



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

MODELAMIENTO DE UN ESTANQUE DE ACERO INOXIDABLE PARA
ALMACENAMIENTO DE VINOS MEDIANTE MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO JAVIER ASTORGA MENDOZA

PROFESOR GUIA

RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES
JOSE LUIS ALMAZÁN CAMPILLAY

SANTIAGO – CHILE
AGOSTO 2012

Resumen

Al registrar las fallas en la infraestructura de la industria tras el evento sísmico del 27 de Febrero del 2010 registrado en el país, surge la necesidad de estudiar el comportamiento de las instalaciones productivas. En particular, las pérdidas facturadas por la industria del vino exigen una exhaustiva revisión de los diseños de sistemas de almacenaje y acopio.

El presente trabajo expone cinco modelos confeccionados en el programa de elementos finitos ANSYS, que pretenden representar el comportamiento no lineal de un estanque de acero inoxidable de pared delgada apoyado directamente en el suelo, frente a una carga lateral. También se incluyen dos estudios paramétricos complementarios relacionados con el comportamiento del manto cilíndrico. Tras el análisis de los modelos se pretende conocer la respuesta de la estructura, de tal manera de estimar la capacidad de resistir esfuerzos y los niveles de deformación alcanzados.

Los resultados obtenidos entregan valores de capacidad de resistir corte por parte de la estructura que van desde los 266 [kN] a los 2187 [kN]. Los desplazamientos laterales de techo registrados fueron desde los 3,2 [mm] a los 8,6 [mm]. Si bien en los modelos paramétricos es posible reproducir los modos de falla registrados por V. Sandoval (2011) y Almazán, et al (2011), en los otros modelos se registran modos de pandeo relacionados con el corte (en 3 de los 5 restantes), lo cual se asocia al perfil de cargas inducido a la estructura.

Finalmente se concluye que si bien, no se logra reproducir los modos de falla reportados en el terremoto para las geometrías típicas de los estanques de acero inoxidable de pared delgada para almacenamiento de vino apoyados en el suelo, los modelos entregan información de utilidad dependiendo el tipo de análisis requerido.

A mi familia, a mis amigos y a mis formadores

A todos los que de una u otra manera me ayudaron a forjar este camino

Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Introducción general.....	1
1.2	Motivación.....	1
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Objetivo General	2
1.3.2	Objetivos Específicos	2
1.4	Metodología.....	2
1.5	Alcances.....	3
1.5.1	Introducción:	3
1.5.2	Análisis de antecedentes:	3
1.5.3	Modelamiento:	3
1.5.4	Análisis:	3
1.5.5	Conclusiones:	4
2	Análisis de antecedentes.....	5
2.1	Trabajos relacionados con el modelamiento de estanques en ANSYS.....	5
2.1.1	Análisis de los efectos del terremoto del 27 de febrero de 2010 en estanques de acero inoxidable de pared delgada (EAIPD) con patas y desarrollo de un sistema de protección sísmica para estas estructuras [3]	5
2.1.2	Análisis transiente de un estaque de acero considerando interacción fluido estructura [4].....	8
2.1.3	Pandeo dinámico de estanques de acero anclados sujetos a una excitación sísmica horizontal [5]	14
2.2	Descripción del modelo	17
2.2.1	Geometría	17
2.2.2	Materiales	18
2.3	Antecedentes del programa	19
2.4	Modos de falla.....	20
2.5	Modelos simplificados	23

2.5.1	Procedimiento simplificado para análisis sísmico de estanques de almacenamiento de líquidos [1]	23
2.5.2	Pandeo plástico de mantos cilíndricos bajo cargas transversales [13].....	26
2.5.3	Tensión admisible en el manto según la NCh 2369 [8]	26
2.5.4	Esfuerzos según API 650 [7].....	26
3	Modelamiento.....	28
3.1.1	Condiciones de borde y supuestos	28
3.2	Elementos y funciones del programa.....	30
3.2.1	SHELL 181	30
3.2.2	SOLID 185	31
3.2.3	Contactos.....	31
3.2.4	Remote displacement	32
3.2.5	Mesh	32
3.3	Modelos	32
3.3.1	Manto cilíndrico.....	32
3.3.2	Modelos del estanque	34
3.3.3	Estanque – Elemento Solid	42
3.3.4	Estanque – Análisis de sensibilidad	43
4	Resultados y análisis	44
4.1	Modelos	44
4.1.1	Manto cilíndrico.....	44
4.1.2	Estanque – Modelo de masas en franjas.....	47
4.1.3	Estanque – Modelo de presiones en franjas	51
4.1.4	Estanque – Modelo pushover desplazamientos	54
4.1.5	Estanque – Modelo geometría modificada	56
4.1.6	Estanque – Modelo elemento solid.....	59
4.1.7	Estanque – Análisis de sensibilidad	62
4.2	Modelos simplificados	65
4.2.1	Procedimiento simplificado para análisis sísmico de estanques de almacenamiento de líquidos [1]	65

4.2.2	Pandeo plástico de mantos cilíndricos bajo cargas transversales [13].....	66
4.2.3	Tensión admisible en el manto según la NCh 2369 [8]	66
4.2.4	Esfuerzos según API 650 [7].....	67
4.3	Comparación y análisis de resultados.....	67
4.3.1	Curvas de capacidad.....	67
4.3.2	Tensiones en el manto y modos de falla	72
5	Conclusiones	75
5.1	El programa.....	75
	Figura 5-1: Comparación falla real – modelo paramétrico	76
5.2	Los modelos	76
6	Bibliografía.....	78

Índice de figuras

Figura 2-1: Tipos de estanque según apoyo. a) Estanque apoyado directamente sobre el suelo. b) Estanque con patas. [6]	6
Figura 2-2: Esquema del modelo en ANSYS de un EAIPD con patas [2]	7
Figura 2-3: Plano de diseño, Terminal ácido sulfúrico Mejillones [4]	8
Figura 2-4: Modelo ANSYS estanque de acero apoyado para el almacenamiento de ácido sulfúrico [4].....	9
Figura 2-5: Representación gráfica de nodos acoplados (en verde) [4]	10
Figura 2-6: Registro de aceleraciones en el hospital de Mejillones [4].....	11
Figura 2-7: Esfuerzos de corte y momento en la base [4]	12
Figura 2-8: Tensiones en el manto [4]	12
Figura 2-9: Primer modo convectivo $t=7,3$ [seg] [4]	13
Figura 2-10: Tabla resumen de resultados para estanque de acero para almacenamiento de ácido sulfúrico [4].....	13
Figura 2-11: Esquema de la geometría de los distintos estanques: a) $H/D=0,95$ b) $H/D=0,63$ c) $H/D=0,40$ [5].....	14
Figura 2-12: Distribución de presiones en la altura para una aceleración de suelo equivalente a 1 [m/seg^2] y un ángulo $\theta = 0$ [5].....	15
Figura 2-13: Diagrama con masas puntuales unidas al manto [5]	16
Figura 2-14: Tensiones equivalentes en el manto del estanque $H/D=0,40$ [5]	16
Figura 2-15: Deformada del modelo $H/D=0,90$ para distintos PGA [5].....	17
Figura 2-16: Geometría del estanque	18
Figura 2-17: Curva tensión deformación acero 304 [11].....	19
Figura 2-18: Pandeo punta de diamante [2].....	21
Figura 2-19: Pandeo pata de elefante [2]	21

