. A partir de la creación de un modelo geométrico, definición de propiedades de los materiales y las condiciones de borde, es posible realizar el análisis requerido a partir de los diferentes solucionadores que ofrece el software, posibilitando la realización de análisis estáticos, modal-espectral y tiempo – historia.

4.2. Antecedentes de estudios previos

Diversos estudios han abordado el análisis del comportamiento dinámico de estanques de distintas materialidades y geometrías utilizando modelos de elementos finitos, enfocándose en los efectos de la interacción fluido-estructura bajo solicitaciones sísmicas.

Caneo (2006) realizó un análisis dinámico de un estanque superficial de acero utilizando elementos finitos en ANSYS. El estudio incluyó modelamiento detallado de la estructura (paredes, techo y fluido interior) considerando la interacción fluido-estructura. Se compararon resultados entre análisis estático y dinámico, concluyendo que el método estático es más conservador para estimar corte basal, pero menos preciso en la distribución de esfuerzos. Además, se destacó que el análisis dinámico es más eficiente en modelación al reducir la complejidad de las cargas aplicadas.

Vidal (2007) analizó el comportamiento sísmico de un estanque cilíndrico de hormigón armado utilizando SAP2000. El estudio comparó los resultados obtenidos mediante análisis estático y modal-espectral, tanto con modelos mecánicos equivalentes como con elementos finitos (incluyendo modos convectivo e impulsivo como masas puntuales), evaluando la validez de las normativas chilena (NCh 2369:2003), norteamericana y neozelandesa. Se concluyó que la norma chilena tiende a subestimar la acción sísmica. El autor recomienda ampliar los estudios a geometrías diferentes.

Compagnoni et al. (2012) realizaron un análisis comparativo entre modelos simplificados y modelos numéricos mediante elementos finitos en ANSYS, para evaluar el comportamiento dinámico de estanque cilíndricos. Su estudio muestra que, si bien los modelos mecánicos tipo masa-resorte resultan adecuados para fines de diseño, en ciertos casos las diferencias con modelos más detallados pueden ser significativas.

Moslemi & Kianoush (2012) investigaron el comportamiento dinámico de estanques cilíndricos apoyados en el suelo mediante un modelo de elementos finitos elaborado en ANSYS. Los parámetros analizados incluyeron el efecto de la flexibilidad del estanque, el efecto de la aceleración vertical, el efecto de la condición de fijación de la base y la relación entre diámetro y altura del estanque. A partir de análisis modal-espectral y tiempo-historia, se comparó los resultados con los calculados a partir de métodos analíticos. El estudio concluyó que los métodos actuales de diseño son conservadores al estimar las presiones hidrodinámicas.

Ortiz (2016) estudió el comportamiento de un estanque cilíndrico, resolviendo el problema en forma analítica y con el uso de un modelo de elementos finitos elaborado en ANSYS. A partir de varios modelos,

tanto 2D como 3D, y utilizando herramientas de simetría, analizó los diferentes tipos de elementos que ofrece el software para modelar el fluido, comparando los resultados obtenidos con soluciones analíticas y normativas del Eurocódigo 8-4 y API-650.

Loja (2019) desarrolló un estudio enfocado en la determinación de cargas sísmicas en estanques de hormigón con geometría ovoide. Aplicó formulaciones normativas norteamericana y ecuatoriana, y comparó los resultados con modelos de elementos finitos en ANSYS. Para representar la geométrica compleja, utilizó un estanque cilíndrico equivalente.

Kangda (2021) presentó una descripción detallada del uso de ANSYS para modelar estanques, incluyendo tanto las suposiciones y recomendaciones para el modelado, como los diferentes métodos de análisis disponibles en el software.

Saria et al. (2022) analizaron un modelo no lineal de un estanque cilíndrico de acero con base aislada utilizando un modelo de elementos finitos desarrollado en ANSYS. El estudio, a partir de un análisis tiempo-historia, evalúa la eficacia de los sistemas de aislamiento sísmico para reducir los desplazamientos horizontales y mejorar la respuesta estructural.

Estos estudios demuestran el avance en la comprensión de la interacción fluido-estructura y la aplicabilidad de modelos de elementos finitos para analizar estanques contenedores de líquidos.

4.3. Interacción fluido-estructura en el modelo

El software ANSYS permite modelar la interacción fluido-estructura mediante el acoplamiento de las ecuaciones de movimiento relativas al elemento estructural y al fluido acústico. La teoría descrita en ANSYS Help (2024) detalla cómo se relacionan presiones, fuerzas internas y desplazamientos de los elementos, que, en conjunto, permiten la resolución de este tipo de problemas de manera numérica. Las condiciones de borde para el acoplamiento se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\bar{\sigma}(\vec{u}_s)\vec{n} + p\vec{n} = 0 \quad (4-1)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{u}_s - \vec{n} \cdot \vec{u}_f = 0 \quad (4-2)$$

Donde $\bar{\sigma}$ es el tensor de esfuerzos del sólido, $\vec{u}_s$ es vector de desplazamientos del sólido, p es la presión del fluido, $\vec{n}$ es el vector unitario normal del dominio del fluido y $\vec{u}_f$ es el vector de desplazamientos del fluido.

En la Ecuación (4-1) se establece un equilibrio cinético, asegurando que los esfuerzos internos del sólido en la dirección normal y la presión del fluido estén balanceados. En la Ecuación (4-2) se plantea la condición cinemática, que garantiza que los desplazamientos normales del sólido y del fluido sean iguales en la interfaz.

Una explicación detallada de las expresiones, junto con la formulación de las ecuaciones de movimiento acopladas, se presenta en ANSYS Help (2024).

4.4. Modelación

A continuación, se presentan los elementos que se utilizarán para la elaboración del modelo en ANSYS Mechanical APDL.

4.4.1. Modelación del fluido

El fluido se modela empleando FLUID30, elemento especializado en la simulación de fenómenos acústicos y adecuado para modelar la interacción fluido-estructura. Este elemento se define por una geometría de 8

nodos, con grados de libertad de presión y desplazamientos en los tres ejes, además de las propiedades del material. La geometría del elemento se puede observar en la Figura N° 4-1.

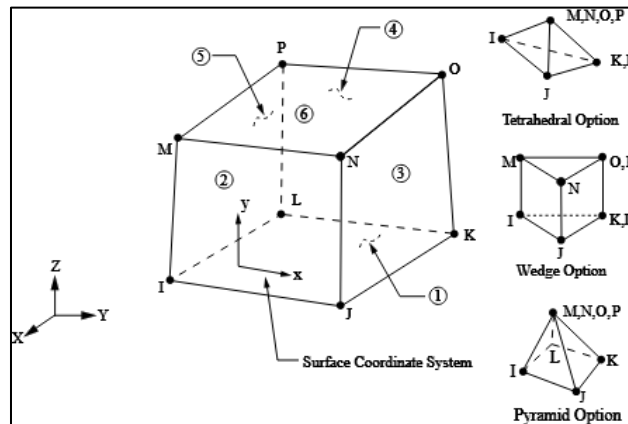


Figura N° 4-1: Geometría elemento FLUID30

ANSYS Help (2024)

4.4.2. Modelación de las paredes del estanque

Las paredes del estanque se modelan utilizando el elemento SHELL181, diseñado para la simulación de estructuras delgadas y moderadamente gruesas. Este elemento posee capacidades tanto de flexión como de membrana, lo que lo hace adecuado para este tipo de estructuras. Su geometría, mostrada en la Figura N° 4-2, está compuesta por 4 nodos, cada uno con seis grados de libertad (traslaciones y rotaciones en los tres ejes coordenados).

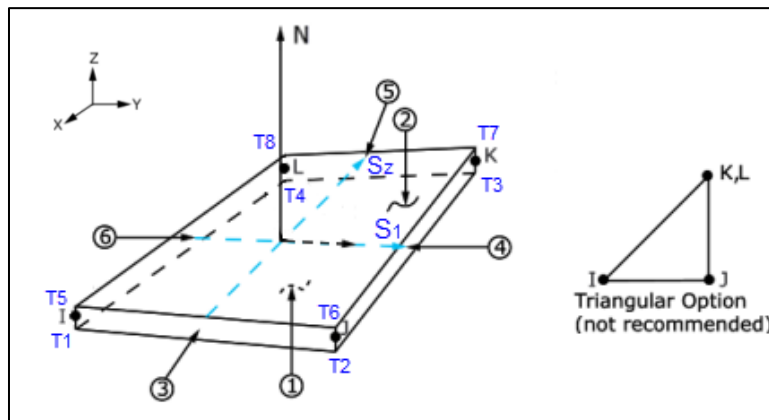


Figura N° 4-2: Geometría elemento SHELL181

ANSYS Help (2024)

4.4.3. Modelación de vigas y pilares

Tanto las vigas de techo como los pilares se modelan utilizando el elemento BEAM188, que permite analizar estructuras de vigas esbeltas a moderadamente no esbeltas, incluyendo los efectos de deformación por corte. Su geometría, mostrada en la Figura N° 4-3, está compuesta por dos nodos, cada uno con seis grados de libertad (traslaciones y rotaciones en los tres ejes coordenados).

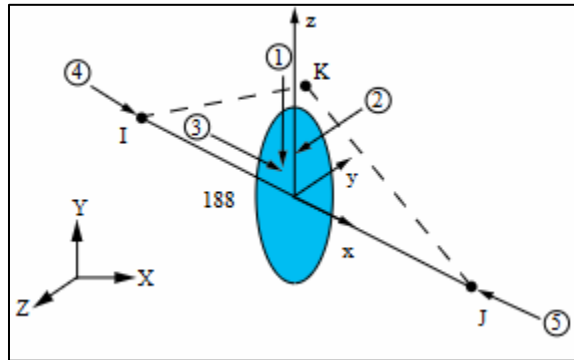


Figura N° 4-3: Geometría elemento BEAM188

ANSYS Help (2024)

4.5. Obtención de resultados

El posprocesamiento en el software permite acceder a múltiples resultados tal como se describe a continuación.

4.5.1. Formas modales y frecuencias fundamentales

Las formas modales pueden visualizarse eligiendo el modo con el comando SET y luego graficándolo con el comando PLNSOL. La visualización se realiza a partir de los desplazamientos modales o graficando la distribución de presión. También es posible exportar el valor de la frecuencia asociado a cada modo, el que se presenta en la leyenda del gráfico de la forma modal o se puede obtener mediante el comando *GET, con el cual también es posible determinar el factor de participación y la masa efectiva del modo.

4.5.2. Desplazamientos, presiones y fuerzas nodales

Los resultados nodales se pueden obtener a partir de los siguientes comandos:

- PLNSOL y PRNSOL: para visualizar o exportar (respectivamente) desplazamientos, presiones o fuerzas en nodos
- FSUM/NFORCE: para obtener la suma de las fuerzas y momentos nodales

4.5.3. Fuerzas internas

Las fuerzas internas de la pared del estanque pueden obtenerse utilizando el comando ETABLE. La definición de las fuerzas internas del elemento tipo shell se muestra en la Figura N° 4-4.

Dado que el modelo está definido en un sistema coordenado cilíndrico, las fuerzas internas se interpretan de la siguiente manera:

- El eje local x coincide con la dirección angular θ
- El eje local y coincide con la dirección vertical z
- N_{11} representa la fuerza axial en la dirección angular
- Q_{23} corresponde a la fuerza de corte en la dirección radial
- N_{12} corresponde a la fuerza de corte en la dirección tangencial
- M_{11} es el momento flector respecto del eje z

- M_{22} es el momento flector respecto del eje θ

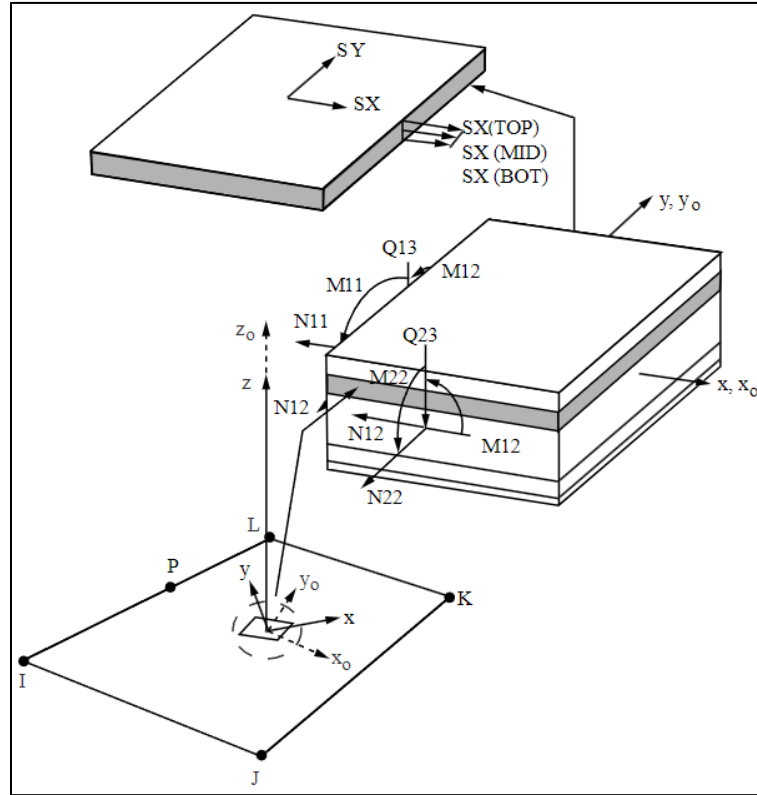


Figura N° 4-4: Fuerzas internas de Shell

4.6. Modelos de análisis utilizado

Los modelos desarrollados para los estanques A y B consideran la interacción fluido-estructura mediante las condiciones de contorno apropiadas en la interfaz sólido – líquido, es decir, en las paredes y la losa de fundación. Además, se incluye la condición de superficie libre en el nivel superior del fluido y se impone un apoyo rígido en la base, restringiendo los desplazamientos de los nodos ubicados en la losa de fundación.

Cada modelo presenta los elementos estructurales de cada estructura, tales como losas, muros, pilares y vigas, en la disposición mostrada en los planos de cada estructura, presentadas en las Figura N° 3-7 y Figura N° 3-8.

Las Figura N° 4-5 y Figura N° 4-6 muestran respectivamente la vista en corte y en planta del modelo del estanque A. Se puede observar cada uno de los elementos presentes y la distribución de estos.

Del mismo modo, las Figura N° 4-7 y Figura N° 4-8 muestran la vista en corte y en planta del modelo del estanque B.

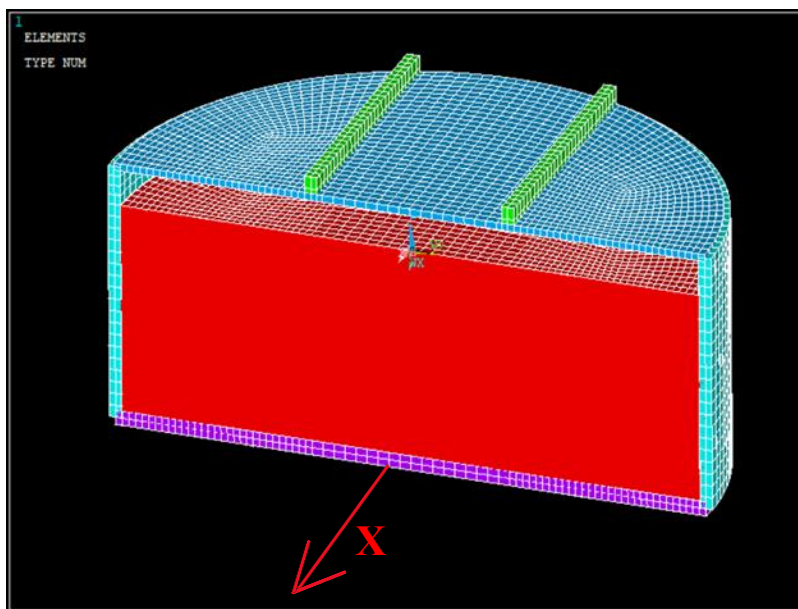


Figura N° 4-5: Vista en corte modelo estanque A

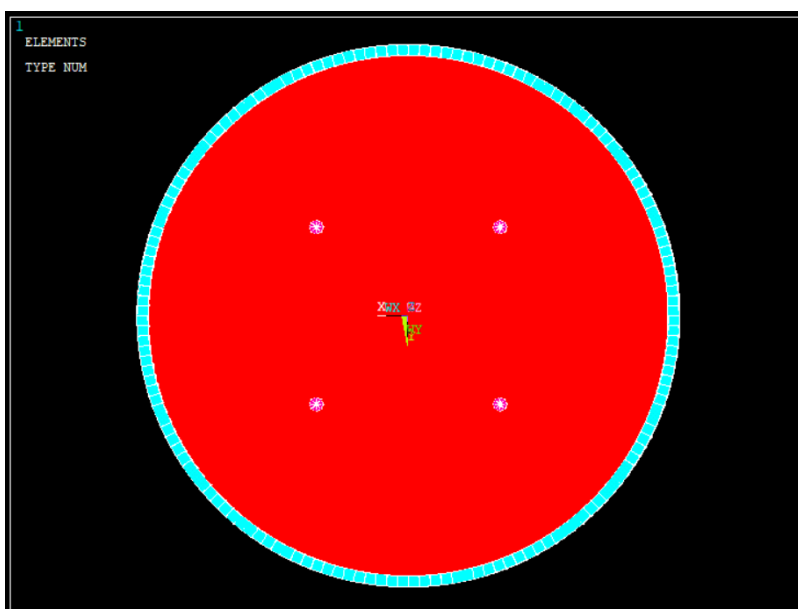


Figura N° 4-6: Vista en planta pilares modelo estanque A

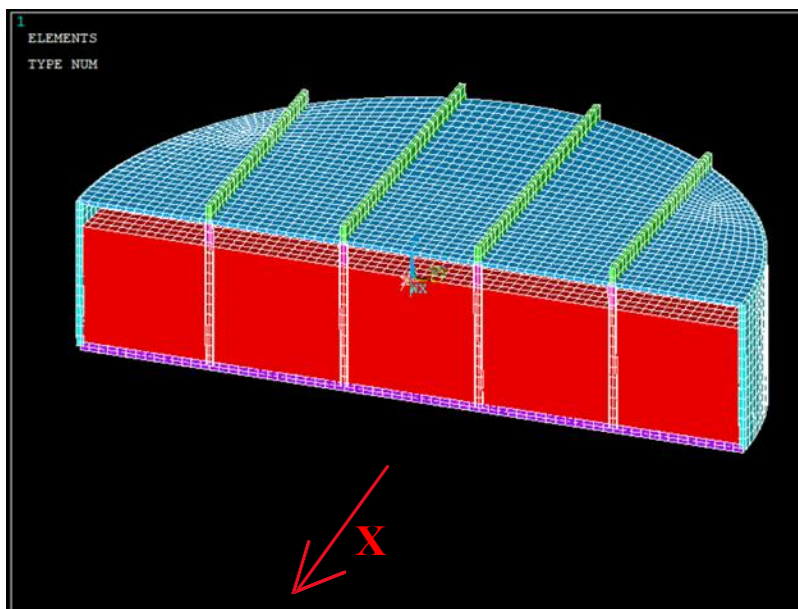


Figura N° 4-7: Vista en corte modelo estanque B

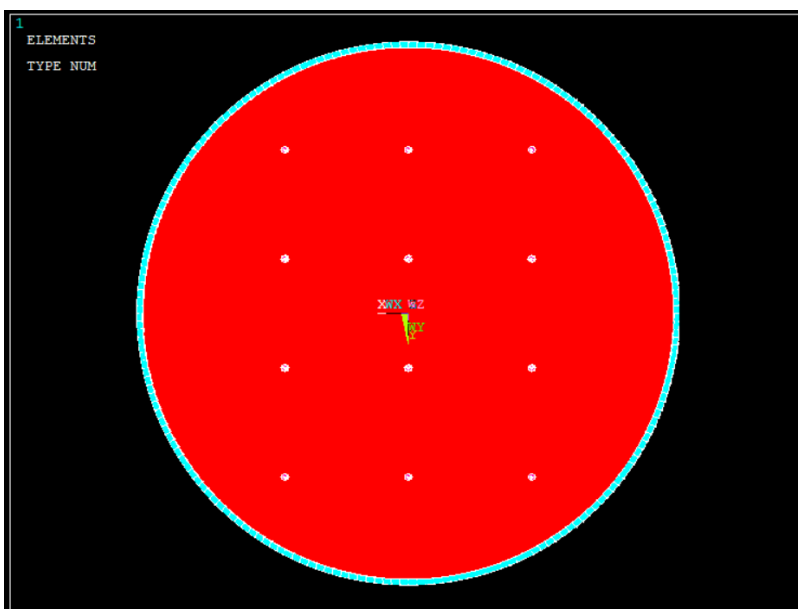


Figura N° 4-8: Vista en planta pilares modelo estanque B

5. Resultados del análisis

5.1. Análisis modal

En el análisis modal realizado en el software, se definen el método de extracción de modos, el número de modos a calcular y el rango de frecuencias en el que se espera localizar dichos modos. Este procedimiento permite diferenciar los modos convectivos e impulsivos, buscando los modos impulsivos en frecuencias más altas y los convectivos en frecuencias más bajas.

Debido al acoplamiento entre los nodos en la interfaz fluido-estructura, la ecuación de movimiento resulta en matrices asimétricas. Por esta razón, se emplea el método de extracción de modos denominado "UNSYM", el cual está diseñado específicamente para abordar problemas que involucran matrices asimétricas en análisis acústicos con acoplamiento fluido-estructura (ANSYS Inc., 2024).

5.1.1. Modos convectivos

El modo convectivo se analizó buscando modos en un rango de frecuencia de $[0.1 - 2]$ [hz] y extrayendo 200 modos. Debido a la geometría del estanque, la solución modal incluye modos ortogonales con la misma frecuencia fundamental, esto debido a la simetría cilíndrica presente en el modelo. Estos modos pueden ordenarse según su factor de participación o la masa traslacional efectiva asociada a cada uno.