Figura 2-20: Falla por corte [2]	22
Figura 2-21: Tabla para obtener las masas y alturas para cada modo [1]	23
Figura 2-22: Ábaco para obtener los coeficientes de cada modo[1]	24
Figura 2-23: Espectro de aceleraciones NCh 2369 [8]	24
Figura 2-24: Ábaco para obtener el coeficiente C_i [7]	27
Figura 3-1: Modelo de masa-resorte propuesto por Housner [1]	29
Figura 3-2: Curva tensión-deformación acero A304L.....	30
Figura 3-3: Elemento SHELL 181	31
Figura 3-4: Elemento SOLID 185.....	31
Figura 3-5: Esquema del manto cilíndrico [13]	33
Figura 3-6: Modelo manto cilíndrico	34
Figura 3-7: Distribución de masas en la altura propuesta por Veletsos y Shivakumar[5]....	35
Figura 3-8: Aceleración en el tiempo.....	36
Figura 3-9: Modelo de masas en franjas	37
Figura 3-10: Distribución de presiones en la altura	38
Figura 3-11: Distribución de presiones en el ángulo	38
Figura 3-12: Perfil de desplazamiento superior.....	39
Figura 3-13: Modelo pushover desplazamientos.....	40
Figura 3-14: Geometría modificada.....	41
Figura 3-15: Modelo elemento solid	42
Figura 3-16: Análisis de sensibilidad	43
Figura 4-1: Modelos mantos cilíndricos - tipo 1.....	44
Figura 4-2: Pandeo pata de elefante - cilindro tipo 1	45

Figura 4-3: Pandeo punta de diamante- cilindro tipo 7	45
Figura 4-4: Pandeo punta de diamante- cilindro tipo 7	46
Figura 4-5: Curva capacidad mantos cilíndricos	47
Figura 4-6: Deformación modelo masas en franjas	48
Figura 4-7: Deformación modelo masas en franjas	49
Figura 4-8: Curva corte basal - desplazamiento modelo masas en franjas.....	50
Figura 4-9: Tensiones en el manto – modelo masas en franjas.....	51
Figura 4-10: Deformación modelo presiones	52
Figura 4-11: Curva capacidad modelo de presiones en franjas	53
Figura 4-12: Tensiones en el manto – modelo presiones en franjas.....	53
Figura 4-13: Deformación modelo pushover desplazamientos.....	54
Figura 4-14: Curva capacidad modelo pushover desplazamientos	55
Figura 4-15: Tensiones en el manto – modelo pushover desplazamientos.....	56
Figura 4-16: Curva capacidad modelo geometría modificada	57
Figura 4-17: Deformación modelo geometría modificada	58
Figura 4-18: Tensiones en el manto – modelo geometría modificada.....	59
Figura 4-19: Deformación modelo elemento solid	60
Figura 4-20: Deformación modelo elemento solid	61
Figura 4-21: Tensiones en el manto – modelo elemento solid.....	62
Figura 4-22: Deformación modelo $t = 10\text{mm}$	63
Figura 4-23: Curva capacidad manto 10 mm.....	63
Figura 4-24: Curva capacidad manto 5mm	64
Figura 4-25: Deformación modelo $t = 5$ [mm].....	65

Figura 4-26: Comparación curvas de capacidad.....	68
Figura 4-27: Esquema del perfil de esfuerzos de corte en la altura normalizado.....	69
Figura 4-28: Máxima capacidad de corte basal [N].....	70
Figura 4-29: Máxima desplazamiento horizontal de techo [mm]	71
Figura 4-30: Comparación modelos rango lineal	72
Figura 4-31: Comparación tensiones máximas en el manto [MPa]	73
Figura 4-32: Comparación entre las tensiones máximas en el manto de modelos lineales con la admisible impuesta por la norma chilena 2369 y la tensión de fluencia del material [MPa]	73
Figura 4-33: Vector de tensiones principales en modelo geometría modificada. Detalle de tres puntos diferentes, en rojo el máximo principal, en azul el mínimo principal y en verde el promedio.....	74
Figura 5-1: Comparación falla real – modelo paramétrico	76

1 Introducción

1.1 Introducción general

Durante la evolución del hombre, uno de los grandes hitos ha sido el paso del nomadismo al sedentarismo. La capacidad de recolectar y guardar el alimento durante las estaciones abundantes, para luego ser consumidos en tiempos de escasez fue fundamental en esta transición. Dentro de la infraestructura utilizada para almacenar los bienes, se encuentran los estanques de acero, los cuales han sido utilizados para acopiar alimentos, combustibles, vino, entre otros.

Para comprender como se comporta el contenido en la estructura de acero se han confeccionado diversos modelos analíticos, siendo el más utilizado en estos momentos el que se basa en los estudios de Malhotra [1], válido para estanques apoyados en el suelo. De estos se desglosan las principales normas de diseño de estanques y es donde se basarán también algunos de los modelos computacionales a confeccionar y que se describen en el presente informe.

1.2 Motivación

Tras el terremoto registrado en el país el 27 de Febrero del 2010, quedaron al descubierto diversas falencias en la infraestructura de la industria nacional. En particular, el área vitivinícola sufrió pérdidas avaluadas en aproximadamente 250 millones de dólares, 125 millones de litros (Herrera et, al [2]) debido al daño de sus instalaciones de almacenaje, de las cuales en gran parte corresponden a estanques de acero inoxidable de pared delgada apoyados sobre el suelo (Sandoval [3]).

El análisis de las fallas desnudó la precariedad con la que se realiza el diseño de las estructuras de almacenaje, guiándose a menudo por normativas concebidas para otro tipo de almacenamientos, como estanques para petróleo, cuyas propiedades geométricas y su comportamiento difieren de los estanques de almacenamiento de vino. Es por ello que surge la necesidad de estudiar los mecanismos de falla a los que se ven enfrentados estas estructuras, de tal manera de conocer su comportamiento y mejorar su concepción.

La confección del modelo de un estanque en un programa de elementos finitos, permite observar tanto cualitativa como cuantitativamente la respuesta de la estructura durante y después la aplicación de solicitaciones externas. Esto permitiría evaluar la capacidad de un

estanque al momento de ser diseñado, o bien calificar los niveles de daños de una instalación luego de un evento sísmico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Confeccionar modelos de un estanque de acero inoxidable de pared delgada apoyado en el suelo, utilizando el programa de elementos finitos ANSYS, para luego compararlos y estudiar cual representa de mejor manera el comportamiento no-lineal de la estructura frente a una excitación externa.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modificar las condiciones de borde de los modelos computacionales, ya sea el tipo de apoyo o el perfil de cargas, con tal de detectar las diferencias en la respuesta de la estructura.
- Modificar tanto el perfil de cargas como la forma de aplicar las solicitaciones a la geometría, comparando cual modelo representa de mejor forma las presiones hidrodinámicas ejercidas sobre la pared del manto.

1.4 Metodología

La confección del trabajo de título se basa en una metodología orientada a cumplir con los objetivos anteriormente trazados. Esta se desglosa a continuación.

PRIMERO: Búsqueda, revisión y recopilación de antecedentes y memorias ya existentes relacionadas con el tema y los modos de falla registrados tras el terremoto del 27 de Febrero del 2010. Estudio del marco teórico necesario para la concepción de los modelos del estanque.

SEGUNDO: Estudio del programa de elementos finitos a utilizar, ANSYS. Confección de los modelos computacionales del estanque. Verificación del funcionamiento estructural de los elementos componentes de los modelos, análisis de la compatibilidad de deformaciones y de las condiciones de borde del sistema.

TERCERO: Análisis del comportamiento de la estructura frente a una solicitación externa. Validar los parámetros de modelamiento para reproducir los modos de falla.

CUARTO: Conclusiones.

1.5 Alcances

Esquemáticamente, la memoria se organiza en cinco capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación.

1.5.1 Introducción:

Se contextualiza el trabajo a realizar, explicando la motivación del mismo, así como sus objetivos.

1.5.2 Análisis de antecedentes:

Corresponde a la búsqueda de todo material que signifique un aporte al desarrollo y entendimiento de la memoria.

Se puede dividir en cuatro secciones: *Trabajos relacionados con el modelamiento de estanques en ANSYS, descripción del modelo, antecedentes del programa, modos de falla y modelos simplificados*. La primera estudia tres trabajos previos y que aportan a comprender el contexto del presente estudio. Los antecedentes del programa son aquellos que competen netamente a la herramienta computacional de elementos finitos, ANSYS, tales como manuales y literatura relacionada. En los modos de falla se identificarán las fallas más comunes de los estanques apoyados registradas tras el terremoto del Maule (27 de Febrero, 2010) .Finalmente se incluyen métodos simplificados que se asemejen al modelo y que permitan tener una referencia de la respuesta de este frente a un nivel de esfuerzos determinado.

1.5.3 Modelamiento:

En esta sección se explica cómo se procederá a modelar, describiendo las consideraciones a tomar y las condiciones de borde del modelo computacional. Se describen los cambios a realizar en el modelo y como se esperaría que se comportara con estos.

1.5.4 Análisis:

Se explicitan los resultados obtenidos, imágenes y detalles de la respuesta del estanque ante las solicitaciones aplicadas en cada modelo.

En esta sección se estudian los valores rescatados y las posibles fallas de la estructura, poniendo énfasis en el comportamiento no lineal, tanto a nivel de materiales (fluencia) como geométrico (pandeos locales).

Se incluye un resumen de los resultados.

1.5.5 Conclusiones:

Se entregan las observaciones finales del trabajo realizado, concluyendo en base a los resultados del modelo y se comparan tanto con los análisis simplificados, como con los datos tomados en terreno ([2] , [3]).

2 Análisis de antecedentes

2.1 Trabajos relacionados con el modelamiento de estanques en ANSYS

La revisión de diferentes estudios previos, entrega pautas en el análisis y el modelamiento, así como aporta información de utilidad para comprender el contexto del trabajo. A continuación se revisan tres documentos en los cuales se modelaron estanques de acero utilizando ANSYS: las memorias de Víctor Sandoval [3] y Giovanni Fecci [4], además de uno de los trabajos de Virella, et al. [5].

2.1.1 Análisis de los efectos del terremoto del 27 de febrero de 2010 en estanques de acero inoxidable de pared delgada (EAIPD) con patas y desarrollo de un sistema de protección sísmica para estas estructuras [3]

El terremoto del Maule (27 de Febrero, 2010) afectó gran parte del territorio nacional, dejando secuelas en la industria nacional, influyendo directamente en las estructuras de almacenamiento, en particular en los estanques de acero inoxidable de pared delgada utilizados en la guarda y fermentación.

Para analizar los daños provocados, se diferenciaron dos tipos de configuraciones: estanques apoyados directamente en el suelo (Figura 2-1a) y estanques con patas (Figura 2-1b).

Los estanques apoyados son la opción más utilizada para almacenar grandes volúmenes de líquido (hasta 2 millones de litros) y en la industria vitivinícola se usan para la guarda en gran cantidad de vino a granel y para la fermentación de vinos varietales. Están formados principalmente por cuatro partes: manto, fondo, techo y sistema de sujeción (Figura 2-1a). Además existen otras piezas secundarias como portalones y llaves de paso, las cuales son utilizadas en los procesos productivos.

Las zonas más susceptibles a sufrir daños producto de los efectos sísmicos son las partes bajas de los estanques, tales como el sistema de anclaje y la primera virola del manto, dado que es donde se producen las mayores sollicitaciones y fue en esas zonas donde se concentraron cerca del 90% de las fallas reconocidas tras el terremoto.

En el reconocimiento de daños se observó que la primera virola tenía espesores que iban de los 2 a los 3 [mm]. En esta se produjeron daños relacionados con pandeos locales (los cuales se detallan en 2.4), inducidos por los esfuerzos de flexo-compresión en el manto.

Otras fallas observadas fueron deformaciones en el techo provocadas por subpresiones tras un vaciamiento rápido; desprendimiento del fondo por fractura del cordón de soldadura y fallas en los sistemas de anclajes.



Figura 2-1: Tipos de estanque según apoyo. a) Estanque apoyado directamente sobre el suelo. b) Estanque con patas. **[6]**

A modo de solución para mitigar los efectos sísmicos sobre este tipo de estructuras, en los estudios de Sandoval [3] se desarrolló un sistema de aislación sísmica basado en las investigaciones realizadas desde el año 2003 por Almazán, et al (referenciados por Sandoval [3]).

Debido a la complejidad de las estructuras en cuestión, resulta necesario buscar métodos de análisis que permitan verificar su comportamiento. Es por esto que se propone un modelo computacional utilizando el programa de elementos finitos ANSYS, en su plataforma Workbench.

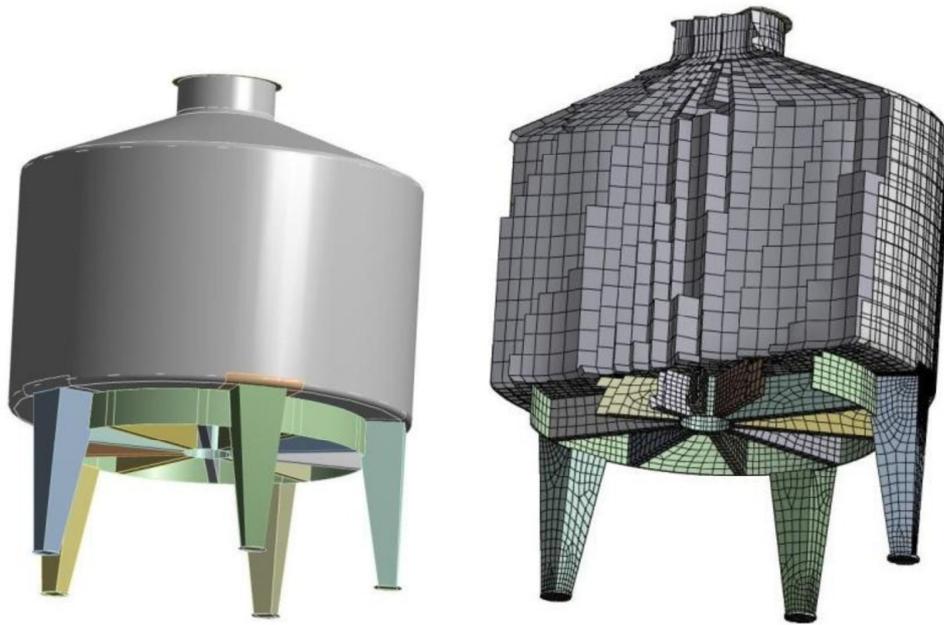


Figura 2-2: Esquema del modelo en ANSYS de un EAIPD con patas [2]

En la memoria revisada se confecciona un modelo lineal de un EAIPD con patas (Figura 2-2), tomando las siguientes consideraciones:

- Para modelar tanto el estanque como las patas, se utiliza el elemento SHELL181, el cual permite considerar grandes deformaciones y utiliza 4 nodos por elemento (ver sección 3.1 – elementos y funciones del programa).
- Para representar el fluido, se usa el elemento FLUID80, el cual puede compatibilizar análisis lineales y es el elemento definido por ANSYS para modelar este tipo de materiales.
- La interacción fluido-estructura se materializa definiendo el contacto “No Separation”, el cual permite el deslizamiento tangencial entre las superficies seleccionadas.
- El mallado de los elementos FLUID80 se hace de manera semi-automática utilizando la función SWEEP, la cual genera elementos hexaédricos a un tamaño a definir y de manera uniforme en la altura (Figura 2-2).

Para validar este modelo se comparan los resultados con la “Validación analítica y experimental” hecha en el trabajo de González, 2009 (referenciado en Sandoval [3]).

Finalmente concluye que cerca del 25% de los EAIPD fallaron, siendo las principales causas los bajos espesores y las estructuraciones poco estandarizadas. Con respecto al modelo en ANSYS, este permite estimar el comportamiento de un estanque con patas lleno de líquido en el rango elástico lineal, indicando las posibles zonas donde se desarrollen concentraciones de tensiones.