En la Tabla 5-1 se presentan los periodos y las masas modales efectivas de los primeros cuatro modos convectivos.

Tabla 5-1: Periodos modos convectivos

Modo convectivo [s]	Estanque A		Estanque B	
	T [s]	Masa efectiva [ton]	T [s]	Masa efectiva [ton]
1	3.857	260.8	6.596	1352
2	2.126	9.2	3.054	67.7
3	1.675	2.2	2.371	17.1
4	1.426	0.9	2.017	6.7

Las formas modales convectivas se presentan en la Figura N° 5-1. Estas figuras se obtienen graficando el desplazamiento en Z de cada modo a lo largo del diámetro en la superficie libre.

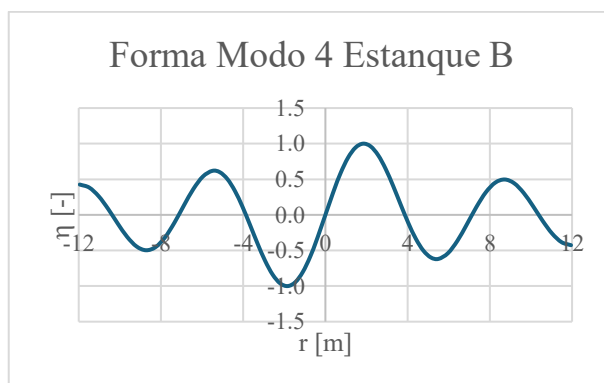
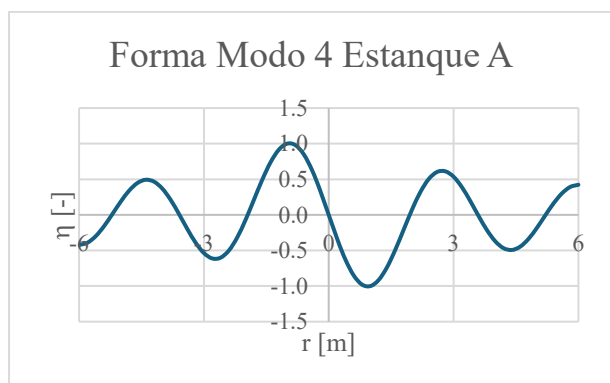
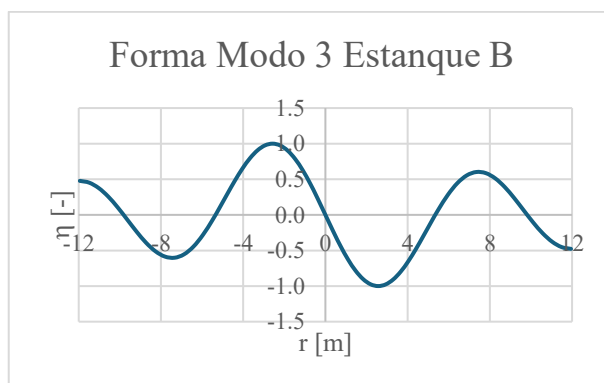
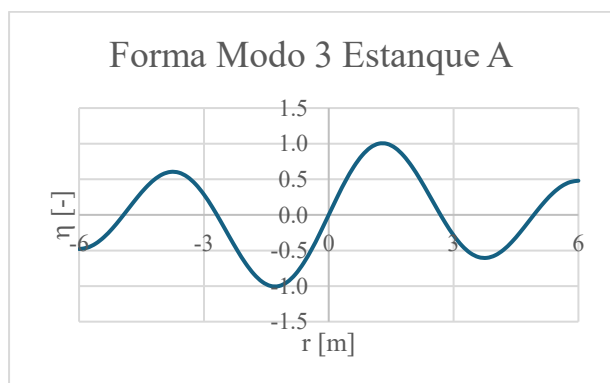
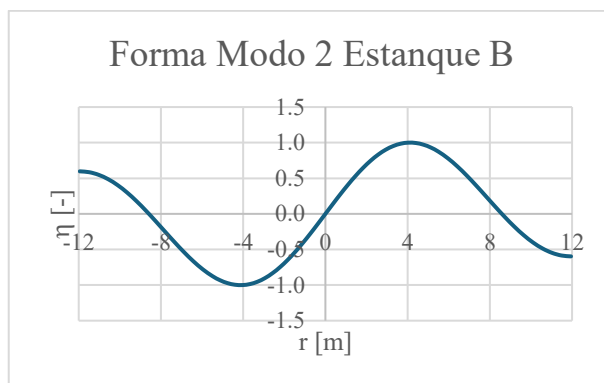
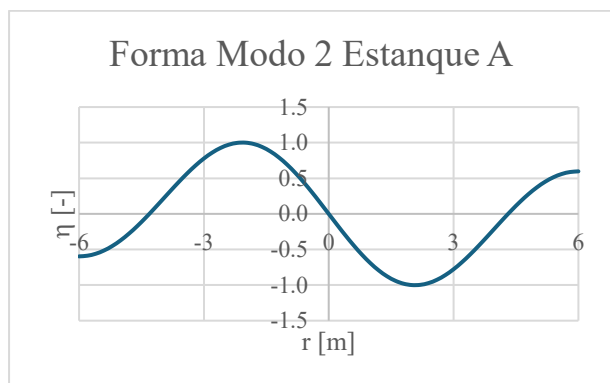
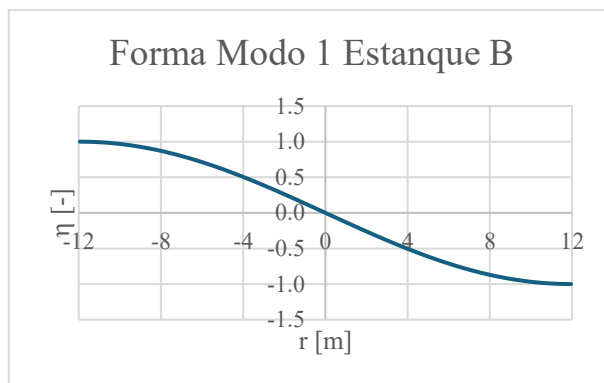
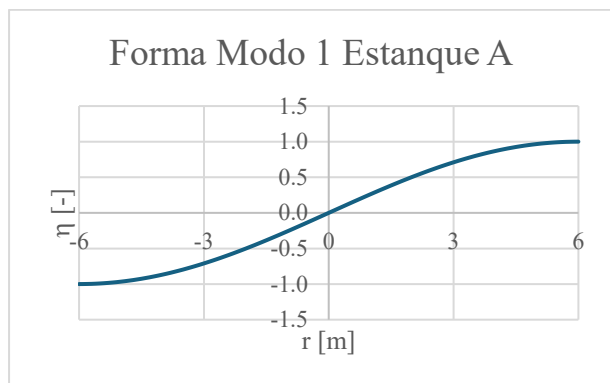


Figura N° 5-1: Formas modales convectivas

5.1.2. Modos impulsivos

El modo impulsivo se analizó buscando modos en un rango de frecuencia de $[10 - 100]$ [hz] y buscando 100 modos. Al igual que los modos convectivos, se obtienen modos ortogonales con aproximadamente la misma frecuencia (en este caso no son exactamente iguales debido a que la estructura del estanque con las vigas de techo no es completamente simétrica). En el análisis se encontraron 100 modos, de los cuales dos tienen la mayor participación.

En la Tabla 5-2 se presentan los periodos y las masas modales efectivas para los primeros dos modos impulsivos. El valor de la masa efectiva incluye el modo impulsivo del líquido y la estructura del estanque.

Tabla 5-2: Periodos modos impulsivos

Modo impulsivo [s]	Estanque A		Estanque B	
	T [s]	Masa efectiva [ton]	T [s]	Masa efectiva [ton]
1	0.0341	292.9	0.0498	677.5
2	0.0151	4.3	0.0207	1

Las formas modales impulsivas se presentan en la Figura N° 5-2. Estas figuras se obtienen graficando la deformación de la estructura aplicando un factor de escala de 5000.

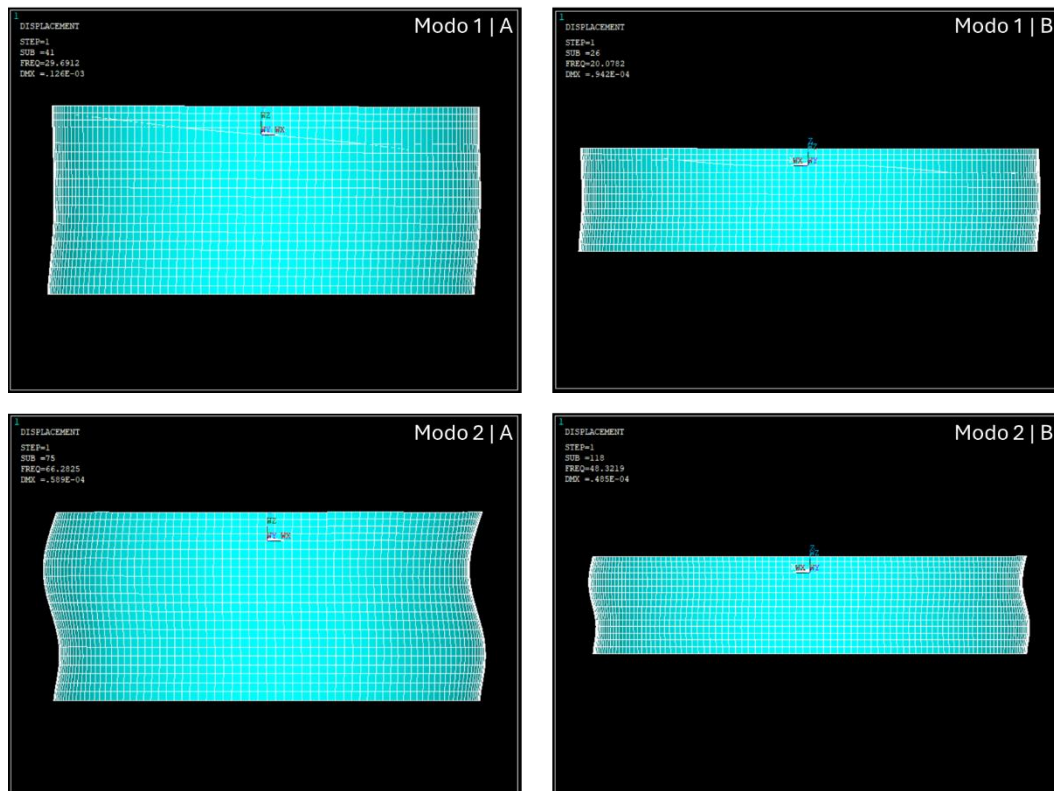


Figura N° 5-2: Formas modales impulsivas

5.1.3. Pesos equivalentes

La masa modal efectiva, considerando todos los modos, puede ser obtenida a partir del comando *GET, o extrayendo los datos del archivo de salida del análisis. Se debe considerar que en el peso impulsivo W_i está incluido el aporte del modo impulsivo del líquido y el de la estructura del estanque,

En la Tabla 5-3 se presenta la masa modal equivalente total, considerando todos los modos calculados en el software.

Tabla 5-3: Pesos equivalentes ANSYS

Parámetro	Estanque A	Estanque B
W_i [tonf]	351	747
W_c [tonf]	274	1451

5.2. Análisis espectral

Para el análisis espectral se aplicará los espectros de diseño de las dos versiones de la norma NCh 2369 presentados anteriormente, aplicándolos en una dirección horizontal. La combinación modal se realiza utilizando el método SRSS, método usado en el procedimiento de diseño de ACI 350.3 (2020) y el especificado en la sección 11.2.2.3 NCh 2369 (2023).

Los resultados presentado para cada componente corresponden a la superposición modal de todos los modos asociados a cada tipo de respuesta. Finalmente, se aplica la combinación SRSS entre componentes para obtener la respuesta total, según la siguiente expresión:

$$R_{total} = \sqrt{(R_{Impulsiva} + R_{estructura})^2 + (R_{Convectiva})^2} \quad (5-1)$$

5.2.1. Corte basal

Las fuerzas nodales resultantes del análisis modal-espectral permiten calcular el corte basal de la estructura, sumando las fuerzas de reacción de los nodos de la base. Se realiza por separado los análisis del modo convectivo e impulsivo, combinando los modos obtenidos para cada uno. Luego, se obtiene el corte basal de cada componente seleccionando cada elemento y sumando las fuerzas nodales.

En la Tabla 5-4 se muestra el corte mínimo y el factor de corrección que se debe aplicar a los resultados del análisis modal-espectral. Estos factores se aplican considerando cada modo por separado. Todos los resultados que se presentan a partir de este punto ya incluyen el factor correspondiente.

Tabla 5-4: Corte mínimo NCh 2369 (2023)

Componente	Estanque A Impulsivo	Estanque A Convectivo	Estanque B Impulsivo	Estanque B Convectivo
Corte mínimo	139	33	302	70
Corte análisis	67	40	168	100
Factor de corrección	2.08	NA	1.8	NA

Los resultados son presentados en la Tabla 5-5, donde se muestran los valores obtenidos para el corte basal, considerando todos los modos calculados, donde el modo impulsivo y convectivo expuestos corresponden a la respuesta del líquido.

Tabla 5-5: Fuerzas impulsivas y convectivas resultantes ANSYS

Componente	Estanque A NCh 2369 (2003)	Estanque A NCh 2369 (2023)	Estanque B NCh 2369 (2003)	Estanque B NCh 2369 (2023)
Modo impulsivo [tonf]	75.9	84.3	163.9	173.8
Techo estanque [tonf]	18.4	20.4	58.3	61.7
Estanque (efectivo) [tonf]	31.3	34.7	63.0	66.8
Modo convectivo [tonf]	36.4	40.0	94.9	99.8
Total SRSS	130.7	145.1	300.5	318.3

5.2.2. Momento volcante

De igual manera que para el corte basal, se obtiene el momento volcante para cada componente, considerando todos los modos calculados. Es importante señalar que el momento calculado para los modos convectivo e impulsivo del líquido corresponde al caso IBP definido en ACI 350.3-20 (ACI, 2021), el cual corresponde al caso en el que se consideran las presiones en la base.

En la Tabla 5-6 se resumen los momentos volcante generados por las fuerzas dinámicas. Estos momentos se calculan son sumados respecto a la base del estanque.

Tabla 5-6: Momento volcante ANSYS

Parámetro	Estanque A NCh 2369 (2003)	Estanque A NCh 2369 (2023)	Estanque B NCh 2369 (2003)	Estanque B NCh 2369 (2023)
Modo impulsivo [tonf-m]	324.2	360.1	1421.7	1507.3
Techo estanque [tonf-m]	102.4	113.7	282.4	298.6
Estanque (efectivo) [tonf-m]	122.7	136.2	238.9	253.3
Modo convectivo [tonf-m]	163.6	179.6	1050.7	1103.9
Total SRSS	573.2	635.9	2208.8	2336.4

5.2.3. Alturas equivalentes

Las alturas equivalentes se obtienen partir de los valores de momento volcante y corte basal, se presentan los resultados para el modo impulsivo y convectivo del líquido. Estas corresponden a la altura equivalente incluyendo presiones sobre la base del estanque.

Tabla 5-7: Pesos equivalentes ANSYS

Parámetro	Estanque A	Estanque B
h_i [m]	4.3	8.7
h_c [m]	4.5	11.1

5.2.4. Altura de ola convectiva

La forma de la superficie libre, presentada en la Figura N° 5-3, se obtiene al graficar los valores de los desplazamientos nodales en el eje z. Los valores máximos obtenidos para cada estanque se presentan en la Tabla 5-8. Estos resultados corresponden a la combinación modal de todos los modos convectivos calculados para cada estanque.

En las Figura N° 5-4 se muestra la variación de la ola convectiva a lo largo del diámetro. Debido a la pérdida de signo ocasionada por la combinación modal, los datos han sido ajustados para representar valores tanto positivos como negativos.

Tabla 5-8: Altura de ola convectiva

Estanque	Espectro NCh 2369 (2003)	Espectro NCh 2369 (2023)
A [cm]	68.9	76.2
B [cm]	67.4	71.3

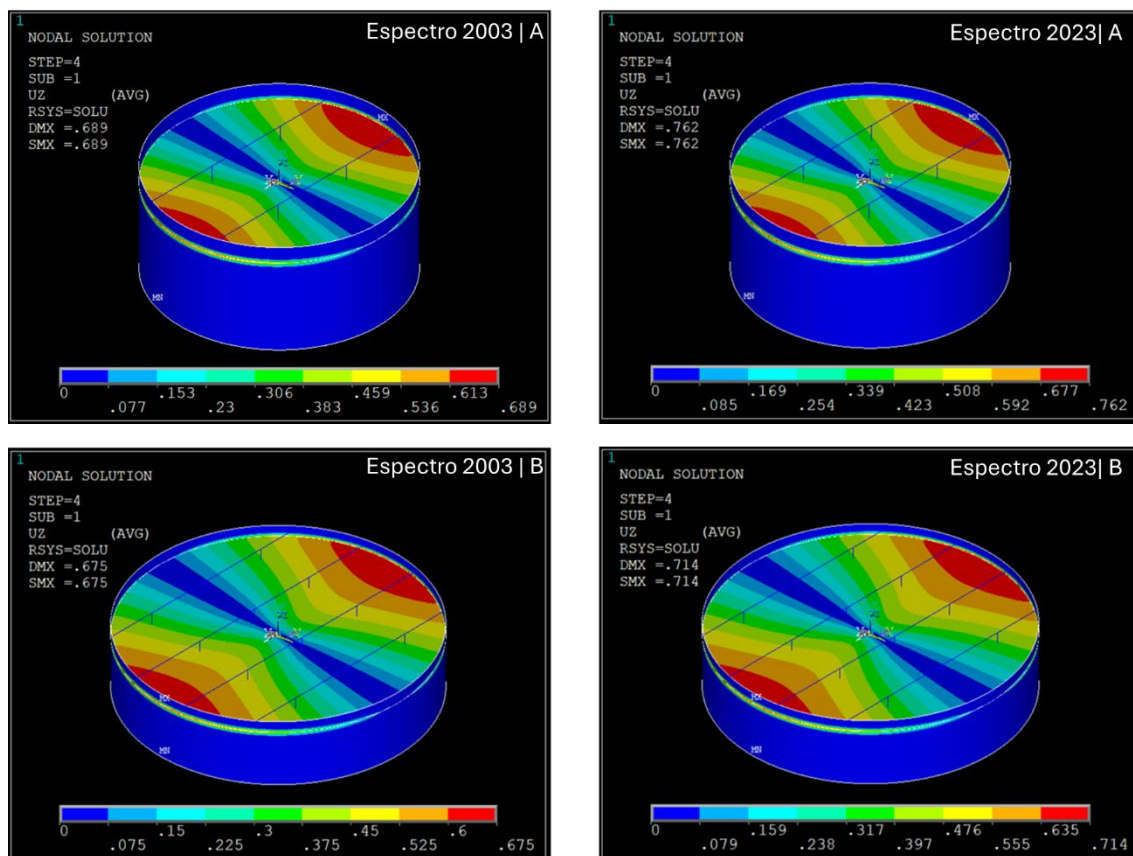


Figura N° 5-3: Desplazamientos de la superficie libre

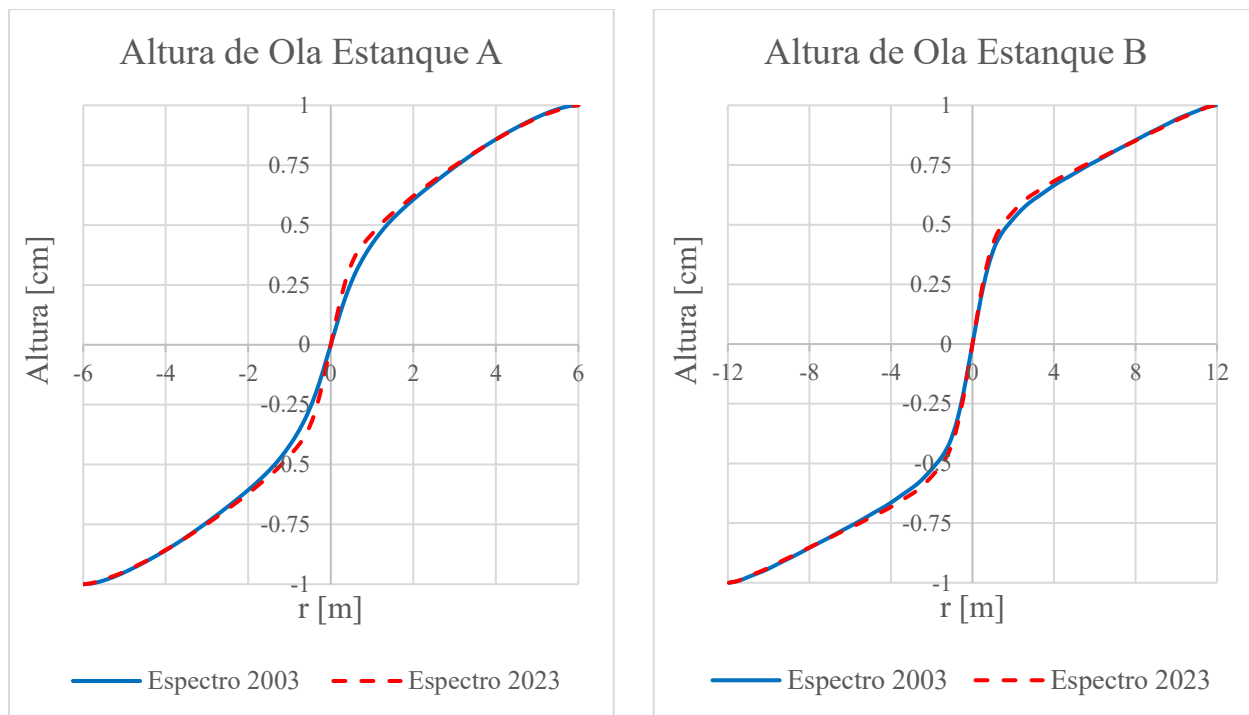


Figura N° 5-4: Curva de ola convectiva-Estanques A y B

5.2.5. Presiones hidrodinámicas

La distribución de las presiones hidrodinámicas se obtiene a partir de los resultados nodales entregados por el software. Es posible graficar los valores mediante el comando PLNSOL, o bien exportarlos seleccionando los nodos de interés y utilizando el comando PRNSOL.