2.1.2 Análisis transiente de un estanque de acero considerando interacción fluido estructura [4]

El objetivo de este trabajo es estudiar la interacción fluido estructura de un estanque industrial de acero apoyado en su base, bajo la acción de cargas sísmicas. Para ello se confecciona un modelo lineal utilizando el software ANSYS, en su interfaz APDL (ver 2.3 – Antecedentes del programa). Al modelo se le aplica un análisis modal espectral y un análisis transiente.

La estructura estudiada corresponde a un estanque apoyado en el suelo, cuyo contenido es ácido sulfúrico y se ubica en las cercanías de Mejillones. Tiene 14,5 [m] de alto y un diámetro de 35 [m]. Su capacidad máxima, 8660 [m³], la alcanza cuando el líquido llega a los 9 [m] de altura.

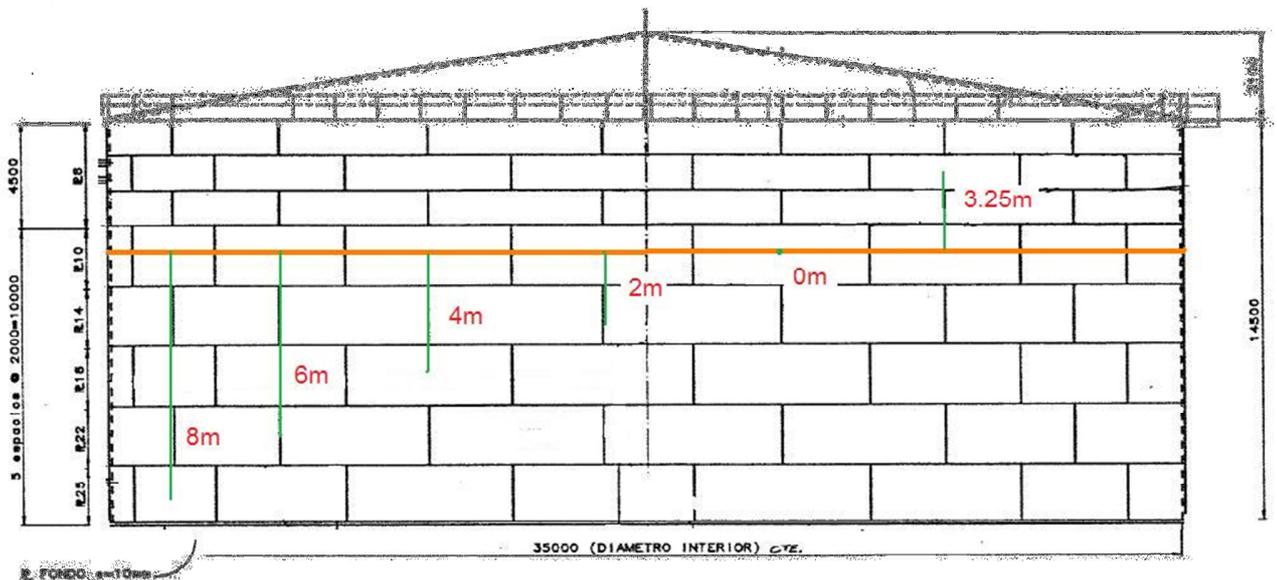


Figura 2-3: Plano de diseño, Terminal ácido sulfúrico Mejillones [4]

En la confección del modelo se toman las siguientes consideraciones:

- Para modelar el manto de acero, se utiliza el elemento SHELL63, el cual posee cuatro nodos y seis grados de libertad por cada uno: tres de traslación y tres de rotación
- El ácido sulfúrico es representado por elementos FLUID80.
- La confección de la malla se realiza manualmente. Para ello se generan puntos y líneas que delimitan las placas tipo SHELL63 cada 1,72 [m] en dirección tangencial y cada 1 [m] en la altura (Figura 2-4). Para la correcta interacción entre los elementos FLUID80 y los de placa, los nodos en contacto están acoplados en la dirección radial, de manera que el fluido desliza libremente en la dirección tangencial (Figura 2-5).

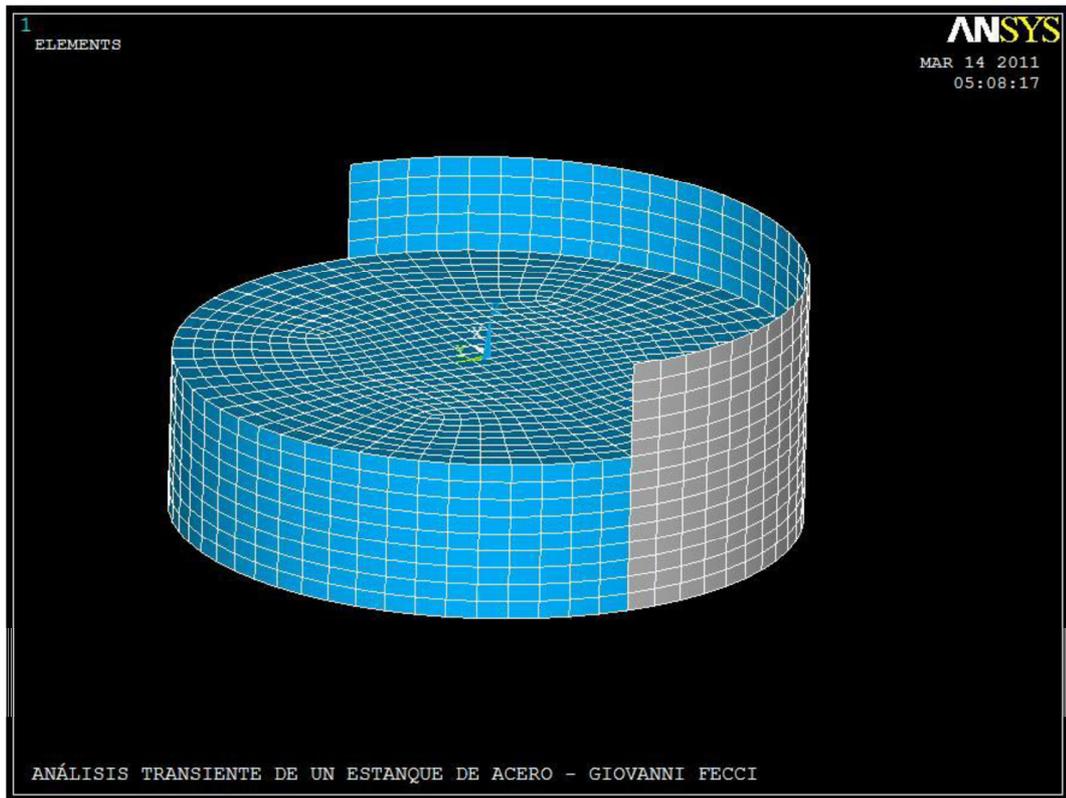


Figura 2-4: Modelo ANSYS estanque de acero apoyado para el almacenamiento de ácido sulfúrico [4]

- A los nodos de la base se les restringen los 6 grados de libertad, considerando el apoyo completamente empotrado.

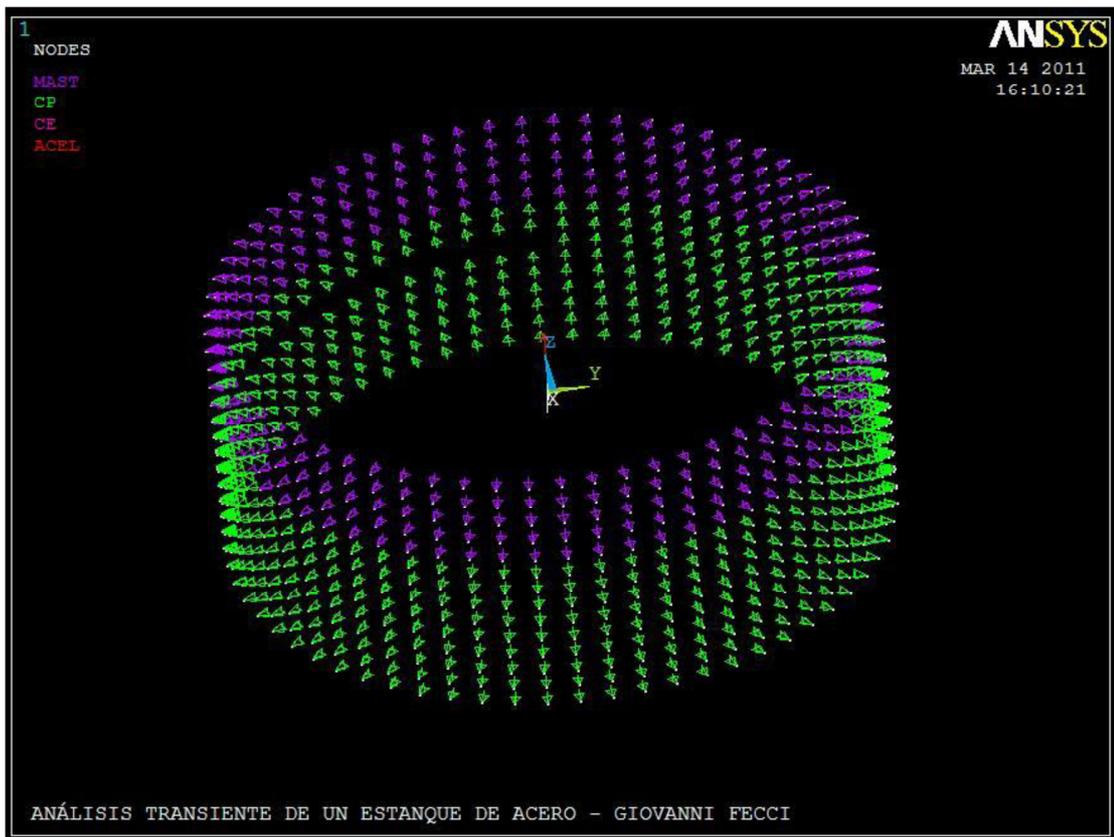


Figura 2-5: Representación gráfica de nodos acoplados (en verde) [4]

Para el análisis transiente se utiliza el registro del Hospital de Mejillones mostrado en la figura 2-6 (Boroschek et al, 2007, referenciado por Fecci [4]).

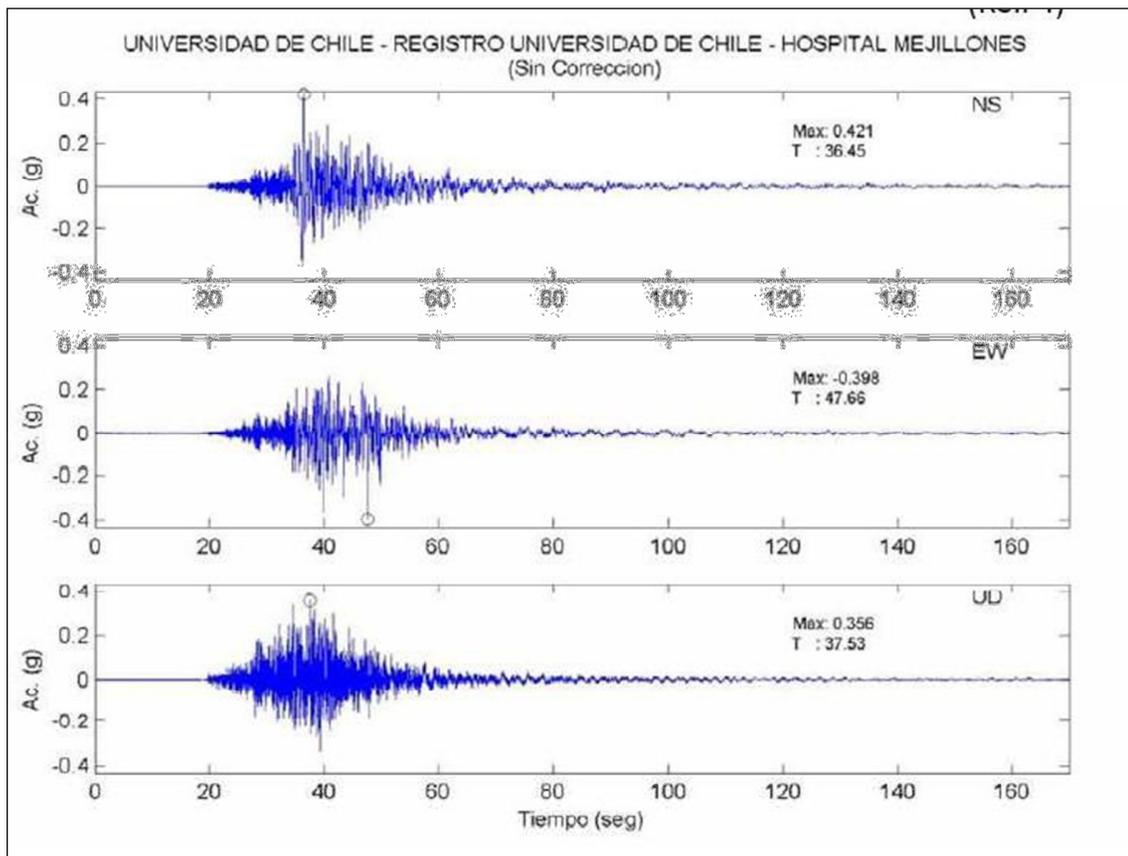


Figura 2-6: Registro de aceleraciones en el hospital de Mejillones [4]

Dado que en el trabajo actual no tienen mayor incidencia la magnitud de los resultados del trabajo revisado, se muestran sólo algunos datos obtenidos (Figuras 2-7, 2-8, 2-9).

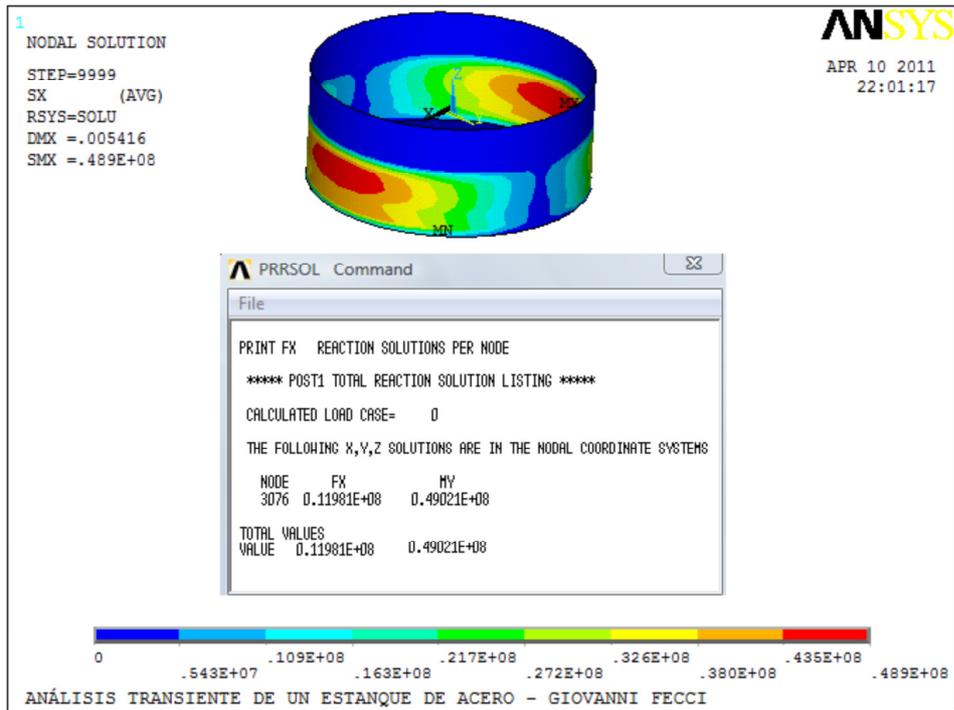


Figura 2-7: Esfuerzos de corte y momento en la base [4]