La distribución espacial de las presiones sobre el contorno del estanque, correspondientes a los modos impulsivo y convectivo, pueden apreciarse en las Figura N° 5-5 y Figura N° 5-6 para ambos estanques. Estos valores corresponden a la combinación modal de los modos convectivo e impulsivo por separado, sin el factor de corrección aplicado y su magnitud se encuentra en N/m^2 .

En la Figura N° 5-7 se muestra la distribución de presión a lo largo de la altura del estanque, correspondiente a el punto de máxima presión, el cual se ubica en los nodos alineados con el eje X (ángulo azimutal cero en el sistema de coordenadas cilíndricas).

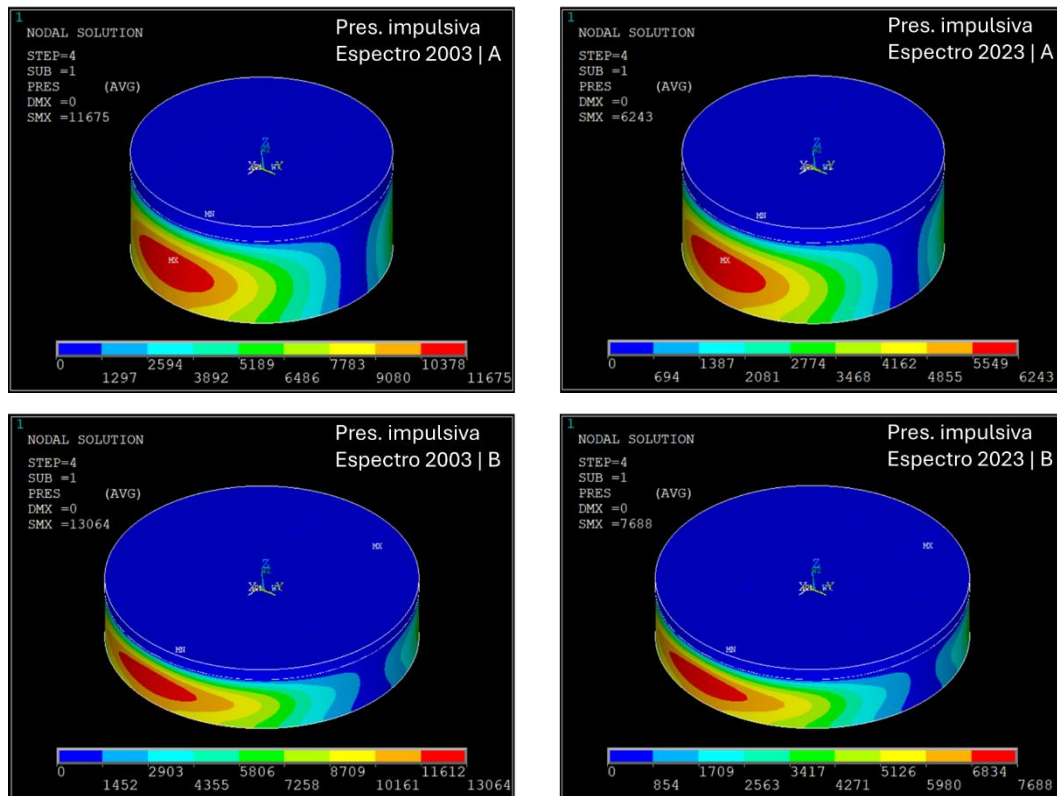


Figura N° 5-5: Presiones modo impulsivo en modelos de elementos finitos

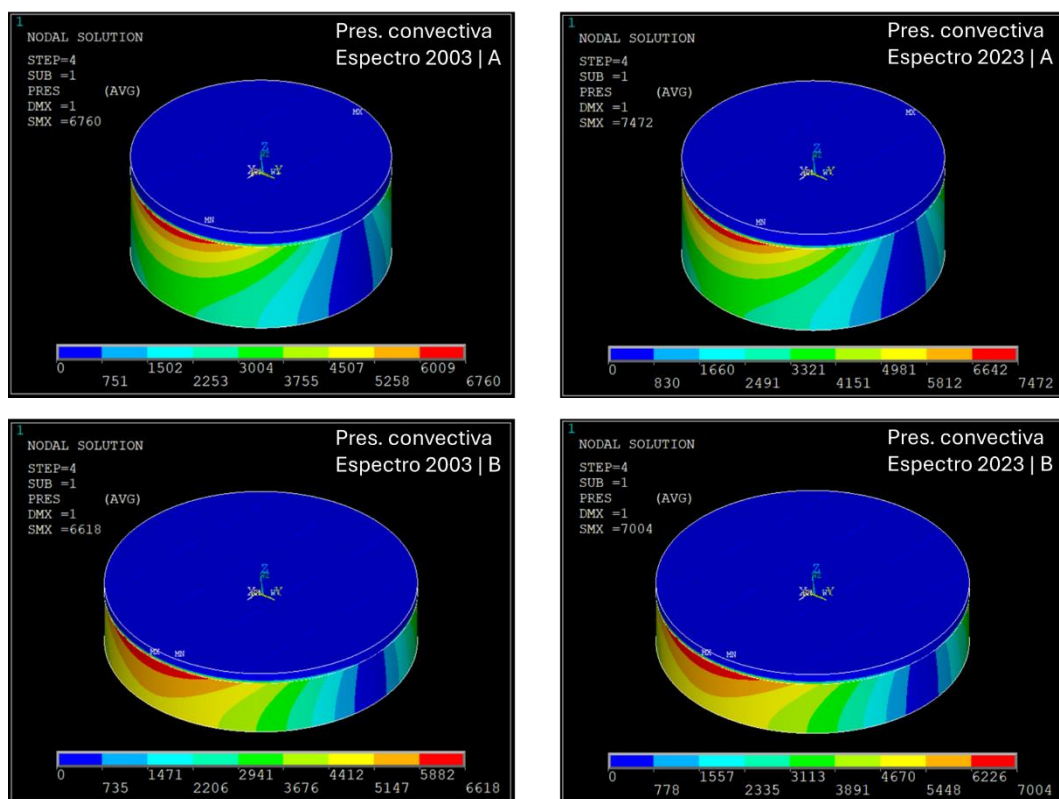


Figura N° 5-6: Presiones modo convectivo en modelos de elementos finitos

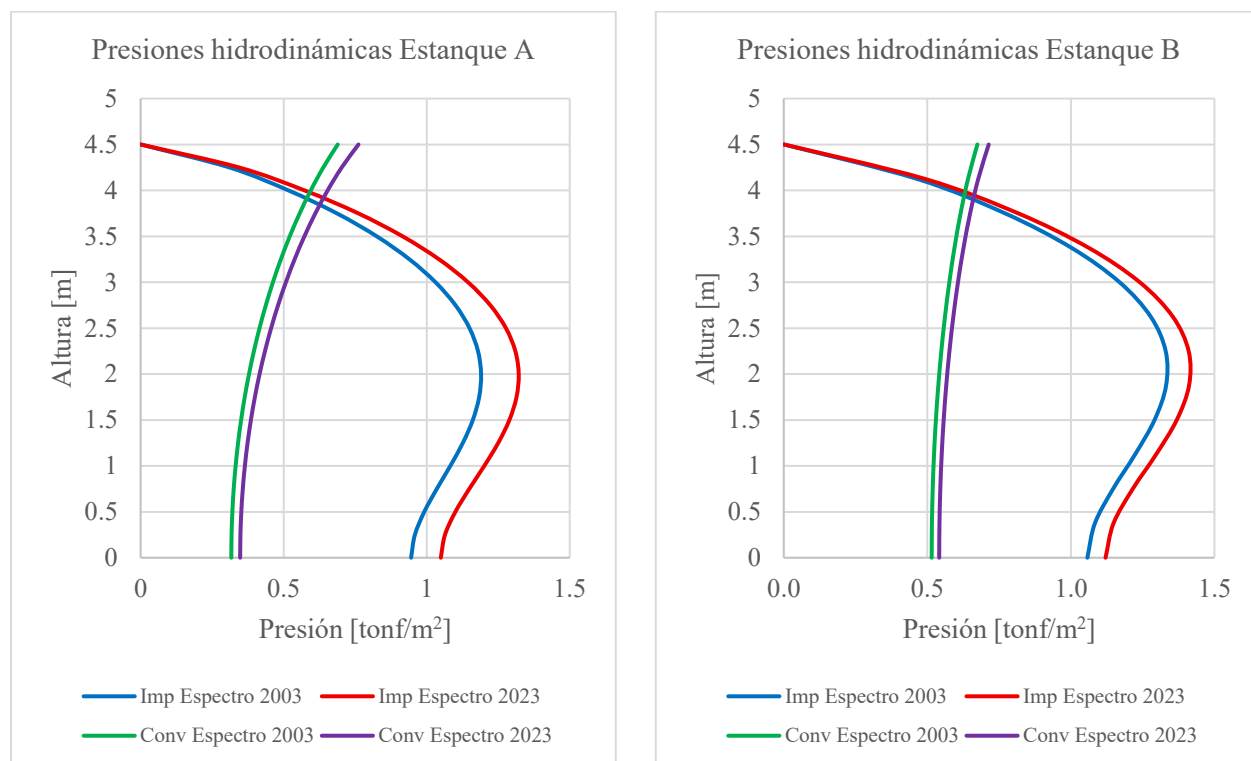


Figura N° 5-7: Distribución de presiones hidrodinámicas - Estanques A y B

5.2.6. Fuerzas internas

La Tabla 5-9 presenta los valores máximos de las fuerzas internas obtenidas para ambos estanques, considerando los espectros definidos por la norma NCh 2369 en sus versiones 2003 y 2023. Se incluye la fuerza axial en dirección anular, las fuerzas de corte en dirección radial y tangencial y los momentos flectores M_{11} y M_{22} , que corresponden a los momentos respecto a los ejes z (vertical) y θ (angular), respectivamente, según el sistema de coordenadas cilíndrico del modelo.

Todos los resultados provienen del análisis sísmico con combinación modal, aplicado para cada espectro. Se superponen estos resultados a los casos de carga peso propio y presión hidrostática. Para obtener las fuerzas internas, se seleccionan los nodos de interés y luego se extraen los valores mediante el comando ETABLE.

Las Figuras N° 5-8 a Figura N° 5-12 muestran la distribución general de las fuerzas en el modelo. Las Figuras N° 5-13 a Figura N° 5-17 detallan la variación vertical y perimetral, cada uno en la sección donde se alcanza el valor máximo de la fuerza.

En cuanto a los resultados:

- Fuerza axial anular (Figura N° 5-8 y Figura N° 5-13): presenta una distribución simétrica respecto al diámetro, el máximo se alcanza a una altura media ($z=2$ [m] para estanque A y $z=2.25$ [m] para estanque B).
- Corte radial (Figura N° 5-9 y Figura N° 5-14): varía con la altura y presenta una variación perimetral similar a la fuerza anular. El máximo se ubica en la base.
- Corte tangencial (Figura N° 5-10 y Figura N° 5-15): el valor máximo se encuentra en un punto de la base del muro orientado a 90° (Estanque A) y 60° (Estanque B) respecto a la ubicación del sismo.
- Momentos flectores (Figura N° 5-11, Figura N° 5-12, Figura N° 5-16 y Figura N° 5-17): varían tanto en la altura como en el perímetro, alcanzan el máximo a distintas alturas ($z=1.25$ [m] para estanque A y $z=1.9$ [m] para estanque B).

Tabla 5-9: Fuerzas internas máximas

Parámetro	Estanque A NCh 2369 (2003)	Estanque A NCh 2369 (2023)	Estanque B NCh 2369 (2003)	Estanque B NCh 2369 (2023)
F axial [tonf/m]	23.1	24.1	38.2	39.2
V radial [tonf/m]	4.1	4.3	5.8	5.9
V tangencial [tonf/m]	5.5	6.1	6.2	6.6
M_{11} [tonf-m/m]	0.13	0.13	0.29	0.3
M_{22} [tonf-m/m]	0.58	0.60	1.26	1.29

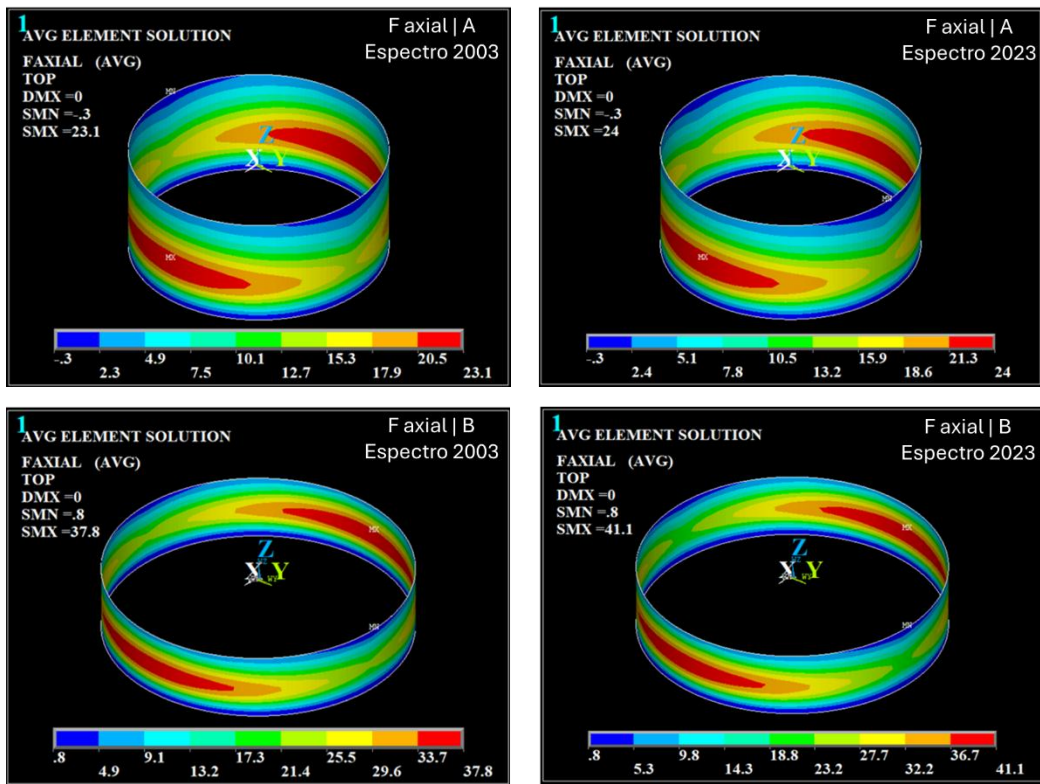


Figura N° 5-8: Tensión anular [tonf/m]

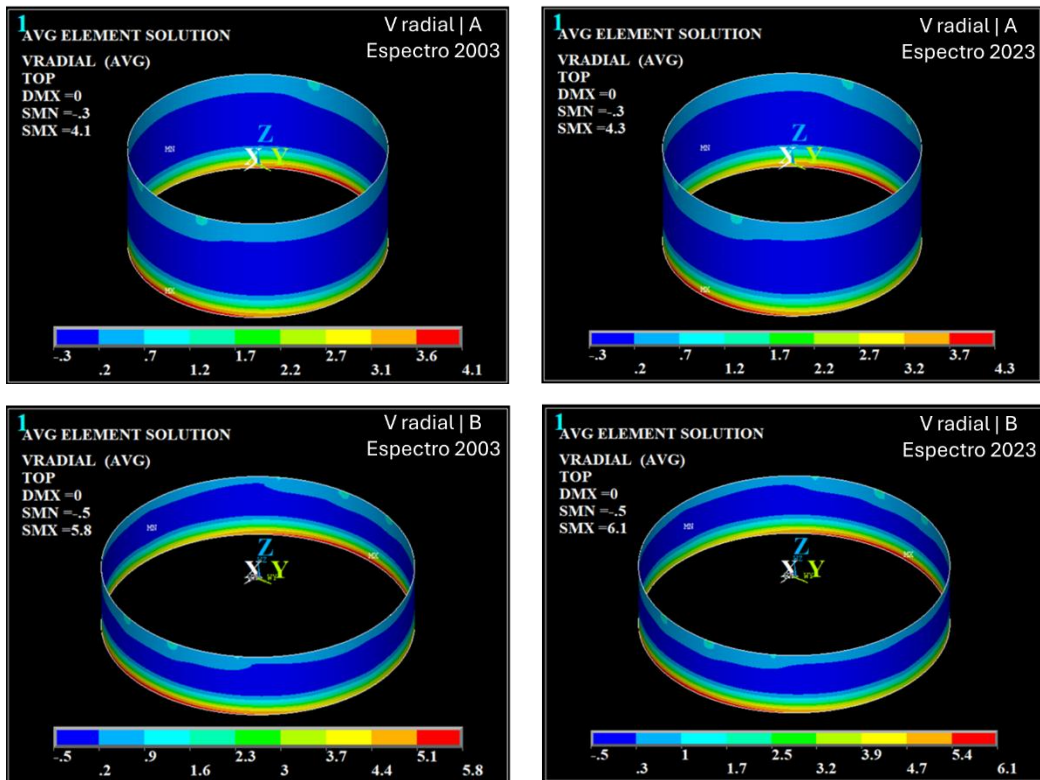


Figura N° 5-9: Corte radial [tonf/m]

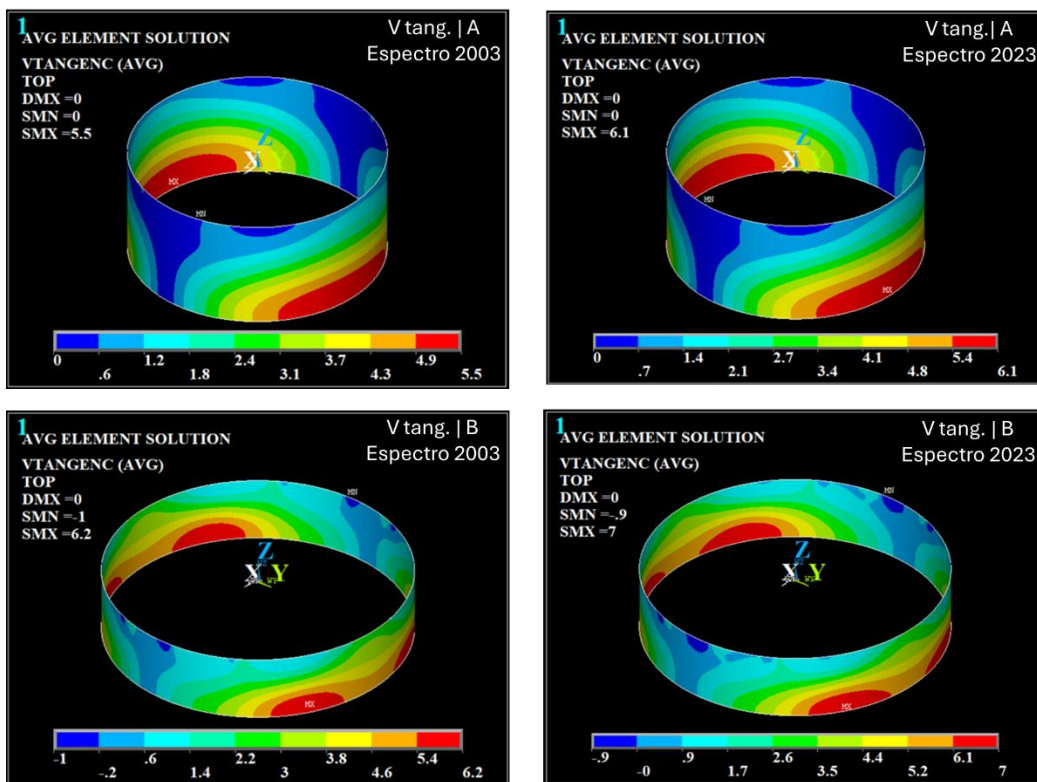


Figura N° 5-10: Corte tangencial [tonf/m]

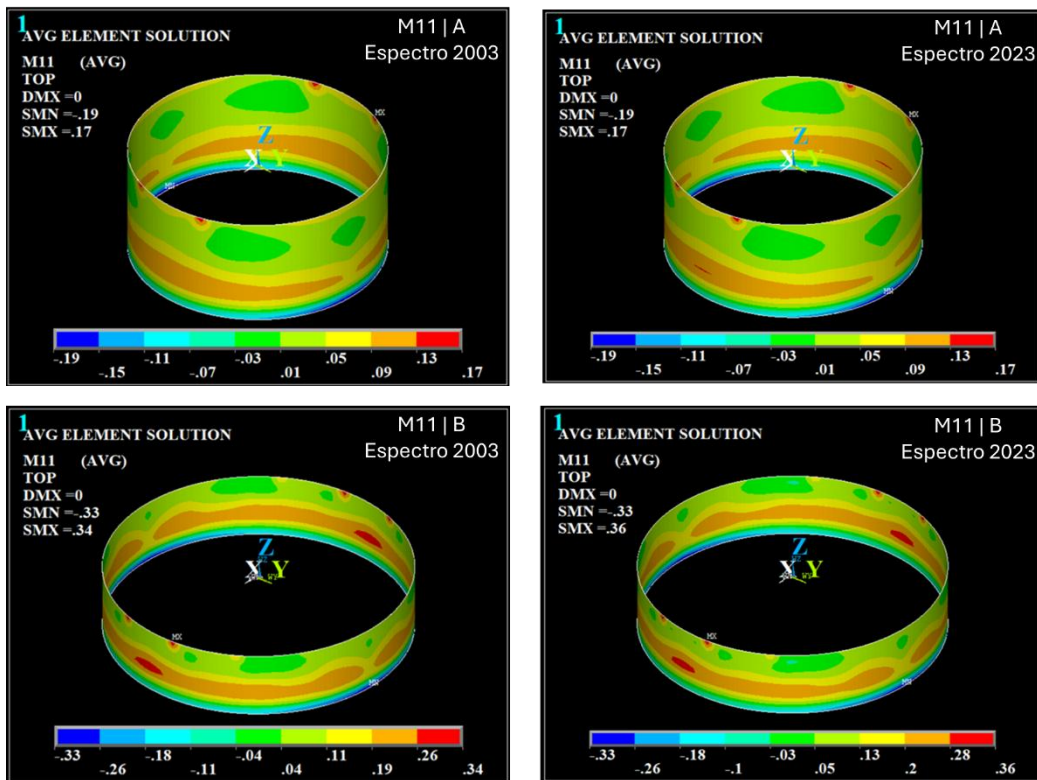


Figura N° 5-11: Momento flector M11 [tonf-m/m]