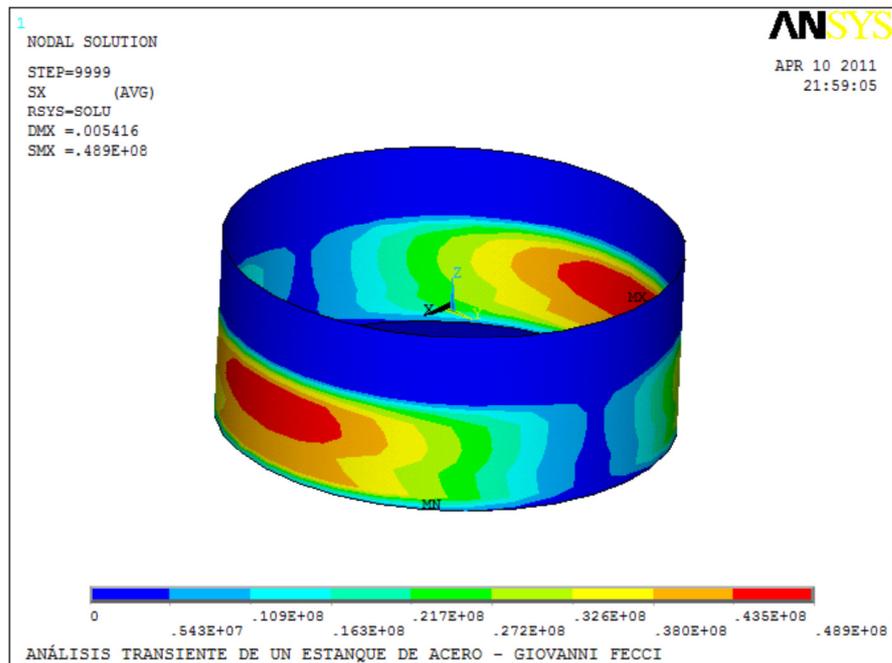


Figura 2-8: Tensiones en el manto [4]

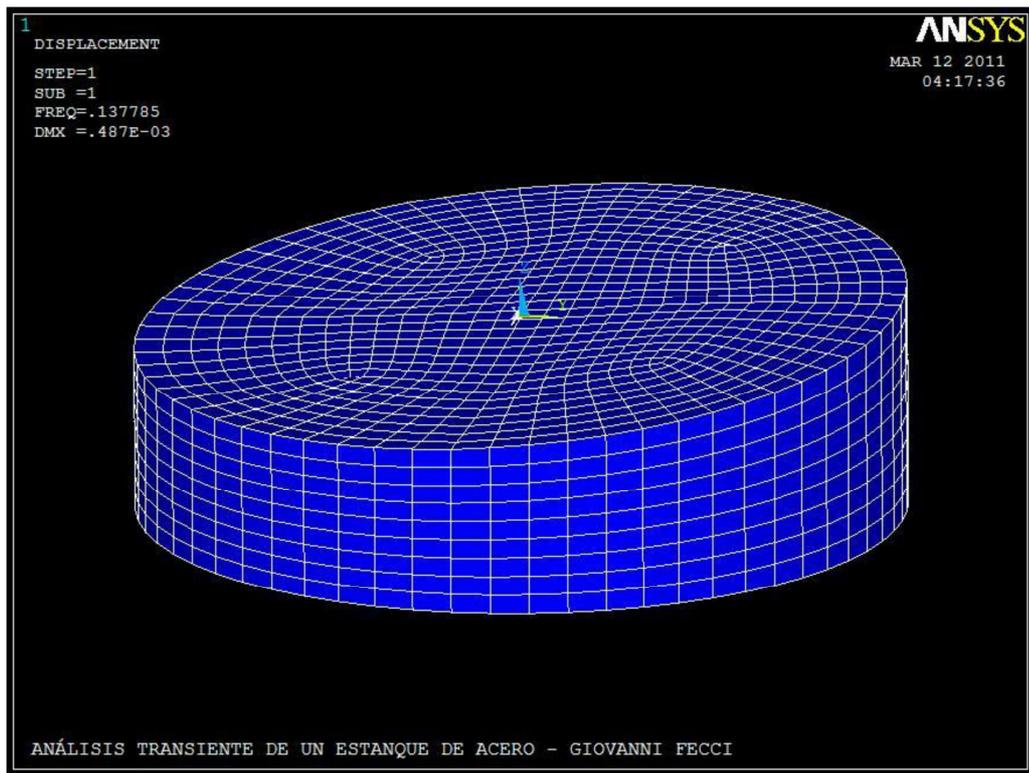


Figura 2-9: Primer modo convectivo $t=7,3$ [seg] [4]

Para validar los resultados obtenidos, se utilizan métodos analíticos para calcular parámetros del modelo, tales como los esfuerzos basales, tensiones en el manto, deformación axial del manto, altura de la ola ("sloshing") y periodos. Para ellos se basan en normativas tales como la API 650 [7], la NCh2369 [8], el modelo simplificado propuesto por Malhotra [1], el código neozelandés Priestley M.J.N., et al y la teoría de placas de Timoshenko (1959) (referenciados en Fecci [4]).

Como conclusiones compara los resultados obtenidos en los esfuerzos de corte y momento, para los análisis modal espectral y transiente, así como con los métodos analíticos de la API 650 y el propuesto por Malhotra (Figura 2-10).

Esfuerzos Basales	Corte[kN]	Momento Volcante [kN*m]	σ [Mpa]	d [m]
Ansys Espectral NCh2369	11980	49021	48.90	0.81
Ansys Tiempo-Historia	12100	49200	59.36	0.85
API650-NCh2369	16108	59746	44.32	-
Simplificado Malhotra NCh2369	14291	53250	-	0.35

Figura 2-10: Tabla resumen de resultados para estanque de acero para almacenamiento de ácido sulfúrico [4]

Si bien los valores obtenidos para el corte y momento basal no difieren en gran magnitud entre los modelos, se debe verificar que las solicitaciones y el comportamiento de la estructura (tensiones en el manto) se encuentren en el rango lineal, dado que al utilizar el elemento FLUID80 se parte de la premisa que el modelo es lineal, por lo que no serían válidos resultados fuera de los rangos elásticos.

2.1.3 Pandeo dinámico de estanques de acero anclados sujetos a una excitación sísmica horizontal [5]

Trabajo de investigación que estudia el comportamiento de tres estanques anclados al suelo y con techo cónico sujetos a un registro de un terremoto real. El objetivo es encontrar el peak de aceleración de suelo (PGA) horizontal crítico tal que se produzca pandeo en la parte superior del manto cilíndrico, producto de la respuesta hidrodinámica impulsiva del sistema. Para ello confecciona tres modelos de estanques cuyas tasas de altura-radio (H/r) son 0,40 , 0,63 y 0,95 respectivamente, con una altura de líquido correspondiente al 90% de la altura total del manto (Figura 2-11).

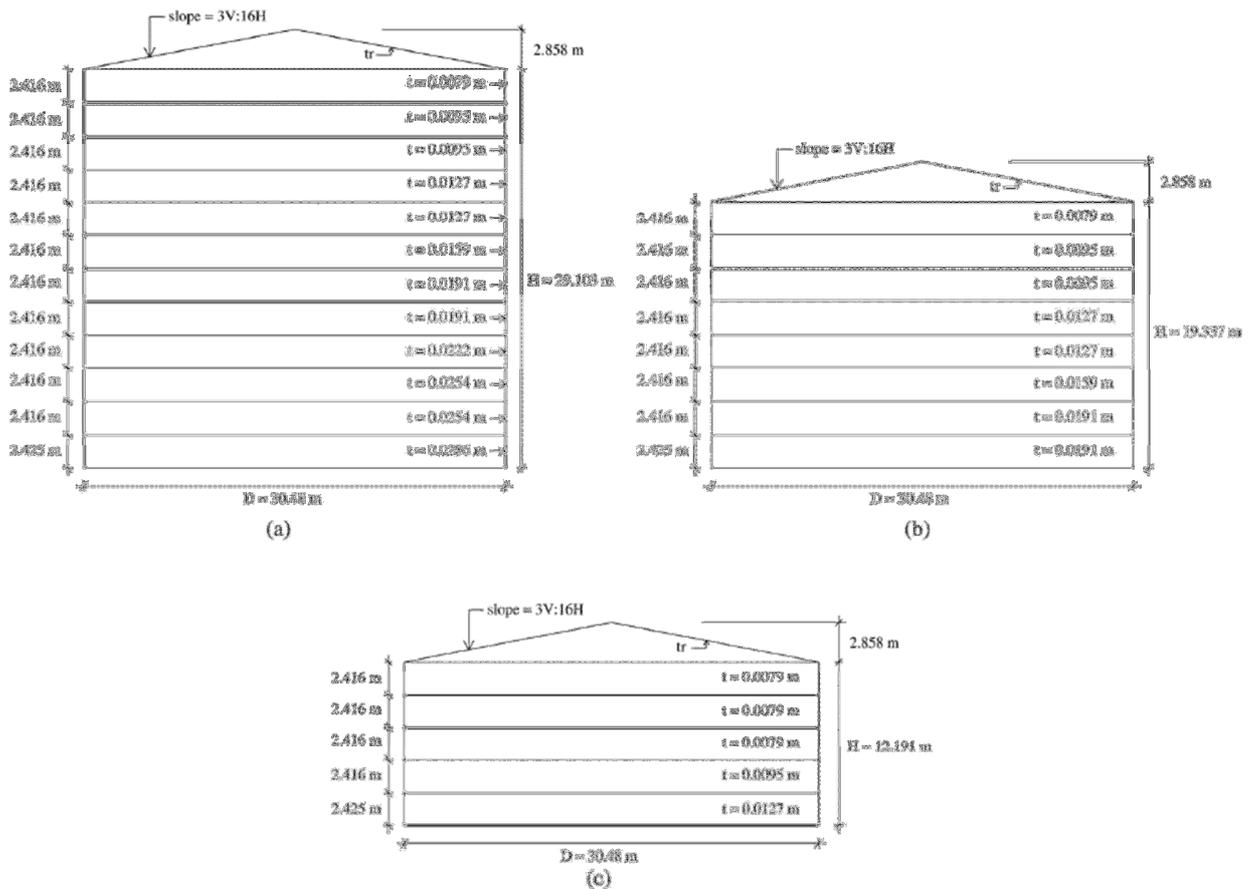


Figura 2-11: Esquema de la geometría de los distintos estanques: a) $H/D=0,95$ b) $H/D=0,63$ c) $H/D=0,40$ [5]

Los estaques son sometidos a los registros de acelerógramos obtenidos en El Salvador, 1986 y Parkfield, 1966. Para el análisis numérico se utiliza el programa de elementos finitos ABAQUS, considerando los siguientes supuestos en la modelación:

- Sólo se considerará la componente impulsiva de la respuesta hidrodinámica.
- El espesor de los mantos se diseña utilizando las consideraciones de serviciabilidad de la norma API 650 [7].
- Para modelar el manto cilíndrico se utiliza el elemento S4R (símil al SHELL181 de ANSYS), definido con 4 nodos e integración reducida.
- Para modelar las presiones hidrodinámicas debido al movimiento del sistema estanque líquido, se utiliza la expresión propuesta por Veletsos y Shivakumar (1997) y está definida por:

$$P_i(\eta, \theta, t) = c_i(\eta) \rho R \ddot{x}_g(t) \cos \theta \quad (2.1)$$

Donde P_i es la presión impulsiva relativa a la coordenada del nodo en el manto del estanque, la cual depende de los coeficientes impulsivos C_i (explicados en [5]), la densidad del fluido (ρ), el radio del estanque (R), la aceleración del suelo en el tiempo $\ddot{x}_g(t)$ y el coseno del ángulo tangencial θ .

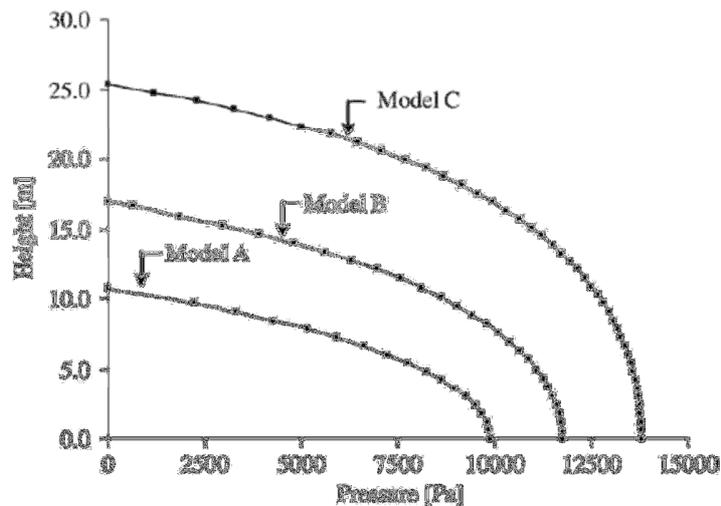


Figura 2-12: Distribución de presiones en la altura para una aceleración de suelo equivalente a $1 \text{ [m/seg}^2\text{]}$ y un ángulo $\theta = 0$ [5]

De estas presiones se deducen masas equivalentes puntuales, las cuales resultan de aplicar una aceleración de 1 [m/seg²] y cuya distribución en la altura sigue la misma forma que la distribución de presiones de la Figura 2-12.

- Para modelar la interacción fluido estructura a través de las masas puntuales, se conectan estas últimas a los nodos del manto por medio de elementos resorte como se muestra en la Figura 2-13. Estas uniones restringen el movimiento de las masas a sólo la dirección radial.

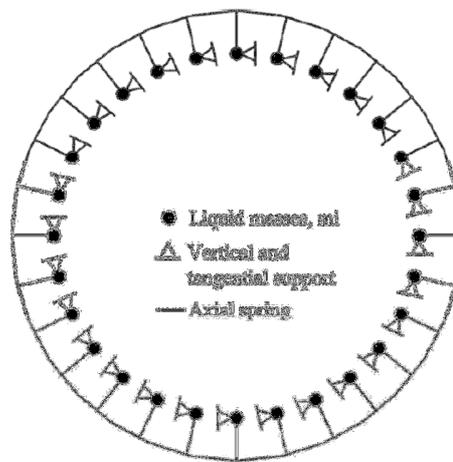


Figura 2-13: Diagrama con masas puntuales unidas al manto [5]

Tras el análisis, se muestran los resultados obtenidos, donde se pueden apreciar los modos de falla desarrollados en las estructuras (Figura 2-14)