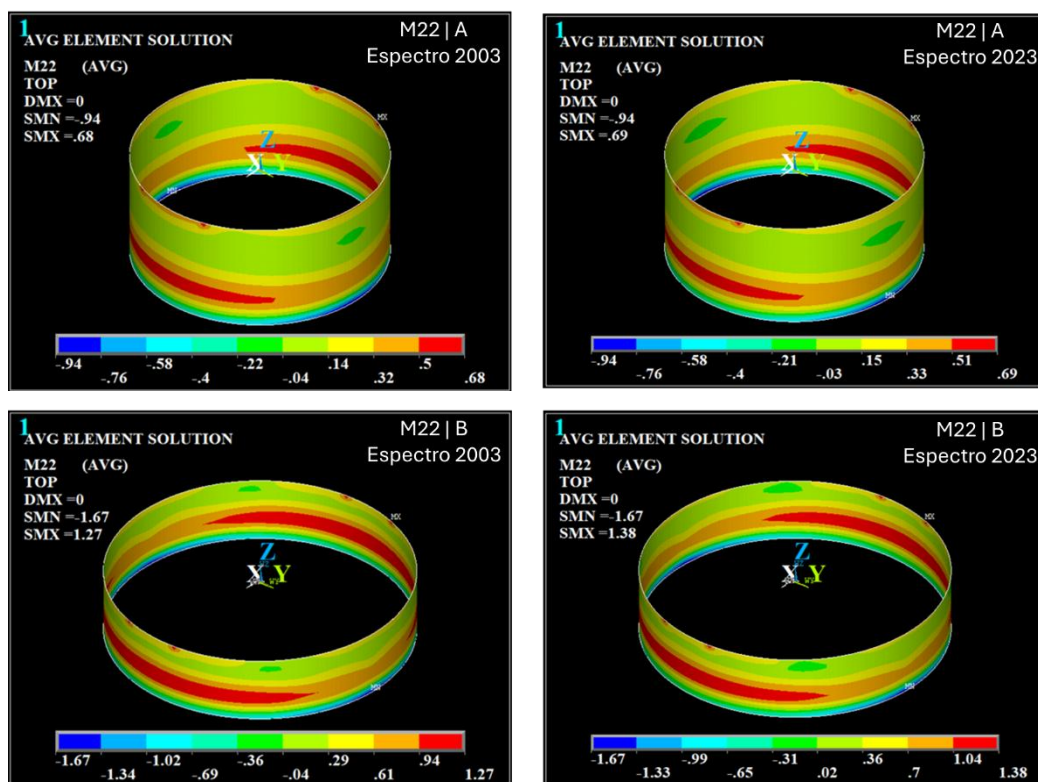


Figura N° 5-12: Momento flector M_{22} [tonf-m/m]

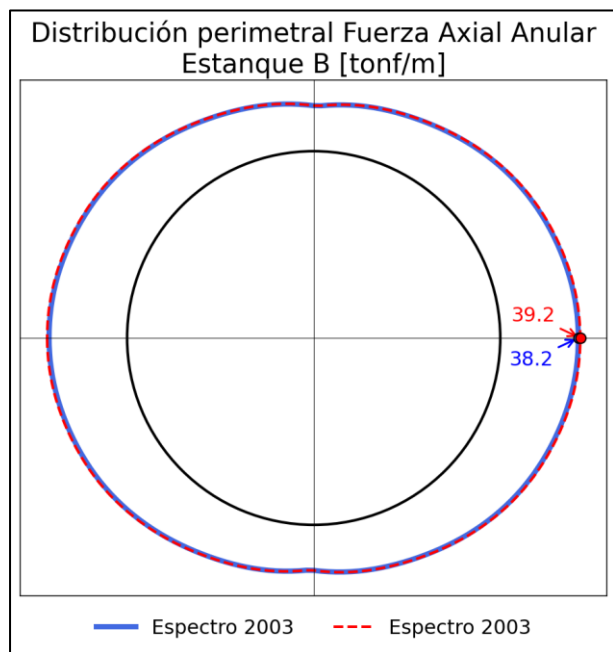
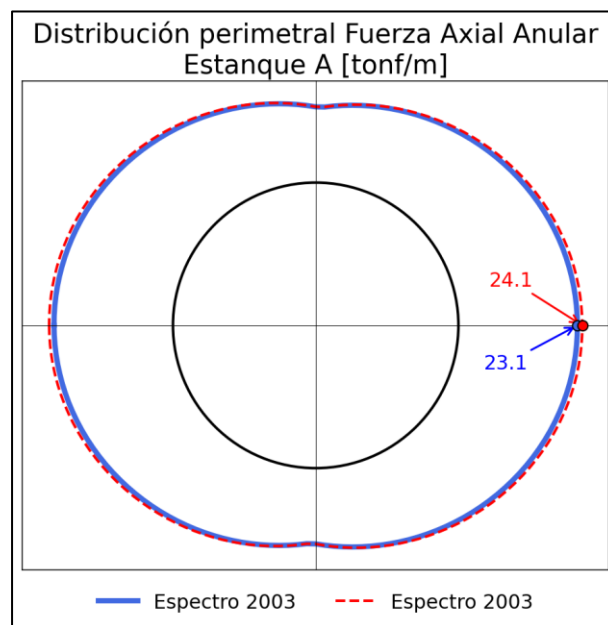
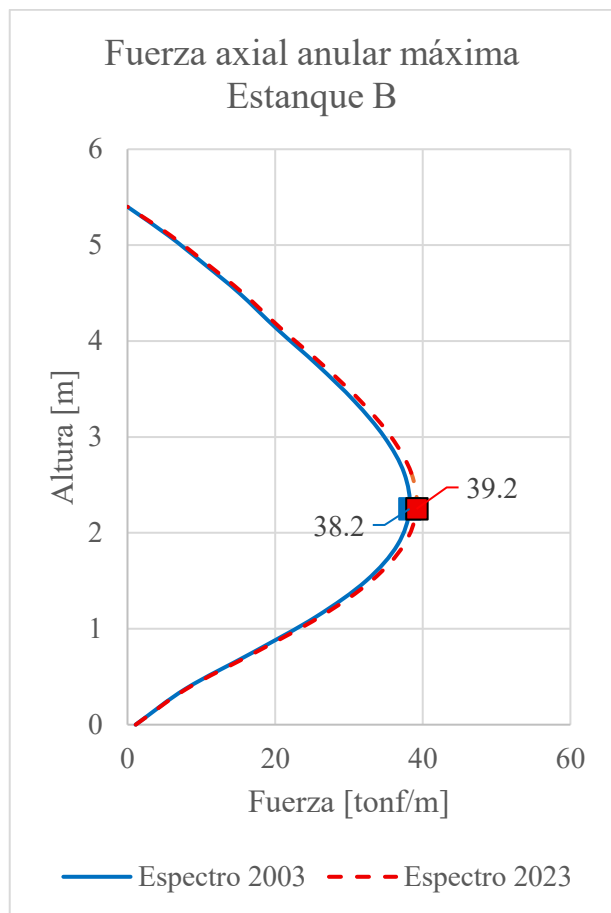
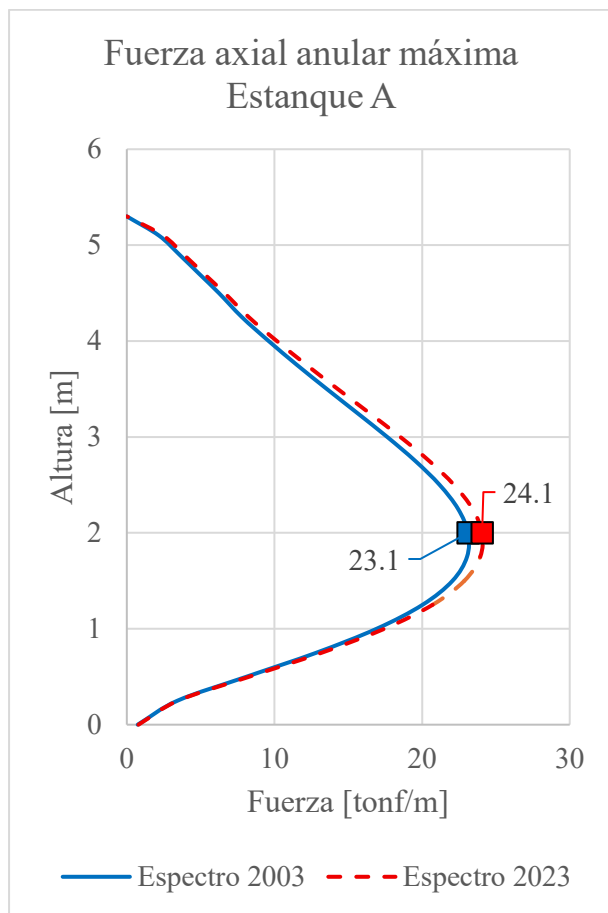


Figura N° 5-13: Distribución vertical y perimetral de la fuerza axial anular máxima

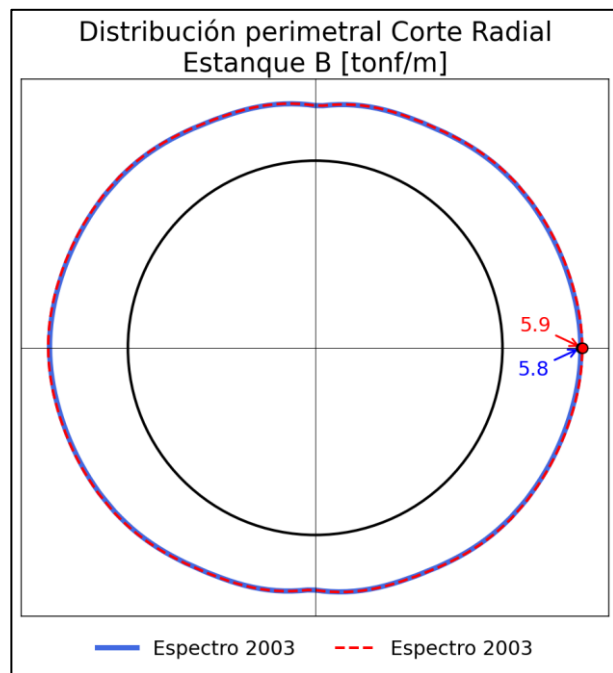
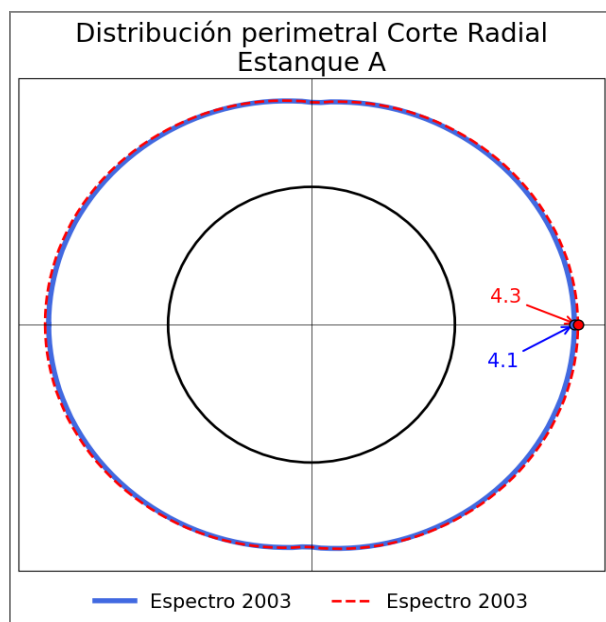
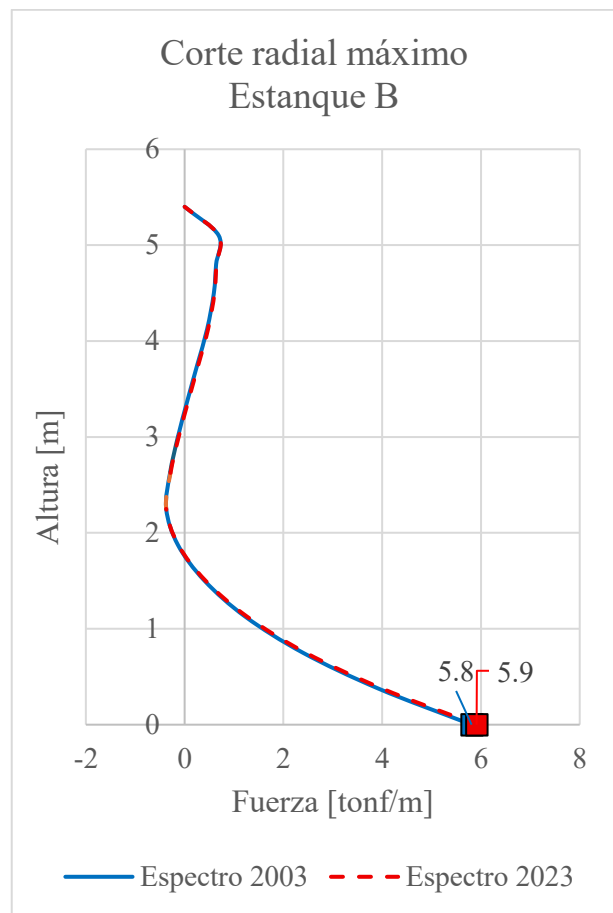
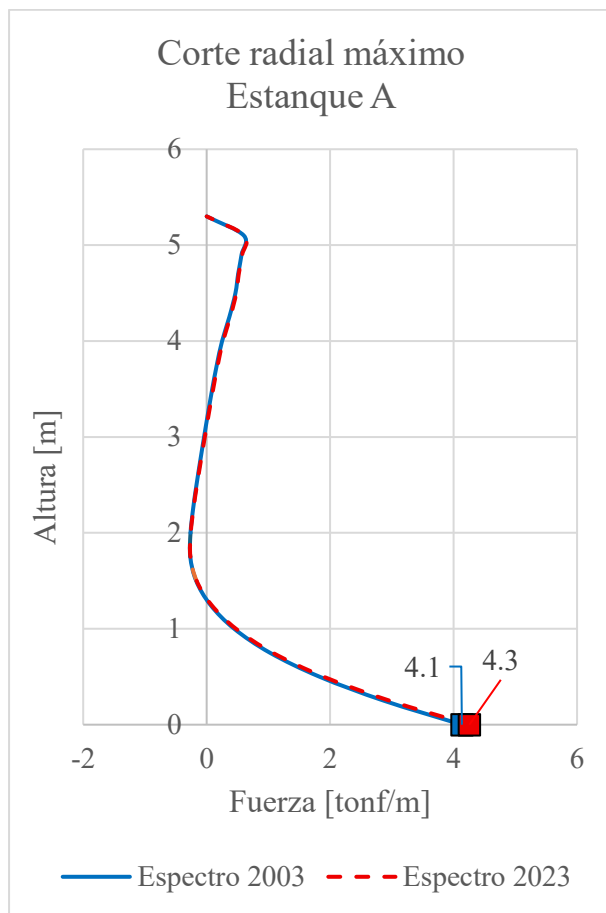


Figura N° 5-14: Distribución vertical y perimetral de corte radial en la base

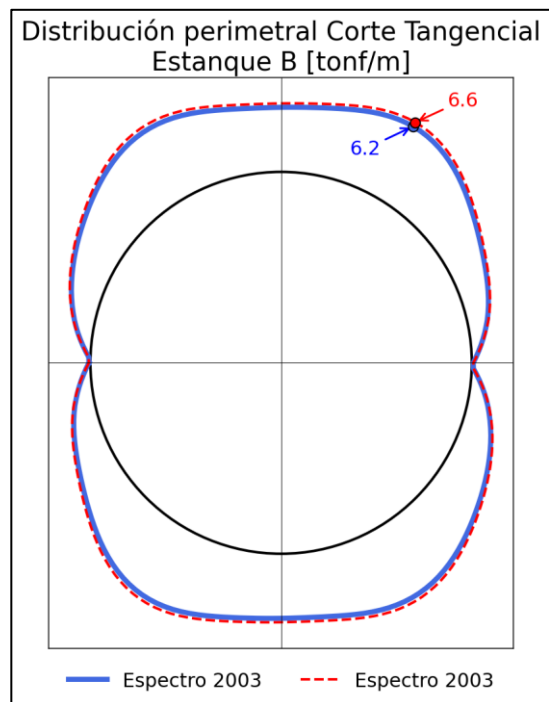
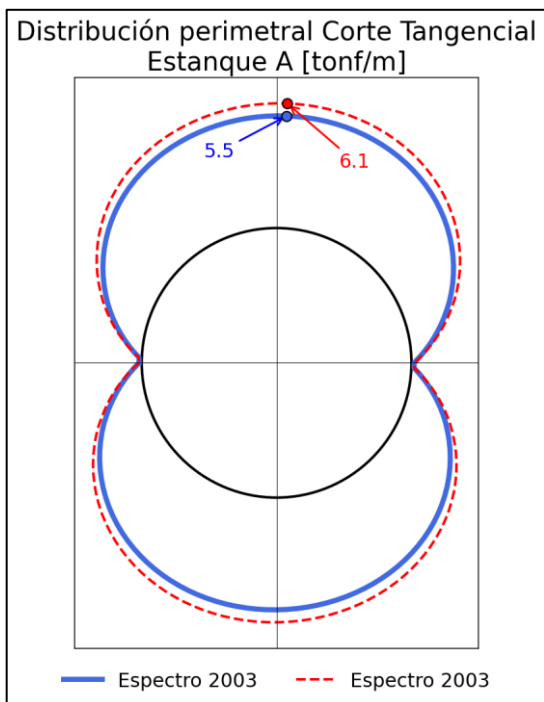
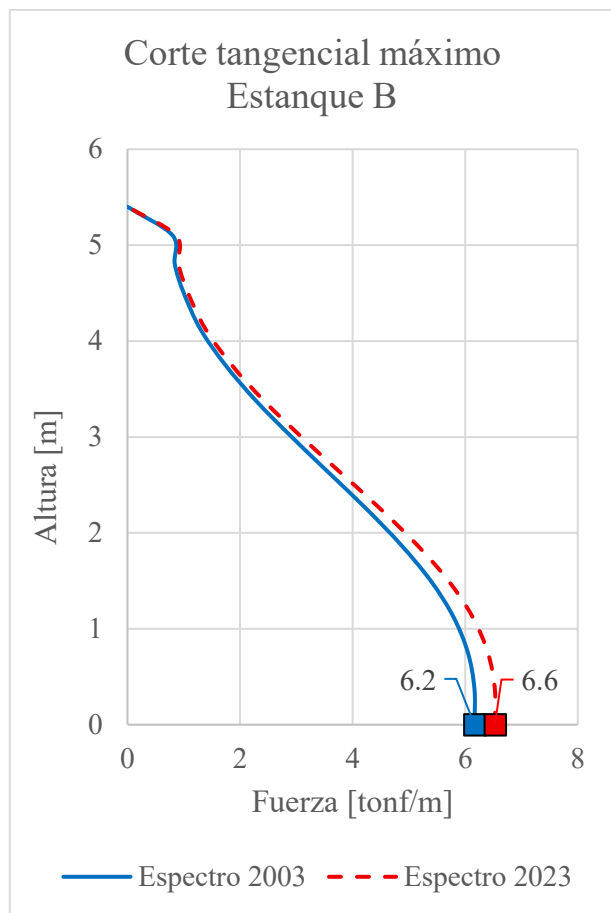
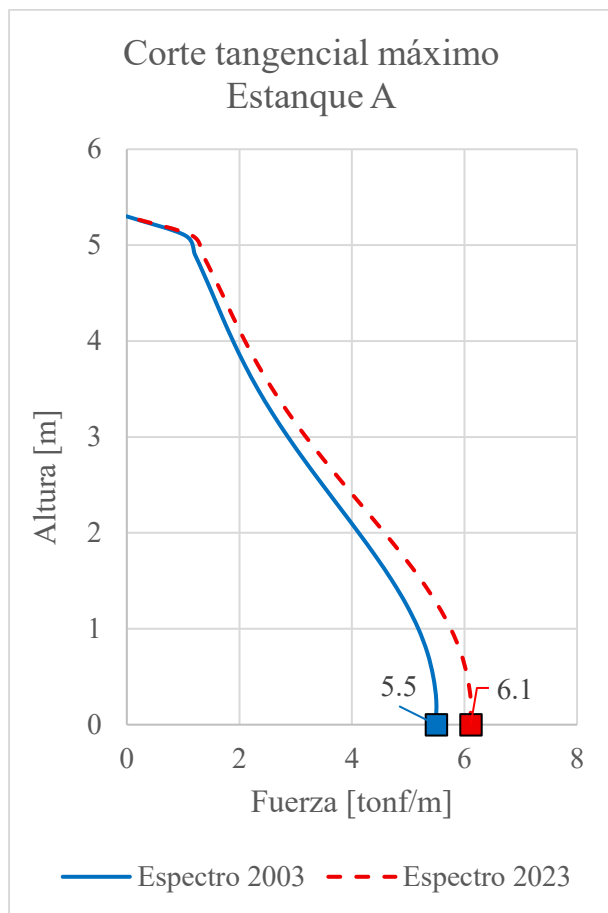


Figura N° 5-15: Distribución vertical y perimetral del corte tangencial en la base

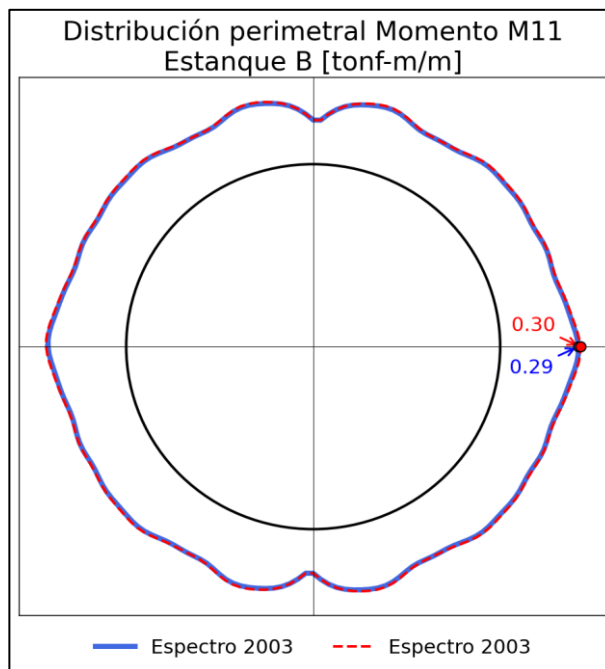
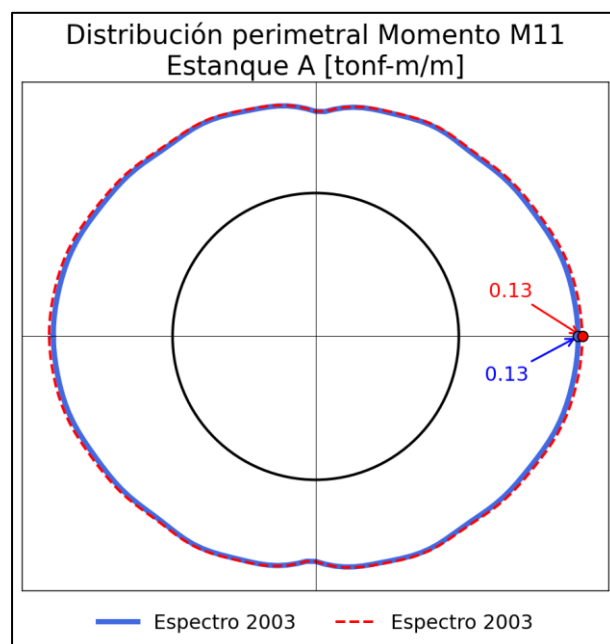
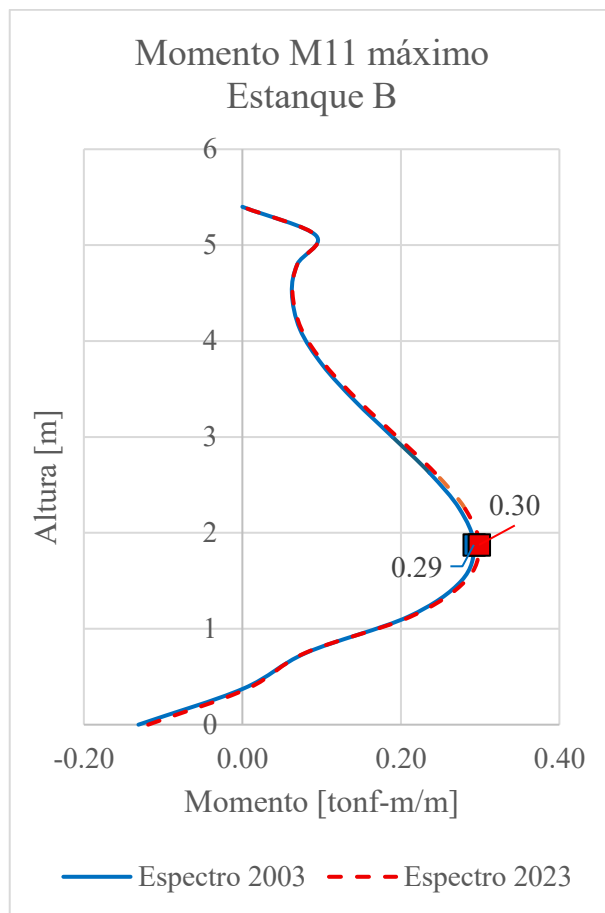
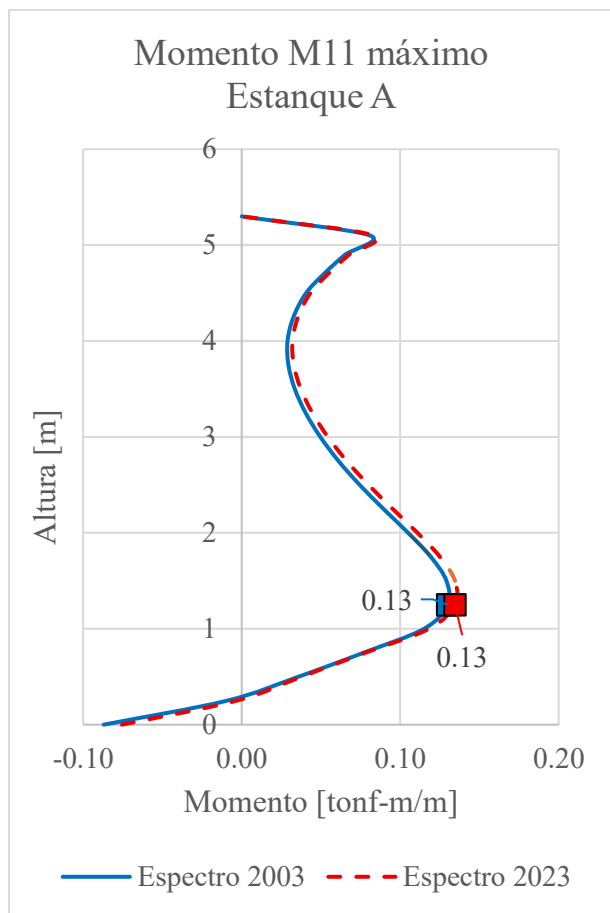


Figura N° 5-16: Distribución vertical y perimetral del momento flector M_{11} máximo

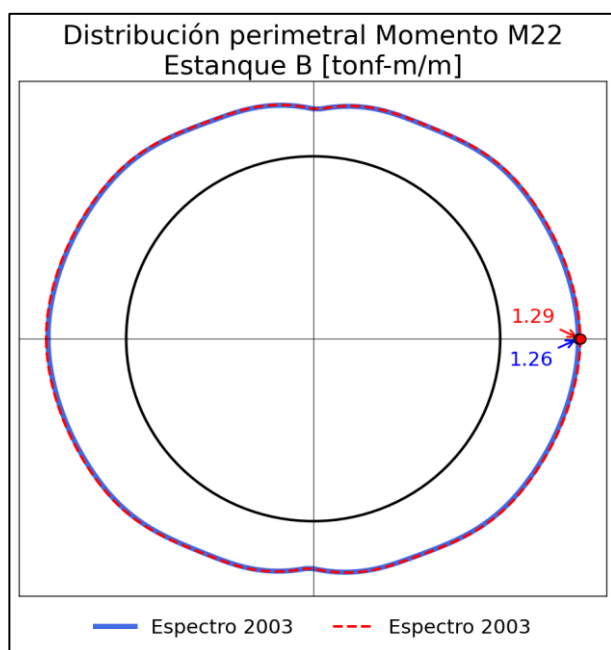
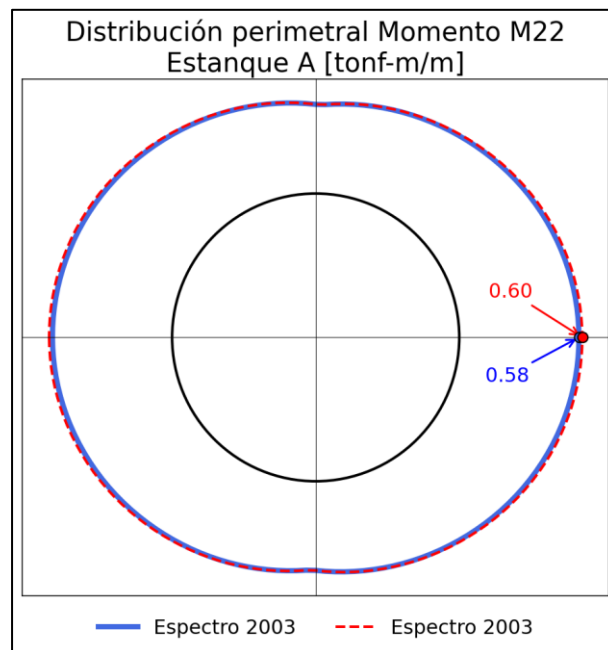
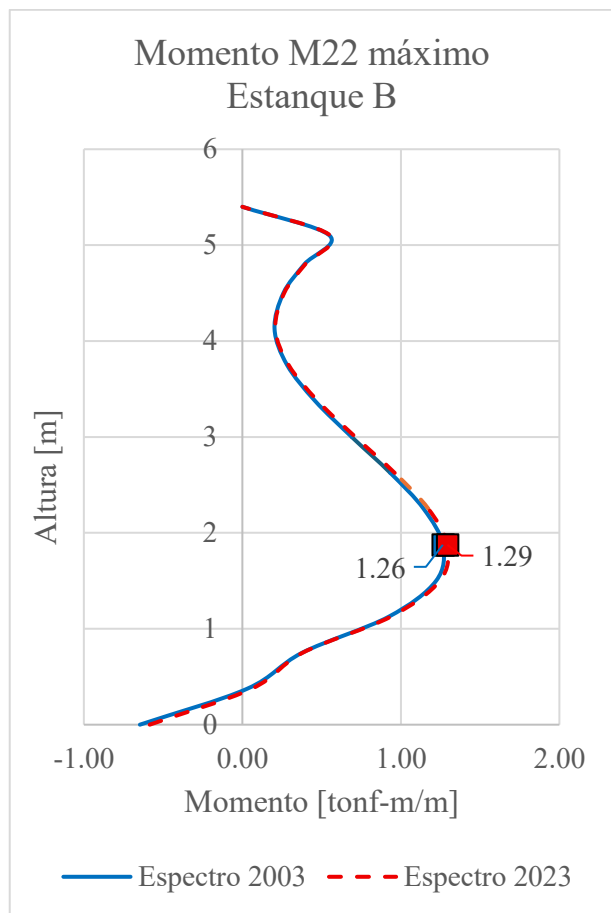
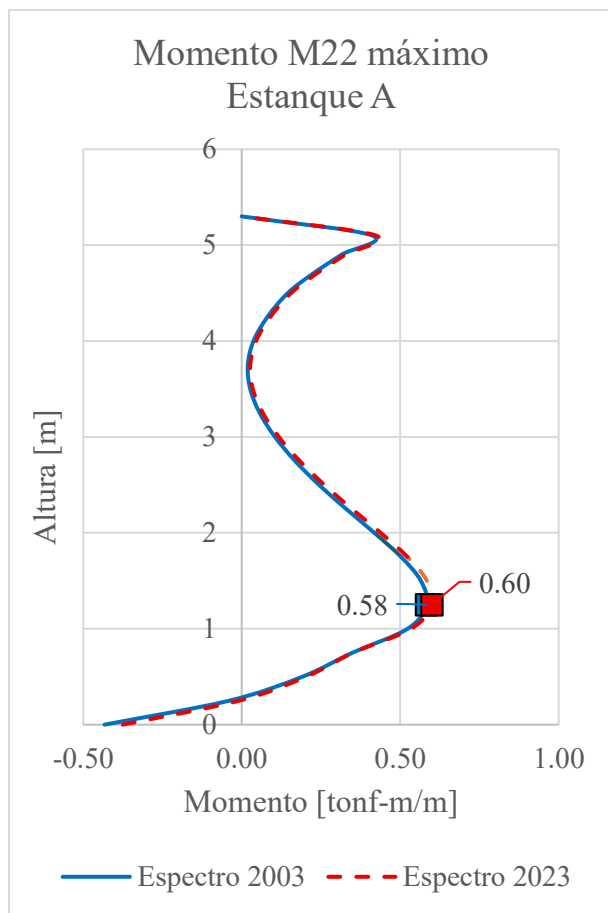


Figura N° 5-17: Distribución vertical y perimetral del momento flector M_{22} máximo

6. Análisis de resultados

6.1. Propiedades estructurales

6.1.1. Pesos modales

La Tabla 6-1 presenta los valores de los pesos modales impulsivo W_i (considerando líquido más estructura) y convectivo W_c , obtenidos mediante el análisis por elementos finitos en ANSYS y los calculados con las expresiones normativas. La comparación, para ambos estanques, refleja una buena concordancia entre ambos enfoques, con diferencias inferiores al 2% en todos los casos.

En la 2 se muestran los pesos modales obtenidos en ANSYS considerando únicamente el primer modo convectivo e impulsivo. Se aprecia que el primer modo impulsivo concentra un 83% del peso total impulsivo del Estanque A y un 91% en el Estanque B. En el caso convectivo, los porcentajes son del 95% y 93% respectivamente.

Lo anterior indica que la mayor parte de la masa modal de la estructura está concentrada en el primer modo de cada tipo. Esto da sustento al modelo analítico propuesto por Housner, el cual representa la respuesta sísmica de la estructura como un sistema simplificado con masas equivalentes.

Tabla 6-1: Comparación pesos modales

Modo	Estanque			
	A		B	
	ANSYS	ACI	ANSYS	ACI
W_i [tonf]	351	353	747	760
W_c [tonf]	274	274	1451	1477

Tabla 6-2: Pesos modales ANSYS primer modo

Modo	Estanque	
	A	B
W_i [tonf]	293	678
W_c [tonf]	261	1352

6.1.2. Periodos fundamentales

Los periodos de los modos convectivos obtenidos mediante el software pueden compararse con la solución analítica descrita por Ibrahim (2005), cuyas frecuencias se obtienen a partir de la Ecuación 2-5. En la Tabla 6-3 se observa que el software logra capturar con una alta precisión los periodos fundamentales, lo que demuestra que el modelo de elementos finitos representa adecuadamente el comportamiento de oleaje del líquido.

Asimismo, es posible comparar estos resultados con los obtenidos a partir de la ecuación propuesta en ACI 350.3 (2020), la cual considera únicamente el primer modo. Se aprecia que el valor estimado por la normativa para este modo es prácticamente exacto, con una diferencia menor al 0.1%, lo que confirma la validez de las simplificaciones adoptadas en el análisis teórico aproximado.

Tabla 6-3: Comparación de periodos modo convectivo

Modo	Estanque					
	A			B		
	ANSYS	Analítico	ACI	ANSYS	Analítico	ACI
1	3.9	3.9	3.9	6.6	6.6	6.6
2	2.1	2.1	-	3.1	3.1	-
3	1.7	1.7	-	2.4	2.4	-
4	1.4	1.4	-	2.0	2.0	-

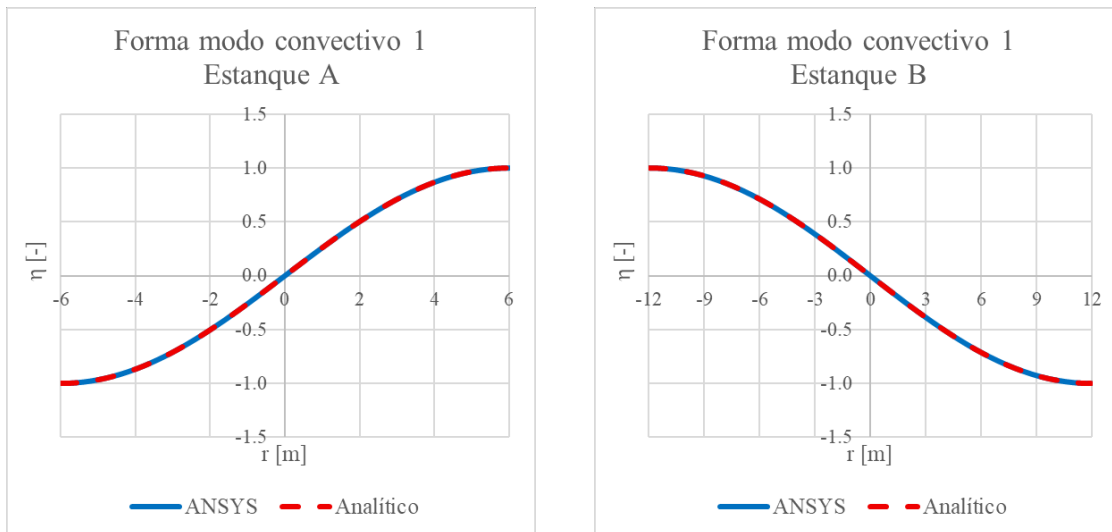
En la Tabla 6-4 se compara el periodo del primer modo impulsivo con el valor estimado por la expresión de ACI 350.3 (2021), la cual considera la losa de techo. Se aprecia una buena aproximación de los valores obtenidos con el ACI.

Tabla 6-4: Comparación de periodos modo impulsivo

Modo	Estanque			
	A		B	
	ANSYS	ACI	ANSYS	ACI
1	0.034	0.030	0.046	0.050

6.1.3. Formas modales

Las formas modales convectivas mostradas en la Figura N° 5-1 pueden contrastarse con las soluciones analíticas representadas en la Figura N° 2-3, graficando la forma del modo en el diámetro del estanque. En la Figura N° 6-1 se observa una coincidencia clara entre ambas para ambos estanques. Por otra parte, la forma del primer modo se asemeja notablemente a la aproximación de membrana rígida descrita por Housner (1963), mostrada en la Figura N° 2-5.



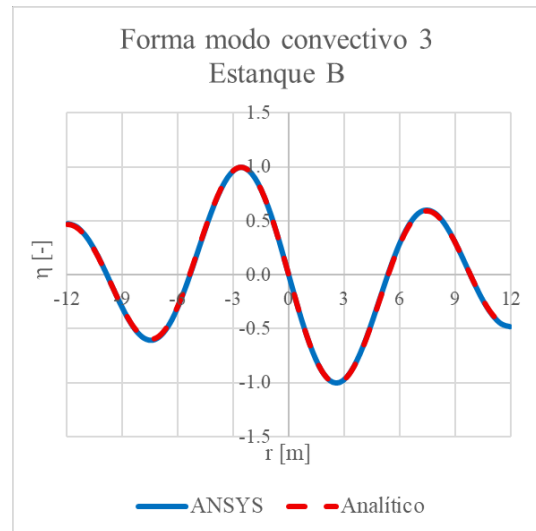
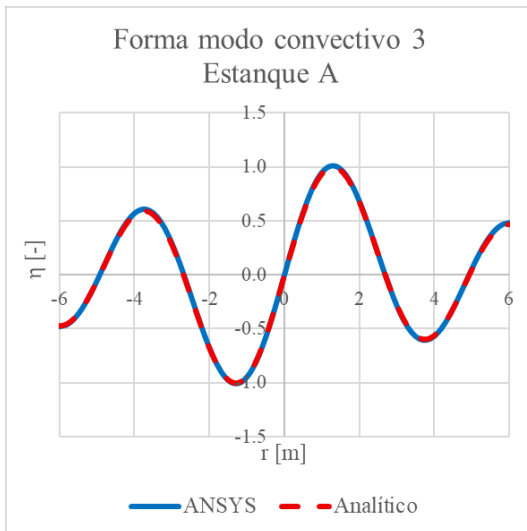
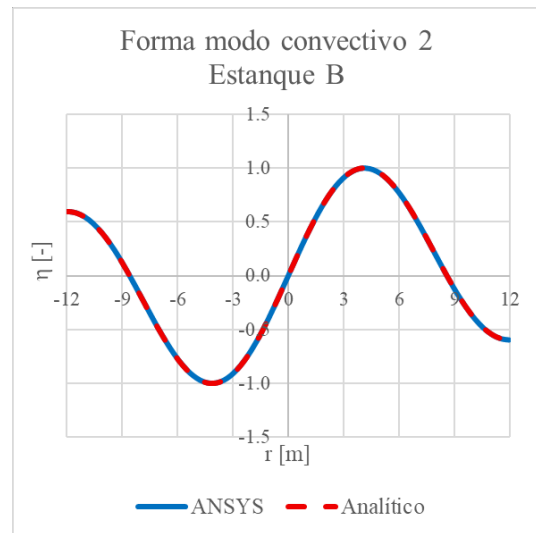
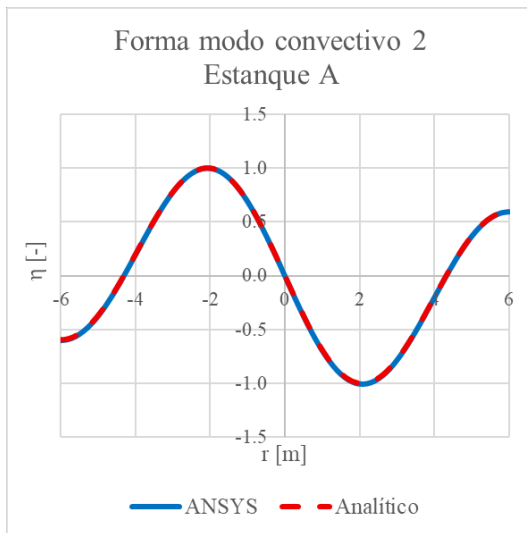


Figura N° 6-1: Comparación de formas modales convectivas

6.2. Análisis modal-espectral

Se comparan los resultados obtenidos con ANSYS con aquellos obtenidos al aplicar el método de diseño propuesto en ACI 350.3 y NCh2369 (2003, 2023).

6.2.1. Espectros de diseño

La actualización de la norma NCh2369 (2023) introdujo modificaciones importantes tanto en la forma del espectro de diseño como en su procedimiento de cálculo. Esto tiene un efecto significativo en la evaluación de la respuesta sísmica, en particular para el modo impulsivo.

Tal como se observa en la Figura N° 6-2, que muestra los espectros de diseño utilizados para el modo impulsivo, el periodo fundamental de ambos estanques se ubica en la parte plana del espectro NCh 2369 (2003). Sin embargo, con la forma modificada del espectro en NCh 2369 (2023), dicho periodo cae en una zona descendente, lo que se traduce en un valor considerablemente menor para la aceleración espectral asociada al modo impulsivo. Lo anterior conduce a tener que corregir los resultados del análisis a partir del cálculo del corte basal mínimo.

En la Tabla 6-5 se presentan los coeficientes sísmicos calculados para los modos impulsivo y convectivo, según ambas versiones de la norma NCh 2369. Se observa que el valor del coeficiente impulsivo disminuye de forma considerable para ambos estanques al utilizar la versión 2023, en comparación con la versión 2003. En cambio, los coeficientes convectivos aumentan levemente entre ambas versiones de la norma, tal como se aprecia en la Figura N° 6-3. También es apreciable que el coeficiente sísmico impulsivo según el espectro NCh 2369 (2023) es menor al mínimo en ambos estanques, por lo que se debe hacer la corrección a los resultados del análisis. Es apreciable que el coeficiente mínimo impulsivo de NCh 2369 (2023) es muy cercano al calculado con la versión 2003 de la norma, por lo cual los valores finales son muy similares.

Tabla 6-5: Coeficientes sísmicos

Modo	Estanque A NCh 2369 (2003)	Estanque A NCh 2369 (2023)	Estanque B NCh 2369 (2003)	Estanque B NCh 2369 (2023)	C_{min} NCh 2369 (2023)
Impulsivo [g]	0.408	0.214	0.408	0.240	0.405
Convectivo [g]	0.136	0.149	0.067	0.070	0.04

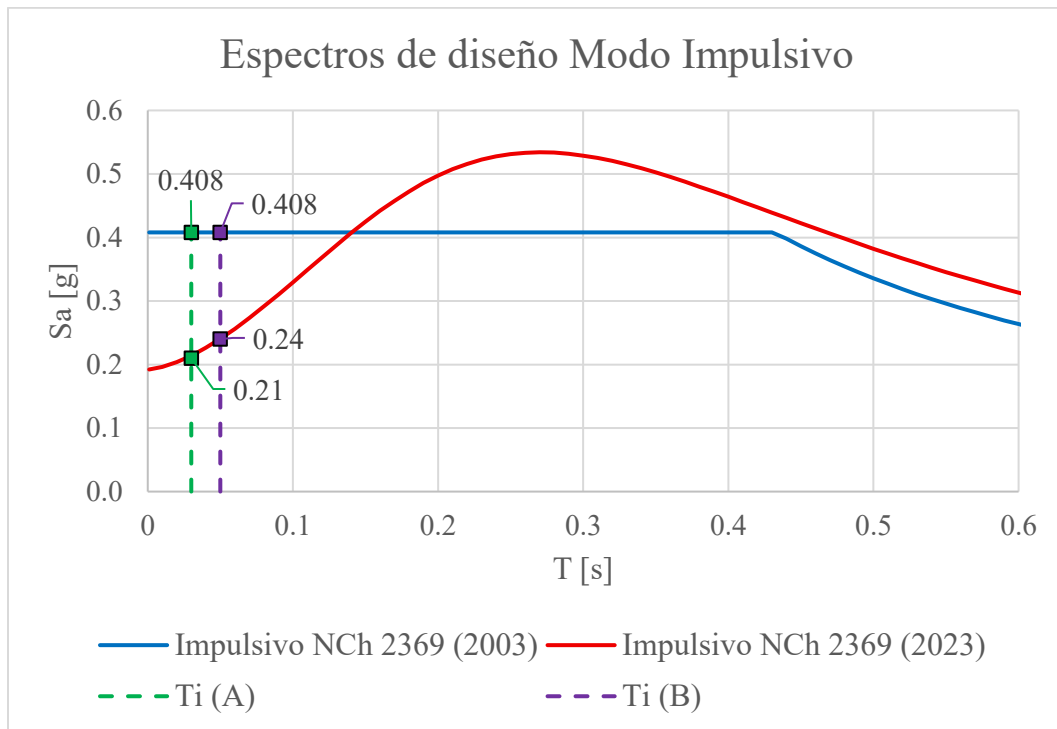


Figura N° 6-2: Comparación de espectro de diseño impulsivo

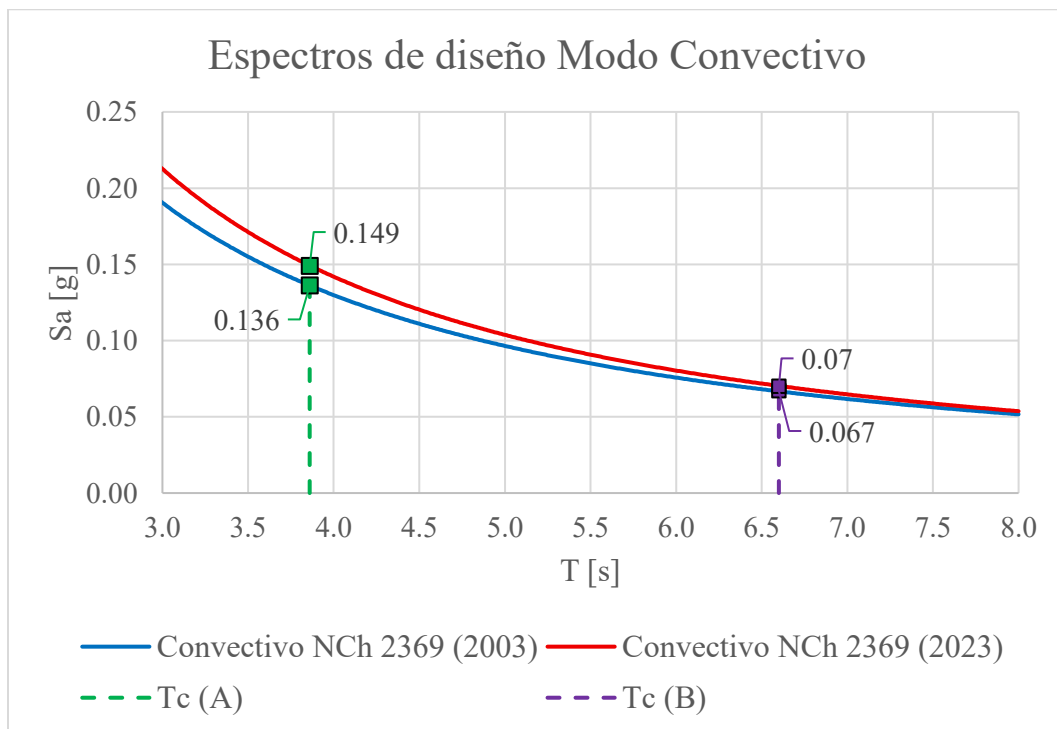


Figura N° 6-3: Comparación de espectro de diseño convectivo

6.2.2. Corte Basal y momento volcante

Se comparan los resultados obtenidos con ANSYS con los valores normativos calculados según el procedimiento propuesto en ACI 350.3 (2021), para corte basal y momento volcante. Las Tabla 6-6 y Tabla 6-7 muestran los valores separados por componente (modo impulsivo, convectivo, inercia de techo e inercia de muro de estanque), diferenciando también los resultados según el espectro utilizado (NCh 2369: 2003 y 2023).

En términos generales, se observa que los valores normativos tienden a sobreestimar tanto el corte basal como el momento volcante respecto a los obtenidos con el modelo numérico.

Los valores para el modo convectivo muestran una buena concordancia entre el software y ACI, con diferencias menores al 6% en la mayoría de los casos, siendo los valores mayores los obtenidos con ACI. Esto sugiere que, pese a las posibles diferencias en la distribución de presión convectiva, la resultante global está bien representada en ACI.

Al analizar las componentes adicionales para las fuerzas inerciales del techo y las paredes del estanque, se identifican discrepancias puntuales. En particular, en el estanque B, el modelo entrega valores mayores para el corte basal generado por la inercia de las paredes, lo cual podría atribuirse a una subestimación del peso efectivo en el método normativo. Esta situación no se presenta en el estanque A, donde se obtienen valores de corte ligeramente diferentes en el software. Por otro lado, el momento generado por la inercia del muro en el modelo es superior en todos los casos para ambos estanques, esto puede deberse a la incorporación de la rigidez del muro en el análisis.

Finalmente, al combinar todas las contribuciones mediante SRSS, se mantiene la tendencia general: los valores de corte basal y momento volcante obtenidos mediante la norma ACI son mayores a los entregados por ANSYS.

Tabla 6-6: Comparación corte basal

Parámetro	Estanque							
	A				B			
	Espectro				Espectro			
	2003		2023		2003		2023	
	ANSYS	ACI	ANSYS	ACI	ANSYS	ACI	ANSYS	ACI
$V_b \text{ imp.}$ [tonf]	76	88	84	87	164	179	174	177
$V_b \text{ techo}$ [tonf]	18	23	20	23	58	84	62	84
$V_b \text{ estanque}$ [tonf]	31	33	35	33	63	47	67	47
$V_b \text{ conv.}$ [tonf]	36	37	40	41	95	99	100	104
$V_b \text{ SRSS}$ [tonf]	131	149	145	149	301	326	318	325

Tabla 6-7: Comparación Momento Volcante

Parámetro	Estanque							
	A				B			
	Espectro				Espectro			
	2003		2023		2003		2023	
	ANSYS	ACI	ANSYS	ACI	ANSYS	ACI	ANSYS	ACI
M_v imp. [tonf-m]	324	434	360	431	1422	1785	1507	1771
M_v techo [tonf-m]	102	123	114	122	282	461	299	458
M_v estanque [tonf-m]	123	95	136	94	239	137	253	136
M_v conv. [tonf-m]	164	169	180	185	1051	1111	1104	1171
M_v SRSS [tonf-m]	573	673	636	672	2209	2630	2336	2639

6.2.3. Alturas equivalentes

La Tabla 6-8 presenta las alturas equivalentes para los modos impulsivo h_i y convectivo h_c , obtenidas con ANSYS a partir de la relación entre momento volcante y corte basal de los modos del líquido y según el procedimiento de ACI 350.3. En general, se observa una buena concordancia entre ambos enfoques, con diferencias moderadas para el caso impulsivo.

Tabla 6-8: Comparación alturas equivalentes

Altura	Estanque			
	A		B	
	ANSYS	ACI	ANSYS	ACI
h_i [m]	4.3	4.9	8.7	9.8
h_c [m]	4.5	4.5	11.1	11.1

6.2.4. Altura de ola convectiva

En las Tabla 6-9 y Tabla 6-10 se presentan los resultados obtenidos en el software para la altura máxima de ola convectiva en cada estanque, junto con los valores calculados con las expresiones normativas descritas anteriormente.

Para el estanque A, ambas expresiones normativas tienden a sobrestimar la altura de ola respecto a los resultados obtenidos mediante el software, siendo mayor la diferencia en el caso de la ecuación aproximada (Ec. 3-23). Este comportamiento es consistente con las especificaciones de ACI 350.3, donde se advierte que la ecuación simplificada entrega valores entre un 10% y 20% mayores a los reales. Se nota además que la altura de ola obtenida con la versión 2023 de la norma supera la revancha de 80 [cm] del estanque.

En el caso del estanque B, se repite la sobrestimación al utilizar la Ecuación 3-23. Sin embargo, la Ecuación 3-24 entrega valores levemente inferiores a los obtenidos con ANSYS. Este comportamiento sugiere que, para estanques con una mayor relación entre diámetro y altura de líquido ($D/H_L = 2.67$ para estanque A y

$D/H_L = 5.31$ para estanque B), la ecuación aproximada entrega un valor más conservador y por lo tanto más seguro desde un punto de vista de diseño. En este caso, la altura máxima de ola obtenida con la versión nueva de la norma no supera la revancha de 90 [cm] del estanque.

Tabla 6-9: Comparación de altura de ola – Estanque A

Método	Estanque A			
	NCh 2369 (2003)		NCh 2369 (2023)	
	d_{max} [cm]	Variación %	d_{max} [cm]	Variación %
ANSYS	68.9	-	76.2	-
Ec. 3-23	81.7	+18.6	89.5	+17.5
Ec. 3-24	75.2	+9.1	84.2	+10.5

Tabla 6-10: Comparación de altura de ola – Estanque B

Método	Estanque B			
	NCh 2369 (2003)		NCh 2369 (2023)	
	d_{max} [cm]	Variación %	d_{max} [cm]	Variación %
ANSYS	67.4	-	71.3	-
Ec. 3-23	79.7	+15.4	84	+17.8
Ec. 3-24	63.7	-4.6	67.4	-5.5

En la Figura N° 6-4 se compara la forma de la curva de ola convectiva (normalizada) con la forma del primer modo convectivo para el estanque A. Se puede apreciar que la forma de la superficie está muy cercana a la forma del modo convectivo 1, lo que reafirma que es el primer modo el que tiene mayor influencia en el comportamiento del líquido. La diferencia encontrada debido a la influencia de los modos superiores es más notoria en el caso del análisis con el espectro de NCh 2369 (2023), esto debido a que la aceleración espectral es mayor que en el caso del espectro de NCh 2369 (2003). Este análisis se extiende de igual manera al estanque B.

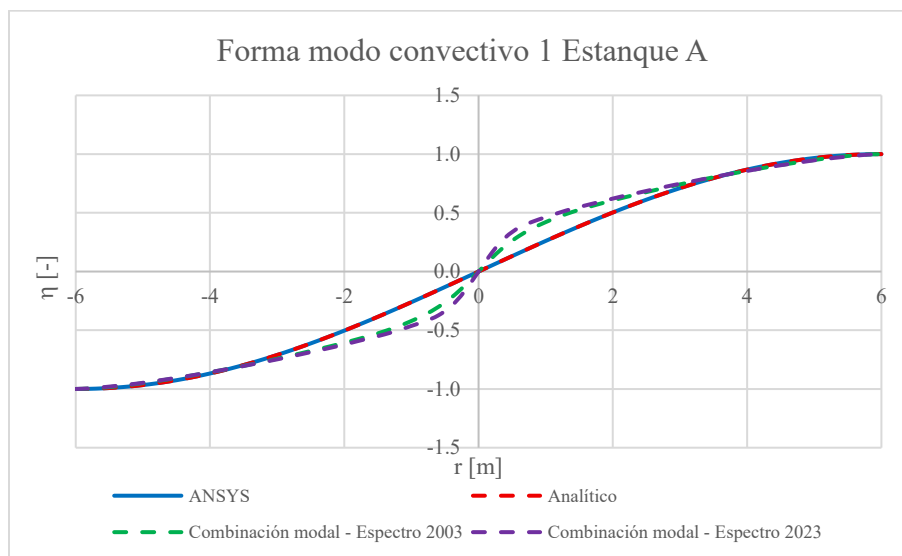


Figura N° 6-4: Comparación de forma de ola convectiva

6.2.5. Presiones hidrodinámicas

Para comparar las distribuciones de presiones para cada modo, se presentan los resultados obtenidos utilizando el espectro definido por NCh 2369 (2003). No obstante, los comentarios realizados son igualmente aplicables a los resultados obtenidos con el espectro de NCh 2369 (2023), ya que, si bien los valores difieren, las distribuciones mantienen formas similares. Esta similitud puede observarse en la Figura N° 5-7, donde también se evidencia un aumento de la respuesta convectiva e impulsiva, pero se mantiene la forma de las distribuciones de presión. Estas variaciones están directamente relacionadas con las diferencias entre ambos espectros y fueron evaluadas numéricamente al comparar los parámetros de evaluación globales de la estructura.

Como se muestra en las Figura N° 6-5 y Figura N° 6-6, los valores obtenidos para el modo convectivo presentan una distribución cercana a la obtenida al evaluar la expresión propuesta en la normativa, con una diferencia promedio del orden del 9%. Se observa que la presión mínima se encuentra en la base del estanque y aumenta hacia la parte superior, siguiendo una curva de forma similar a la esperada teóricamente.

En contraste, la distribución de presiones impulsivas presenta diferencias significativas, tanto en forma como en magnitud, entre los valores obtenidos mediante el software y los estimados siguiendo la normativa. Particularmente, las expresiones de la normativa generan un valor máximo de presión considerablemente mayor, aproximadamente un 30% más para el estanque A y 19% para el estanque B. Además, la forma de la curva difiere, desplazándose la ubicación del valor máximo a una posición distinta en la altura del estanque. Este comportamiento sugiere que la rigidez del estanque influye importantemente en la distribución de presiones impulsivas, hallazgo coincidente con lo reportado por Moslemi & Kianoush (2012), quienes concluyeron que las expresiones propuestas en ACI 350.3 tienden a sobreestimar las presiones hidrodinámicas. Esto explica las diferencias encontradas en el corte basal y momento volcante que se describieron anteriormente.

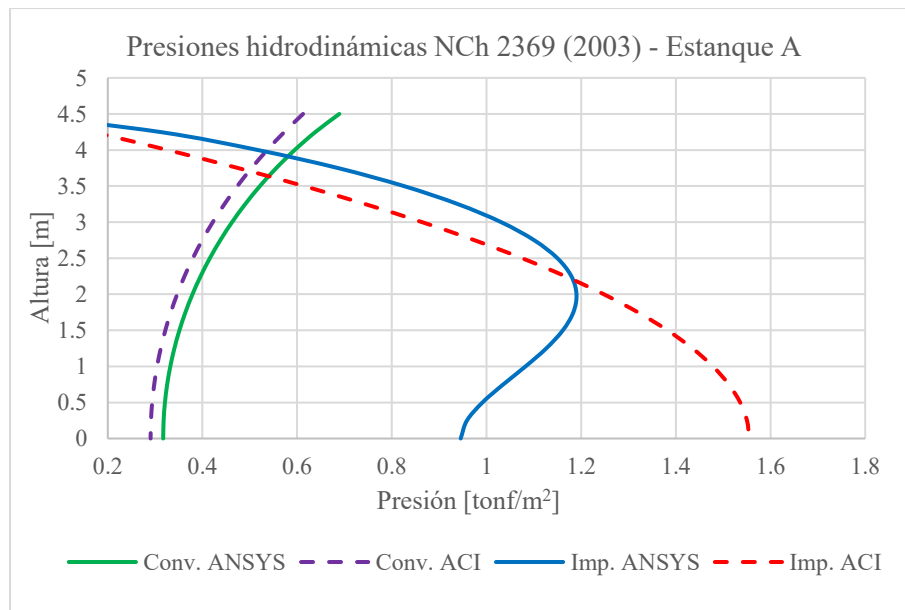


Figura N° 6-5: Comparación de distribución de presiones - Estanque A

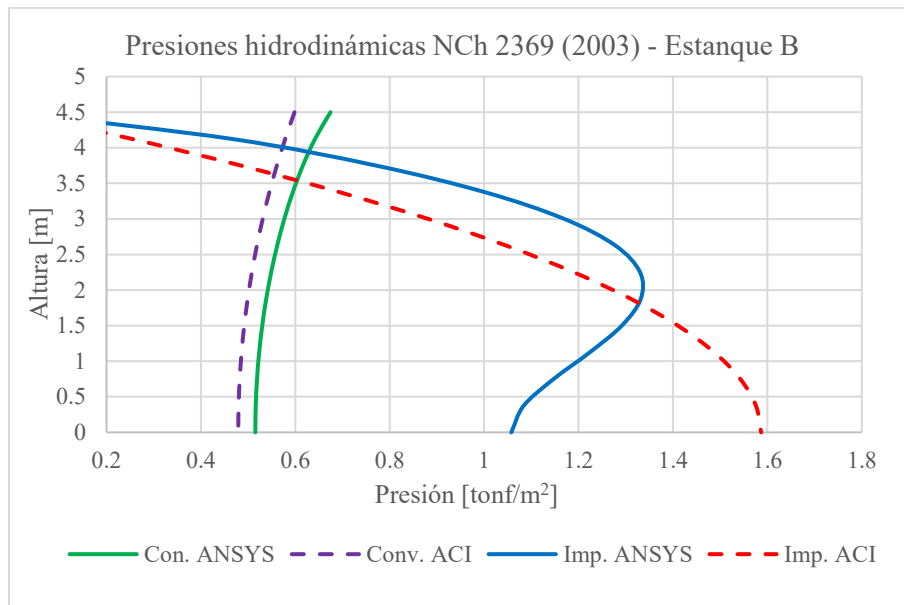


Figura N° 6-6: Comparación de distribución de presiones - Estanque B

Por otra parte, es posible analizar la distribución de las presiones en el perímetro del estanque. Las Figura N° 6-7 y Figura N° 6-8 muestran las distribuciones horizontales en la sección correspondiente al valor máximo de presión impulsiva y convectiva, respectivamente. Para la presión impulsiva se observa la diferencia entre los valores máximos. La distribución en el perímetro de los modelos sigue una forma más regular en el caso del estanque A.

Para las presiones convectivas, la distribución propuesta en ACI sigue una forma similar a la obtenida en ANSYS, con valores ligeramente mayores.

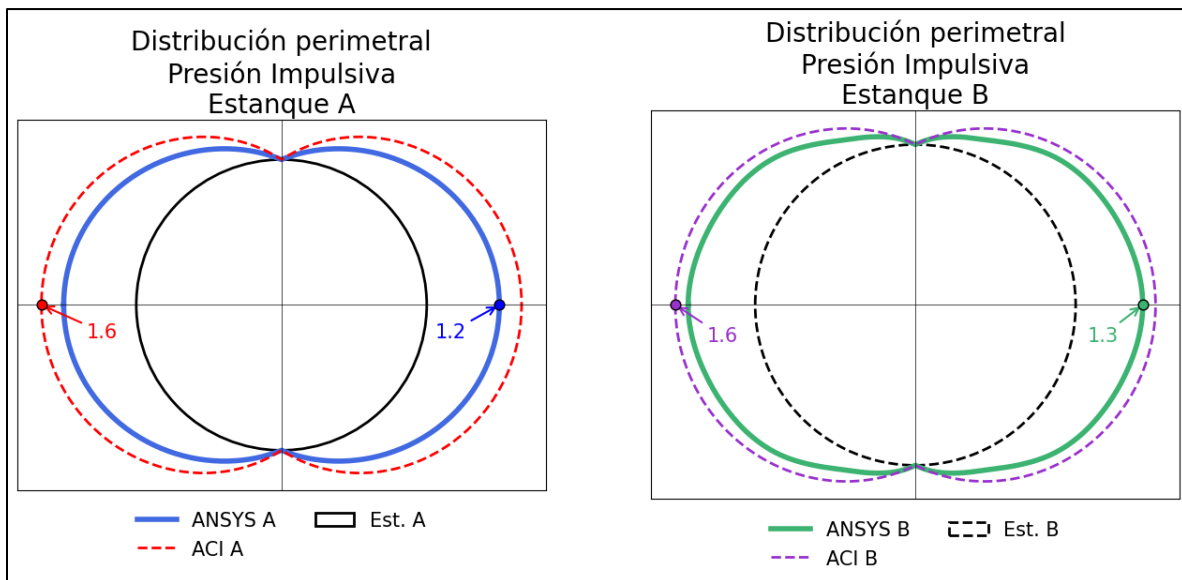


Figura N° 6-7: Distribución horizontal presión impulsiva

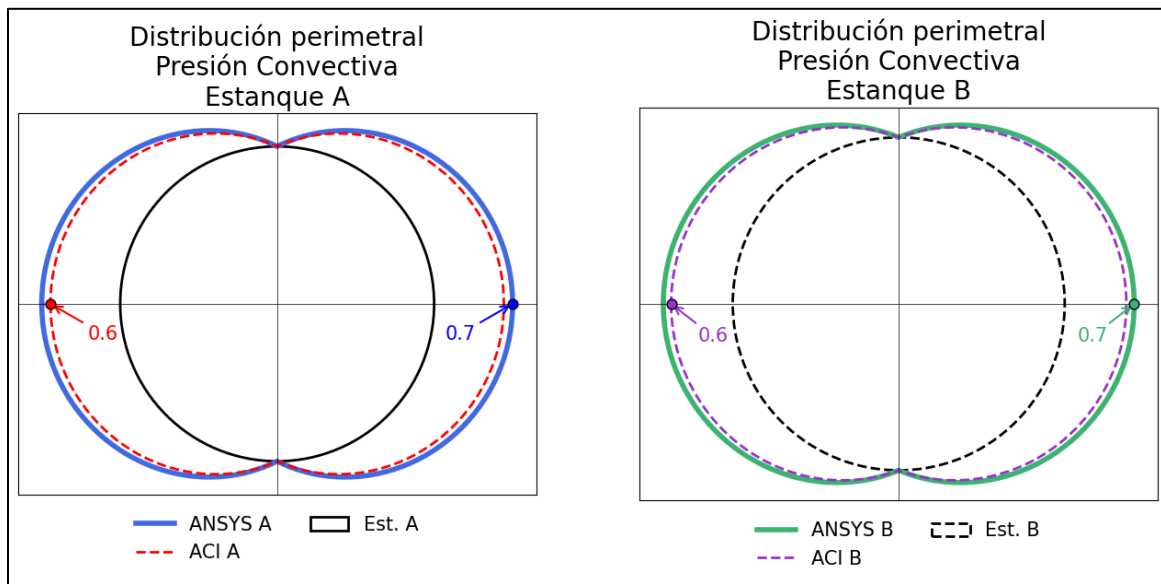


Figura N° 6-8: Distribución horizontal presión convectiva

Para verificar el efecto de la rigidez sobre la distribución de presiones impulsivas, se realizó un análisis adicional para la presión impulsiva de ambos estanques, esta vez utilizando un módulo de elasticidad del hormigón quince veces mayor que el original, con el objetivo simular un estanque mucho más rígido. La Figura N° 6-9 muestra la distribución de presión impulsiva para estos casos, donde se observa que tanto la magnitud de los valores obtenidos como la forma de la distribución de la presión para el caso rígido se asemejan con la distribución propuesta en normativa, lo cual confirma el efecto de la rigidez sobre la presión impulsiva y la sobreestimación de estas presiones de la normativa.

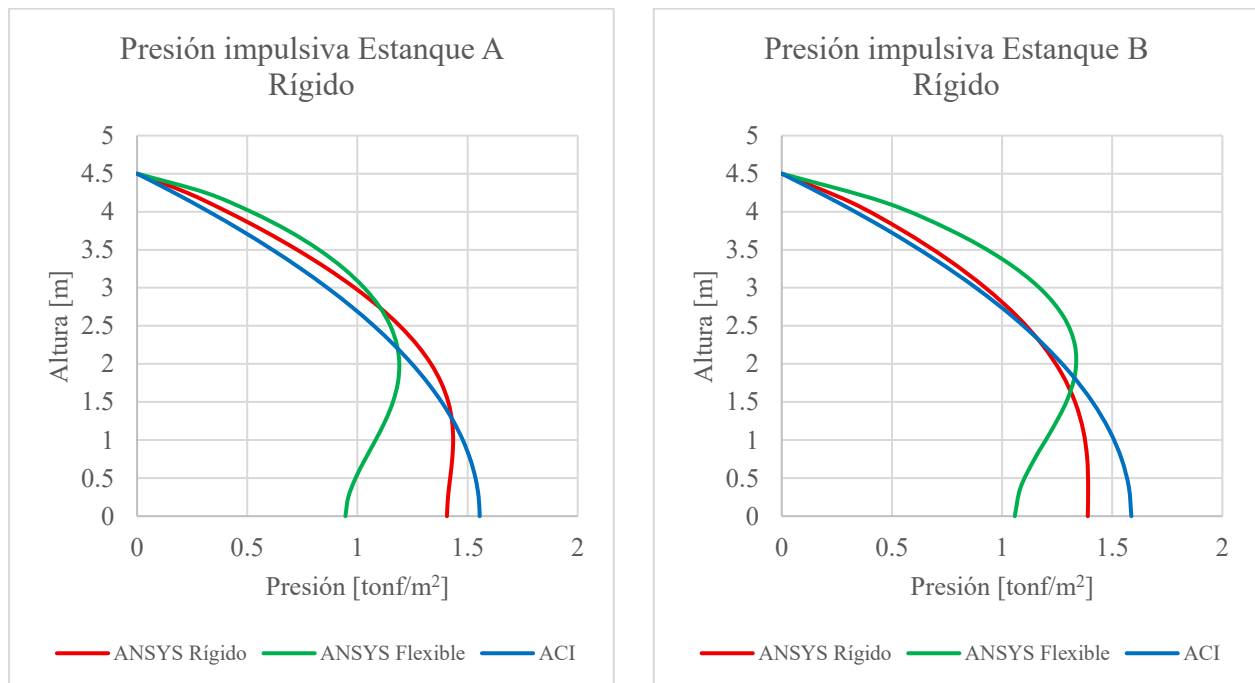


Figura N° 6-9: Presión impulsiva - Estanque rígido

6.2.6. Fuerzas internas

Para comparar los resultados de fuerzas internas obtenidas mediante el análisis modal-espectral, se desarrollaron modelos simplificados para realizar un análisis estático. Estos modelos no incorporan el elemento de fluido, aplicándose en su lugar distribuciones lineales de presión hidrodinámica, de acuerdo con las recomendaciones normativas. Además, se superponen los casos de carga peso propio, presión hidrostática y fuerzas inerciales de techo y muro. Los resultados numéricos y las distribuciones verticales y perimetrales de las fuerzas se presentan en las Figura N° 6-10 a Figura N° 6-14.

En términos generales, se observa que las distribuciones de fuerzas internas son similares entre ambos enfoques, lo que indica una buena coherencia en el comportamiento estructural global. Sin embargo, las diferencias numéricas que se muestran en la Tabla 6-11, revelan que el análisis estático tiende a subestimar ligeramente las fuerzas internas en el caso de la fuerza axial. Para el resto de las fuerzas el análisis estático arroja valores con diferencias poco significativas. Se nota además que la diferencia entre el uso de las diferentes versiones de la norma NCh 2369 en los análisis estáticos es nula en los casos estáticos.

Al comparar las distribuciones:

- Fuerza axial anular (Figura N° 6-10): las distribuciones son coincidentes entre ambos métodos, variando levemente en los valores en la vertical.
- Corte radial (Figura N° 6-11): las distribuciones son coincidentes, con diferencias mínimas
- Corte tangencial (Figura N° 6-12): la distribución vertical varía levemente para estanque B. Sin embargo, los valores máximos coinciden. La forma de la distribución horizontal varía en el estanque B, probablemente por consecuencia de las diferencias encontradas en la distribución de presión impulsiva.
- Momentos flectores (Figura N° 6-13 y Figura N° 6-14): las distribuciones verticales coinciden en el caso de los dos estanques, tomando valores ligeramente menores para el momento M_{11} en los casos estáticos. Por otra parte, las distribuciones horizontales del método estático presentan valores más uniformes en el perímetro del estanque. Sin embargo, las diferencias numéricas son pequeñas.

Tabla 6-11: Comparación fuerzas internas máximas

Parámetro	Estanque							
	A				B			
	Espectro				Espectro			
	2003		2023		2003		2023	
	Modal-Espectral	Estático	Modal-Espectral	Estático	Modal-Espectral	Estático	Modal-Espectral	Estático
F axial [tonf/m]	23.1	22.4	24.1	22.5	38.2	34.4	39.2	34.5
V radial [tonf/m]	4.1	4.6	4.3	4.6	5.8	6.1	5.9	6
V tangencial [tonf/m]	5.5	5.9	6.1	5.9	6.2	6.2	6.6	6.2
M_{11} [tonf-m/m]	0.13	0.14	0.13	0.13	0.29	0.25	0.3	0.25
M_{22} [tonf-m/m]	0.58	0.63	0.60	0.63	1.26	1.2	1.29	1.2

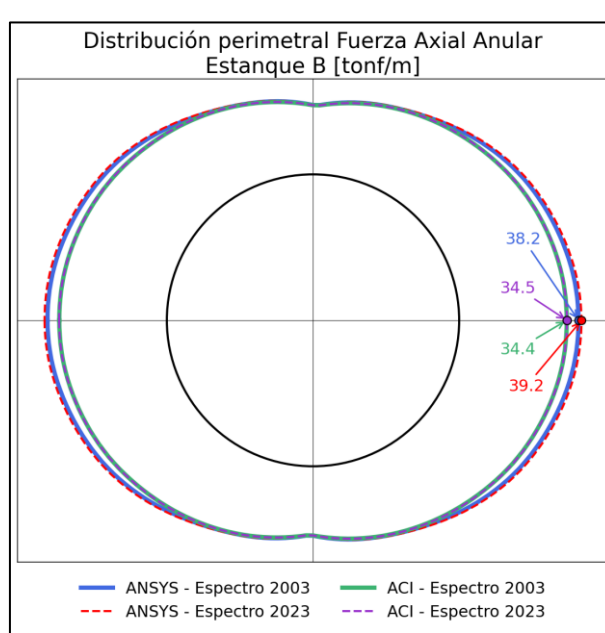
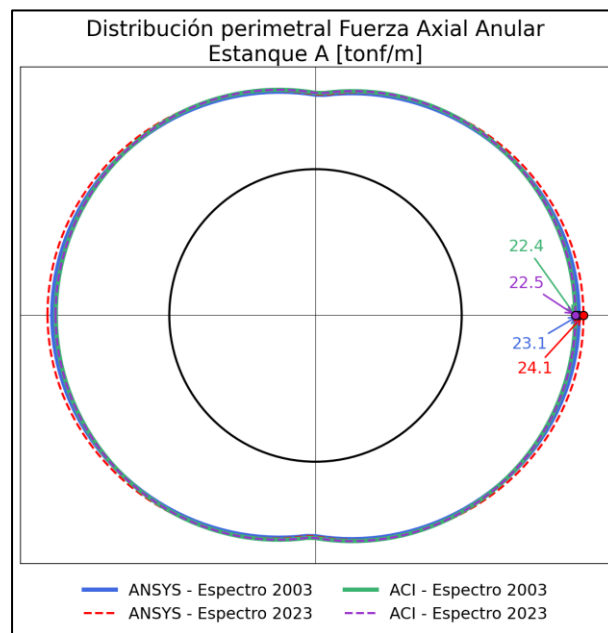
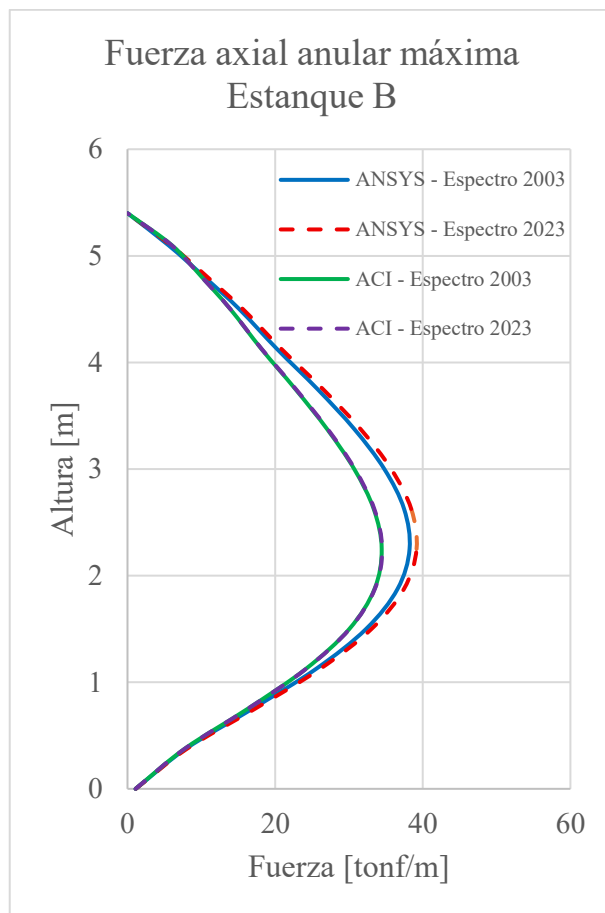
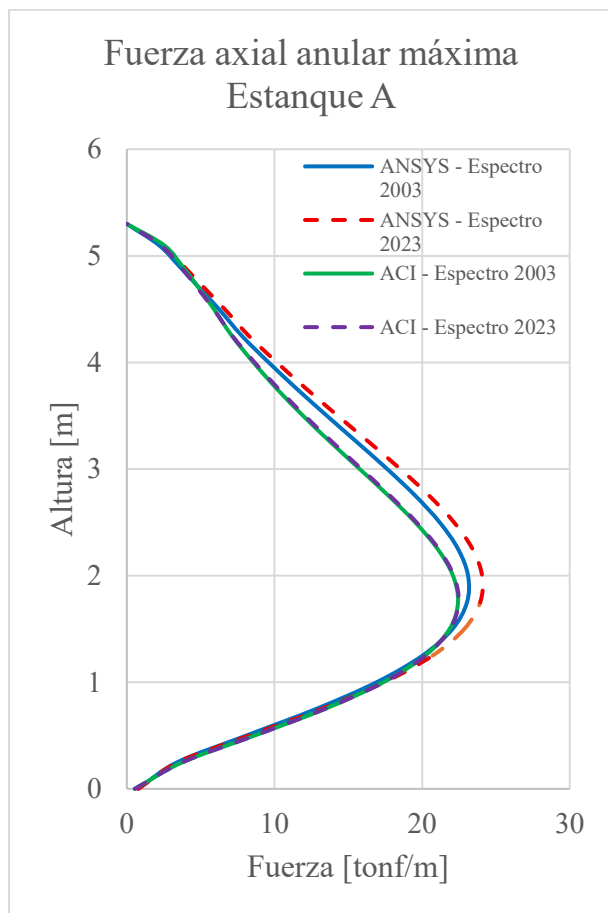


Figura N° 6-10: Comparación distribución de la fuerza axial anular máxima

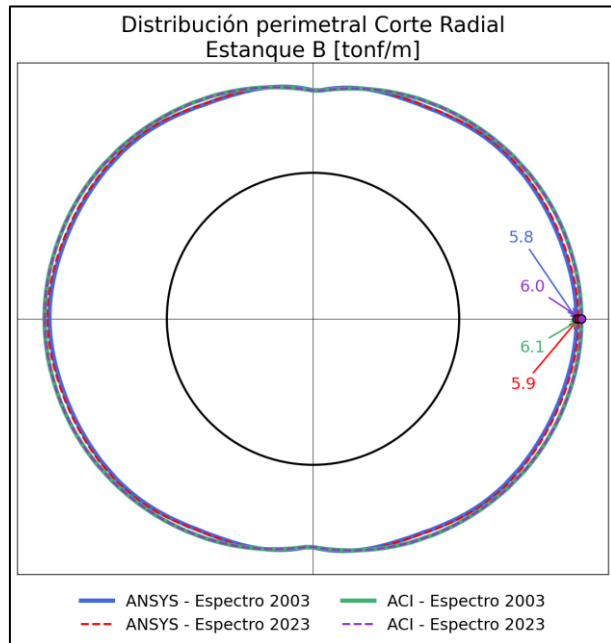
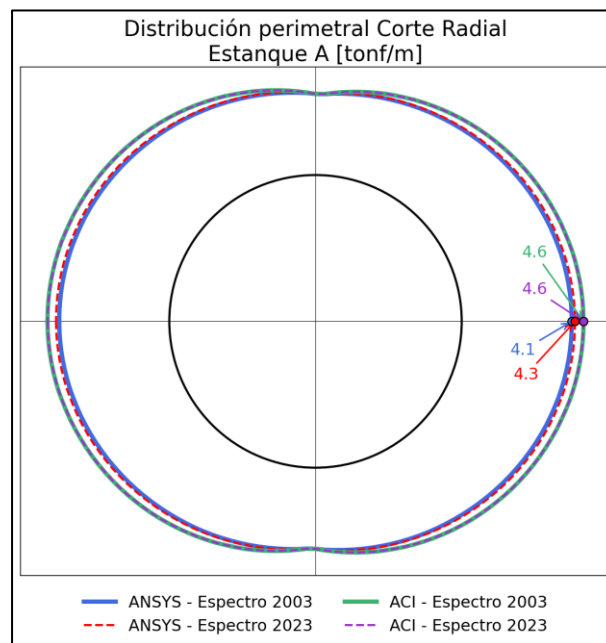
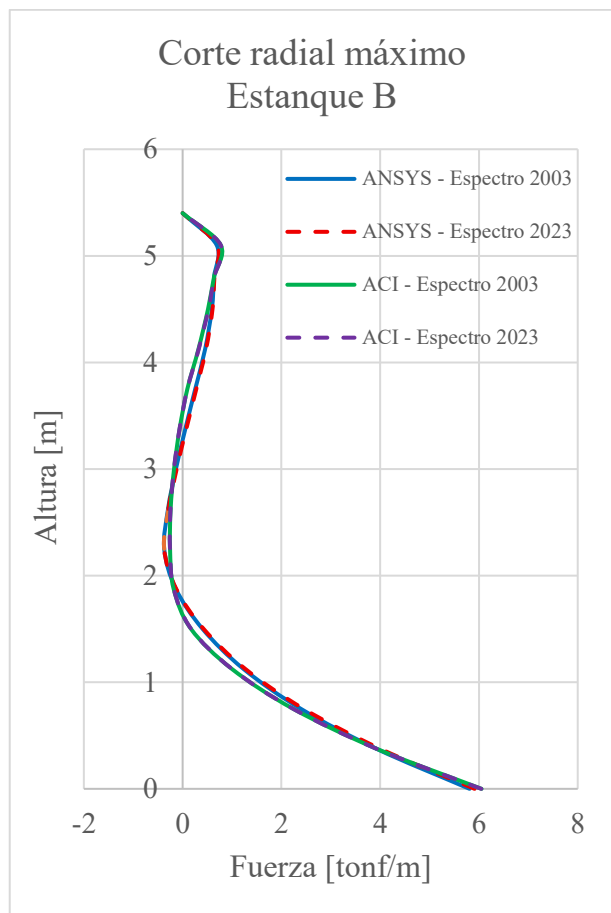
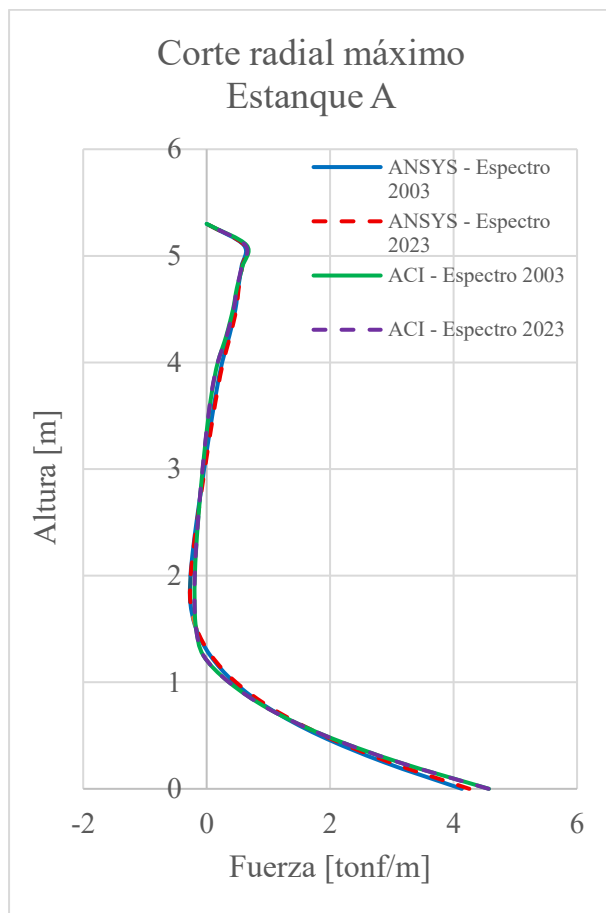


Figura N° 6-11: Comparación distribución de corte radial en la base

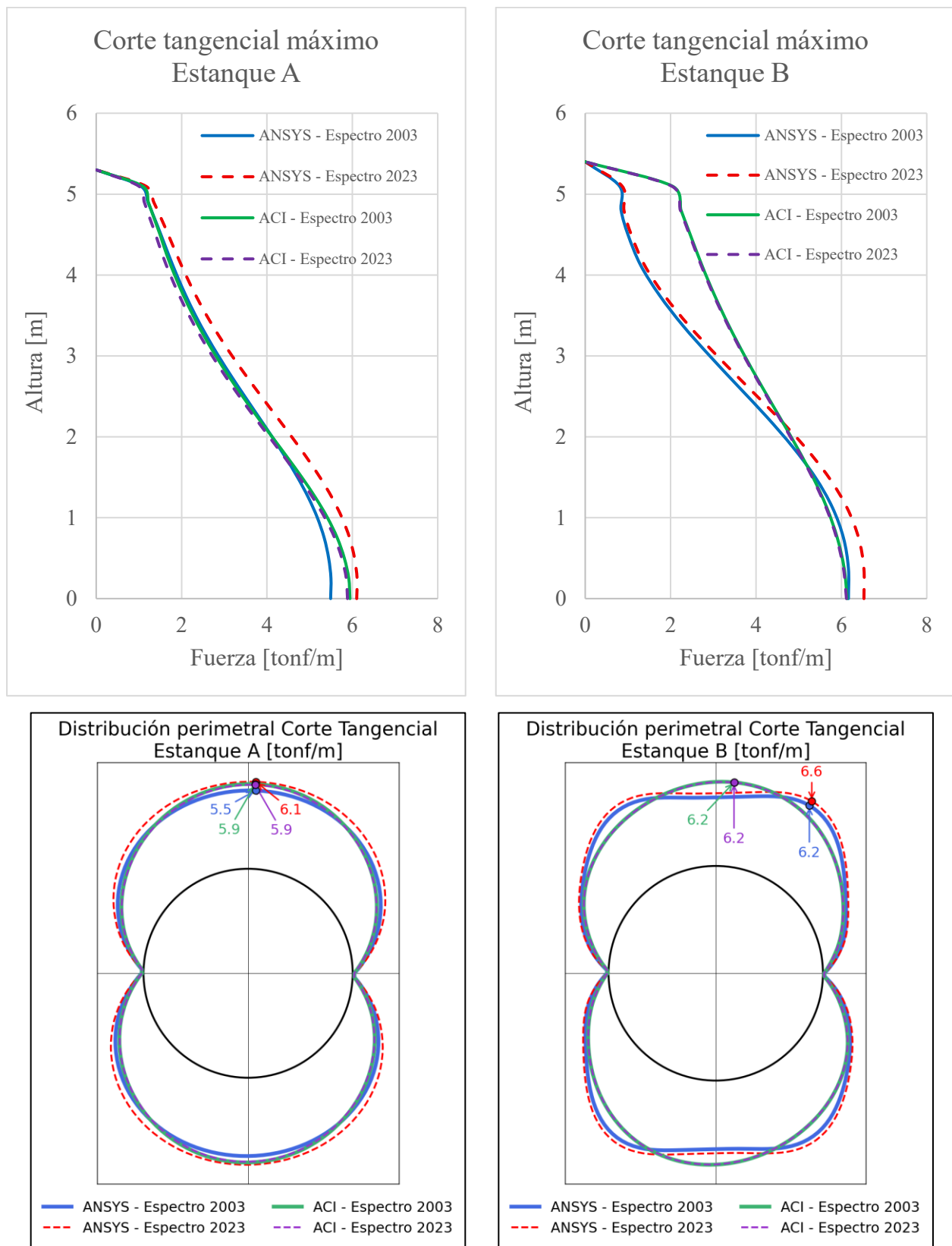


Figura N° 6-12: Comparación distribución de corte tangencial en la base

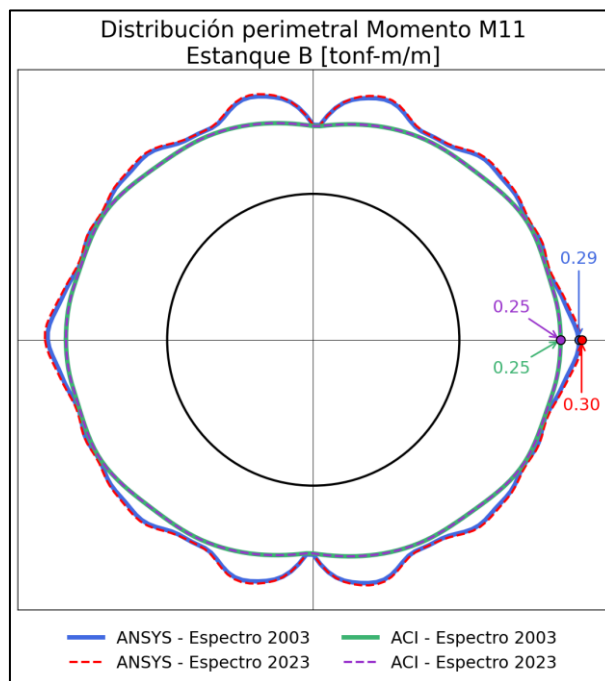
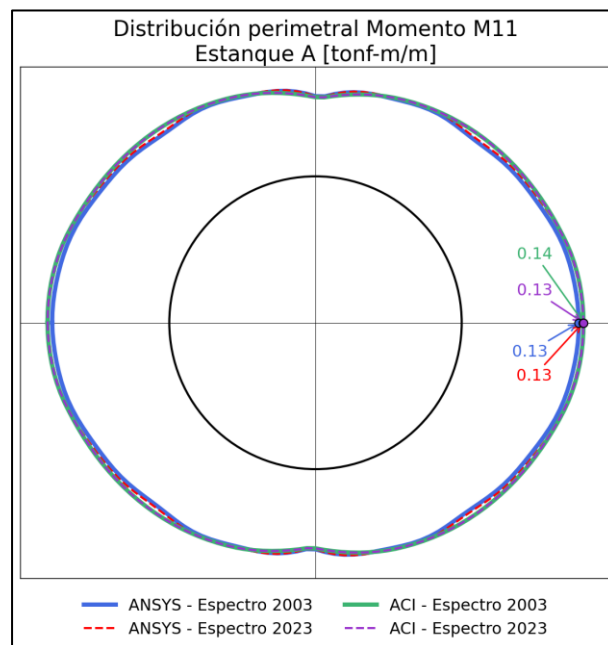
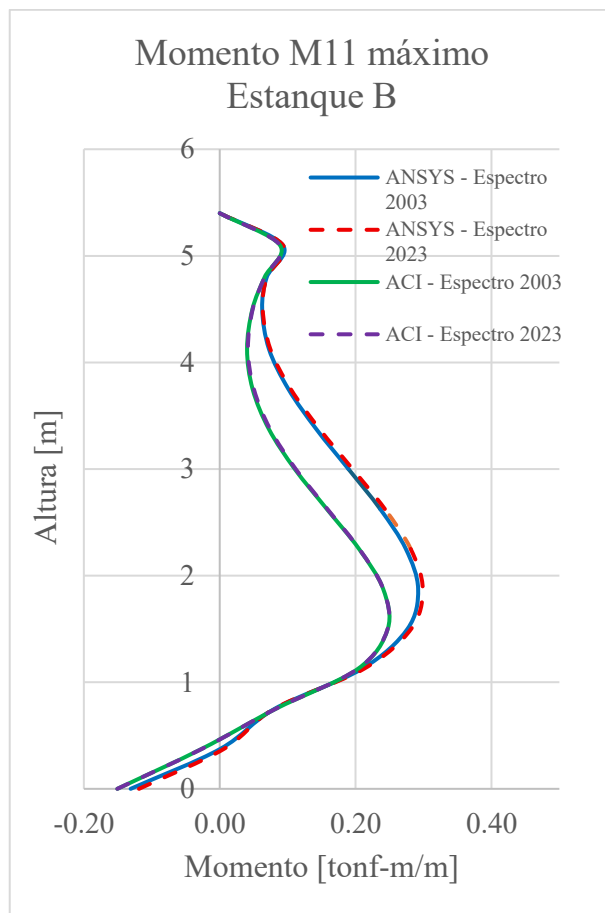
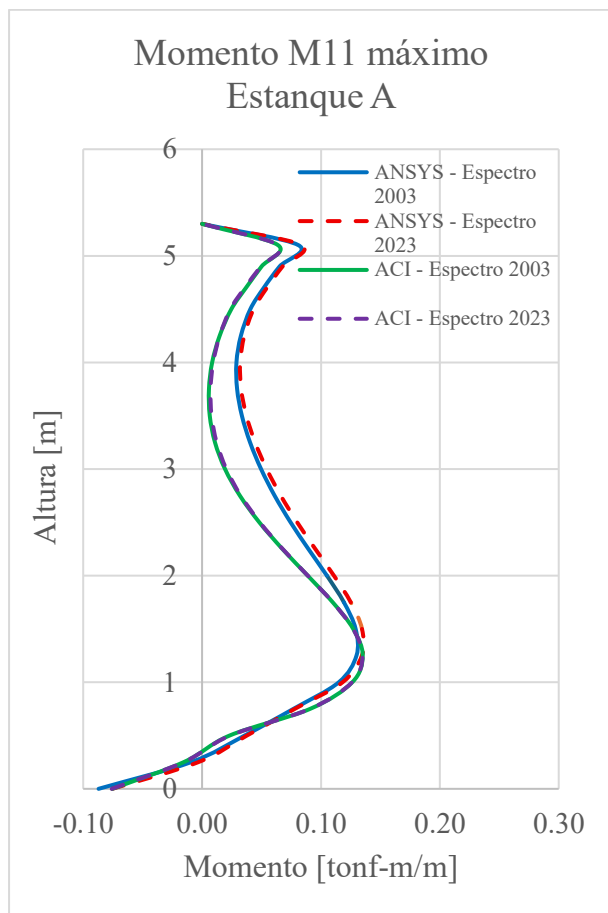


Figura N° 6-13: Comparación distribución de momento M_{11} máximo

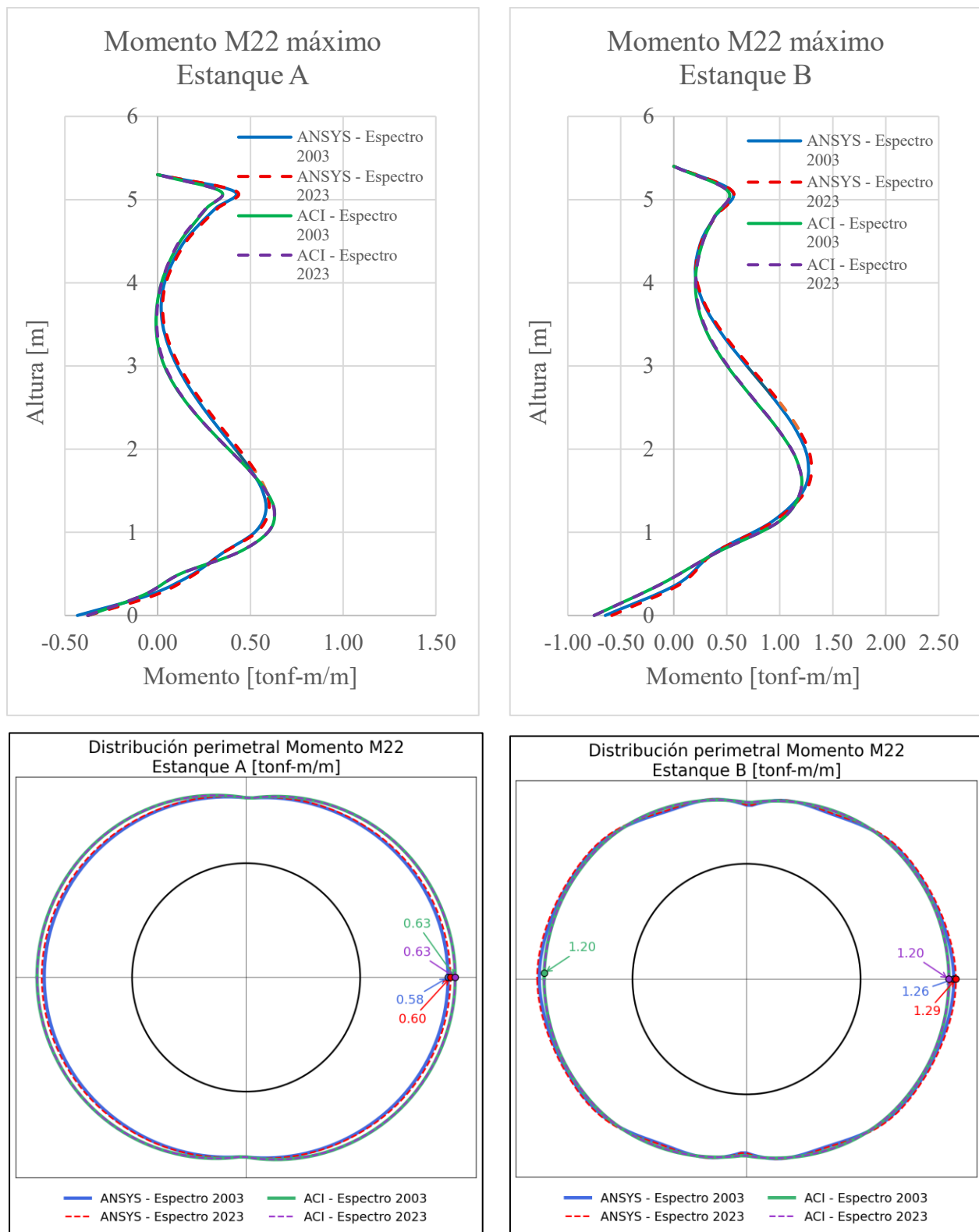


Figura N° 6-14: Comparación distribución de momento M_{22} máximo

7. Conclusiones

El estudio permitió evaluar la interacción fluido-estructura en estanques cilíndricos de hormigón armado mediante herramientas de elementos finitos, contrastando los resultados obtenidos con los métodos analíticos normativos basados en modelos simplificados.

Mediante el análisis modal fue posible identificar con claridad los modos impulsivos y convectivos de la respuesta. Los primeros, asociados a periodos bajos, involucran el movimiento acoplado entre la estructura del estanque y una porción del líquido. Los segundos presentan deformaciones en la superficie libre del fluido que no involucran a movimientos de la estructura y que coinciden con las formas modales esperadas de las soluciones analíticas. Las respuestas observadas respaldan la validez del enfoque de separación por componentes que utilizan los modelos analíticos.

La respuesta dinámica estuvo dominada principalmente por dos modos fundamentales, uno impulsivo y otro convectivo, lo que concuerda con el modelo de Housner y refuerza los fundamentos teóricos en que se basan los procedimientos normativos.

Al comparar las propiedades estructurales, se observó una buena concordancia en los pesos equivalentes impulsivos y convectivos, con diferencias menores al 5%. Además, en el estanque B se aprecia que el peso de la componente convectiva tiene mayor importancia, siendo este mayor que el peso impulsivo, a diferencia de lo que ocurre en el estanque A. Esta diferencia es consistente con la teoría, la cual indica que la componente convectiva aumenta al incrementarse la relación entre diámetro del estanque y altura del líquido. En cuanto a los periodos fundamentales, tanto impulsivos como convectivos, los valores numéricos fueron muy cercanos a los entregados por las expresiones normativas.

Se verificó la influencia de la flexibilidad estructural del estanque en la distribución de la presión impulsiva. En los modelos que representan la flexibilidad real de la estructura, se obtiene una distribución de presión impulsiva diferente a la obtenida con las expresiones de diseño que suponen estanque totalmente rígido, con valores máximos menores. Al simular un estanque rígido en el modelo de elementos finitos, se obtuvo una distribución de presión coincidente con la de la normativa, lo que confirmó que las diferencias observadas se deben a la flexibilidad de la estructura. Como consecuencia, el corte basal y el momento volcante obtenidos en el modelo numérico fueron menores a los estimados por la normativa.

Respecto a la respuesta a la sollicitación definida por los espectros sísmicos de la normativa de diseño sísmico, se observó que el espectro definido por la NCh 2369 (2023) genera una menor demanda para periodos cortos en comparación con el de la versión 2003. Esto redujo la respuesta impulsiva, que debió ser corregida utilizando el corte basal mínimo para el análisis modal espectral y el coeficiente sísmico mínimo para el análisis estático. Por el contrario, la demanda convectiva aumentó con el espectro de la nueva norma.

En general, los parámetros de evaluación global, como el corte basal, momento volcante o altura de ola convectiva, tendieron a aumentar en el análisis modal espectral con el cambio de norma. En el análisis normativo la mayor diferencia, con la actualización de la norma, fue un incremento en la altura de ola (aproximadamente un 12% en estanque A y 6% en el B), donde el valor obtenido para el estanque A con la versión 2023 de la norma supera el valor de revancha con la cual fue diseñado el estanque.

Las diferencias del método normativo con el modal-espectral en cuanto al corte basal SRSS fueron mayores usando la versión 2003 de la norma. aproximadamente un 10% mayor versus un 3% mayor usando la versión 2023. Esto se repite en el momento volcante, siendo un 20% mayor versus 13% mayor. Comparando los resultados entre los estanques, la normativa estima mejor el corte basal para el estanque B, mientras que el momento se estima mejor para el estanque A. Al analizar las diferencias por componente, las mayores

diferencias se observan en la estimación del corte y momento para el muro del estanque, seguido del techo, el modo impulsivo y, finalmente, el modo convectivo. Este último presenta la mejor aproximación, con diferencias de hasta un 6% mayor en corte basal y momento volcante, para ambas versiones de la normativa.

Respecto a las fuerzas internas, las diferencias entre los métodos normativo y numérico fueron, en general, pequeñas. Sin embargo, se detectó que la fuerza axial anular fue subestimada por el método estático. Esta subestimación es consecuencia de las diferencias encontradas tanto en las distribuciones de presiones hidrodinámicas, como las fuerzas de inercia generadas. Como resultado, para el estanque A, la fuerza axial fue un 3% menor usando la versión 2003 de la norma y un 6.6% menor con la versión 2023. En el caso del estanque B, las diferencias fueron más significativas, siendo un 10% y 12% menores para las versiones 2003 y 2023, respectivamente.

Al comparar la altura de ola convectiva entre ambos métodos de análisis, se observó que el análisis normativo tiende a entregar resultados más conservadores que el modal-espectral. Utilizando la ecuación simplificada de la norma, la altura de ola fue en promedio 17% mayor que la obtenida mediante el análisis modal-espectral, lo cual se encuentra dentro del rango esperado. Por otro lado, al utilizar la ecuación derivada del estudio de Housner, la diferencia fue de aproximadamente un 10% mayor para el estanque A y un 5% menor en el estanque B. Esto sugiere que la formulación de Housner tiene una mayor precisión en la estimación de la altura de ola convectiva, siendo más acertado en el caso del estanque de mayores dimensiones.

Finalmente, se comprobó que el uso de herramientas numéricas en el software ANSYS permite representar la interacción fluido-estructura en estanques de forma más detallada que los métodos normativos, mediante un análisis modal-espectral. Los resultados obtenidos fueron consistentes, lo que sugiere que este enfoque podría adaptarse para abordar análisis más complejos, en otras geometrías, condiciones estructurales o realizar análisis no lineales con registros sísmicos reales.

8. Referencias

- ACI Committee 350. (2021a). Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-20) and Commentary. American Concrete Institute.
- ACI Committee 350. (2021b). Code Requirements for Seismic Analysis and Design of Liquid-Containing Concrete Structures (ACI 350.3-20) and Commentary. American Concrete Institute.
- Ansys, Inc. (2024). Ansys® Mechanical APDL, Release 24.2, Product Help. Ansys, Inc.
- Caneo, C. (2006). *Análisis sísmico dinámico de estanques superficiales usando elementos finitos*. [Tesis de Pregrado, Universidad Católica del Norte]
- Compagnoni, M. E., Curadelli, R. O., & Martinez, C. A. (2012). Análisis del comportamiento dinámico de tanques cilíndricos bajo excitación sísmica. *Mecánica Computacional*, 31(13), 2219–2230. <http://venus.ceride.gov.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4187/4113>
- Hosseini, S. E. A., & Beskhyroun, S. (2023). Fluid storage tanks: A review on dynamic behaviour modelling, seismic energy-dissipating devices, structural control, and structural health monitoring techniques. *Structures*, 49, 537–556. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.01.146>
- Housner, G. (1957). Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47, 15–37.
- Housner, G. (1963). The Dynamic Behavior of Water Tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53, 381–387.
- Ibrahim, R. A. (2005). *Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511536656>
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). NCh2369.Of2003 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.
- Instituto Nacional de Normalización. (2023). NCh2369.Of.2023 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.
- Kangda, M. Z. (2021). An approach to finite element modeling of liquid storage tanks in ANSYS: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6, 226. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00589-8>
- Loja, R. (2019). *Determinación de la carga sísmica para tanques de hormigón de almacenamiento con geometría ovoide*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional UCuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32552>
- Moslemi, M., & Kianoush, M. R. (2012). Parametric study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks. *Engineering Structures*, 42, 214–230. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2012.04.026>
- Ortiz, B. (2016). *Cálculo Sísmico Espectral de Tanques Cilíndricos Verticales*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Sevilla]. Biblioteca Digital de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5783>
- Saria, A., Djermane, M., & Hadj-Djelloul, N. D. (2022). Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Analysis of Base Isolated Cylindrical Steel Tank. *Civil Engineering Journal*, 8(6), 1268–1287. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-06-013>

Standards New Zealand. (2009). NZS-3106:2009 Design of concrete structures for the storage of liquids

Vidal, G. (2007). *Diseño Sísmico de un estanque de hormigón armado. Comparación del Código norteamericano y las recomendaciones neozelandesas*. [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de la Santísima Concepción]. Catálogo Público UCSC.
<http://www.civil.ucsc.cl/investigacion/memorias/gvidal.pdf>