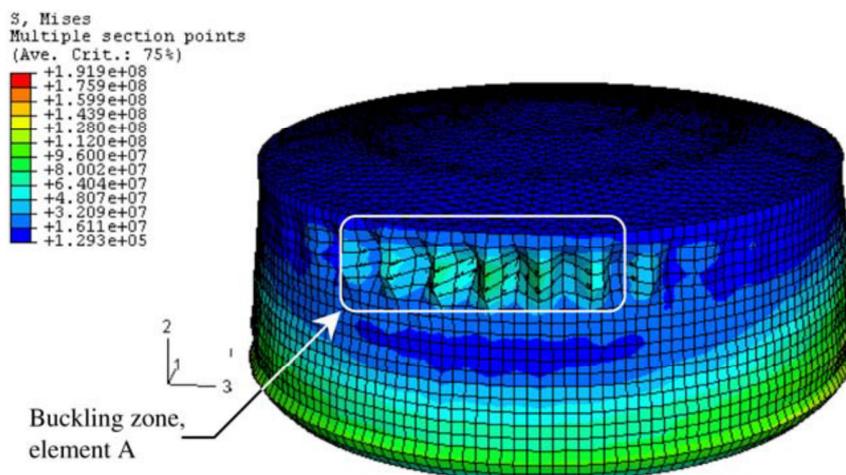


Figura 2-14: Tensiones equivalentes en el manto del estanque H/D=0,40 [5]

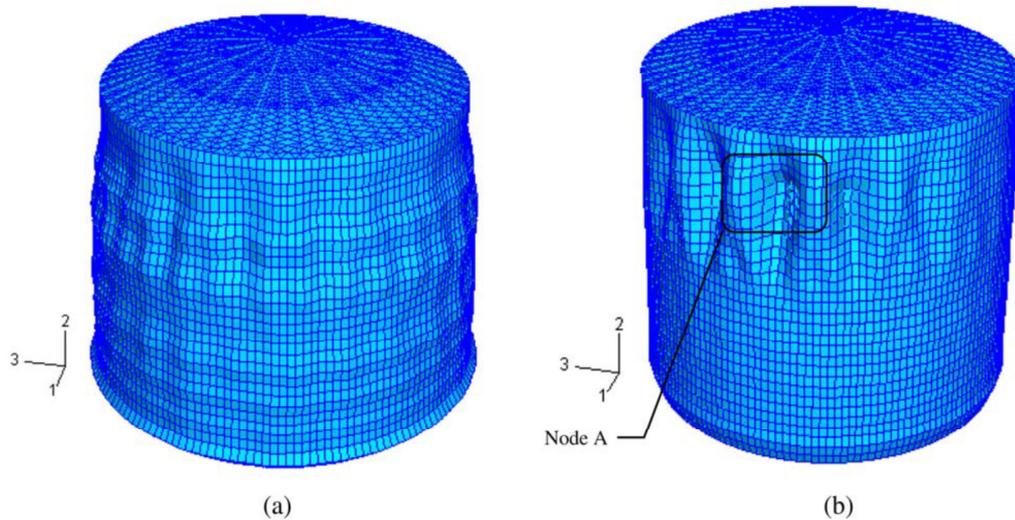


Figura 2-15: Deformada del modelo $H/D=0,90$ para distintos PGA [5]

Finalmente se concluye es posible reproducir los modos de pandeo en la parte alta del manto cilíndrico, además de los valores de PGA para los diferentes sismos.

En la figura 2-15 se aprecian deformaciones locales a lo alto del manto y en particular en el sector superior, sin embargo, estos pandeos no fueron reportados en Sandoval [3] ni en Herrera et, al [2], por lo que no representan un punto de comparación para el trabajo actual. Este comportamiento se debe entre otras razones al perfil de cargas aplicado a la estructura y a la asignación nodal de las masas, las cuales se punzonan en el manto.

2.2 Descripción del modelo

2.2.1 Geometría

Tal como se menciona en 2.1.1, los estanques apoyados en el suelo representan el 82% de la capacidad de procesamiento o almacenamiento de vino (CPA) [6]. Por esta razón, sumada a la existencia de un modelo de un EAIPD con patas confeccionado por el mismo trabajo, es que se decide estudiar un estanque apoyado en el suelo. Para ello se utilizará la geometría obtenida de una memoria de cálculo de un estanque de acero inoxidable para almacenamiento de vino apoyado estándar de 40000 litros de capacidad.

El estanque tiene un diámetro de 3,6 [m] y una altura de 4,8 [m]. El manto del estanque tiene un espesor de 2,5 [mm] para una altura de 0 a 1,4 [m], para luego cambiar a 2[mm] hasta los 4,8 [m] de altura (Figura 2-16). Tanto la plancha de fondo como el del techo tienen un espesor de 2,5 [mm].

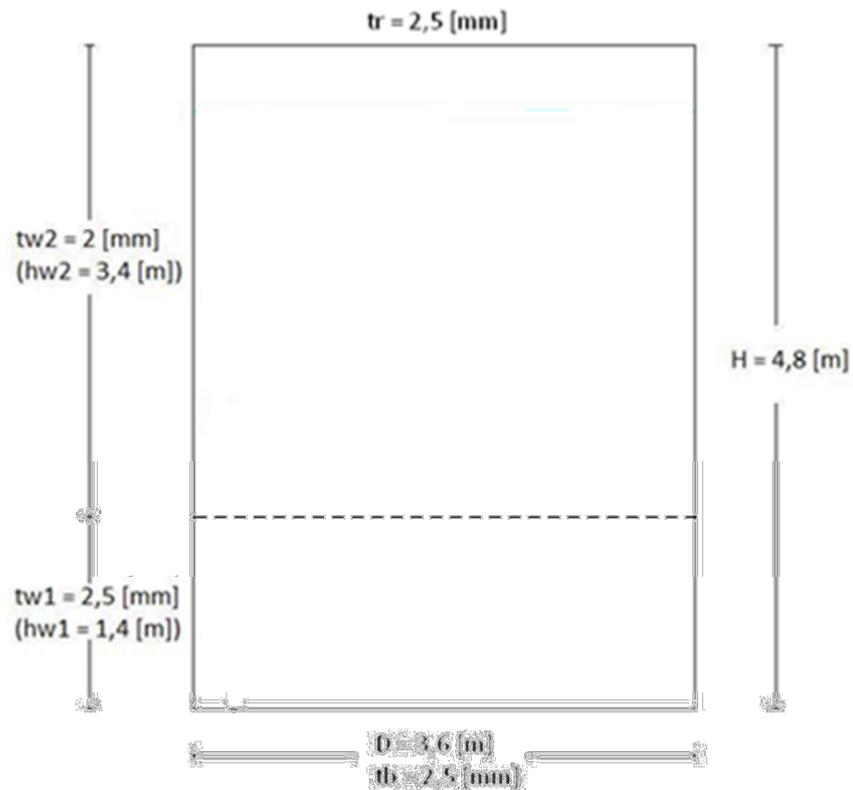


Figura 2-16: Geometría del estanque

2.2.2 Materiales

En los diseños de ingeniería, son diversos los requerimientos que se les exige a los materiales a utilizar. Propiedades como la soldabilidad, trabajabilidad y resistencia a la corrosión hacen del acero inoxidable un material apropiado para la construcción de estanques de acero para vino.

Según Barros [6], en la industria vitivinícola los aceros usados preferentemente son el 304L y 316L, según la norma AISI (referenciada en [9]), siendo el primero utilizado en la fabricación del manto y el segundo en la fabricación del techo.

El acero 304L contiene entre un 17-18% de cromo y un 8-11% de níquel [9], lo que le otorga resistencia a la corrosión, además de una mayor ductilidad, por lo que puede ser trabajado en frío. Su bajo contenido de carbono ("L") implica una mayor resistencia a la corrosión intergranular.

Las propiedades mecánicas del acero 304L contemplan un módulo de elasticidad que va desde los 193000 a los 200000 [MPa], alcanzando una tensión de fluencia de 210 [MPa] y una tensión última de 564 [MPa], llegando a una elongación de rotura de un 58% [10] . Estos valores representan una aproximación a la curva, ya que esta no tiene un límite de fluencia bien definido (Figura 2-17).

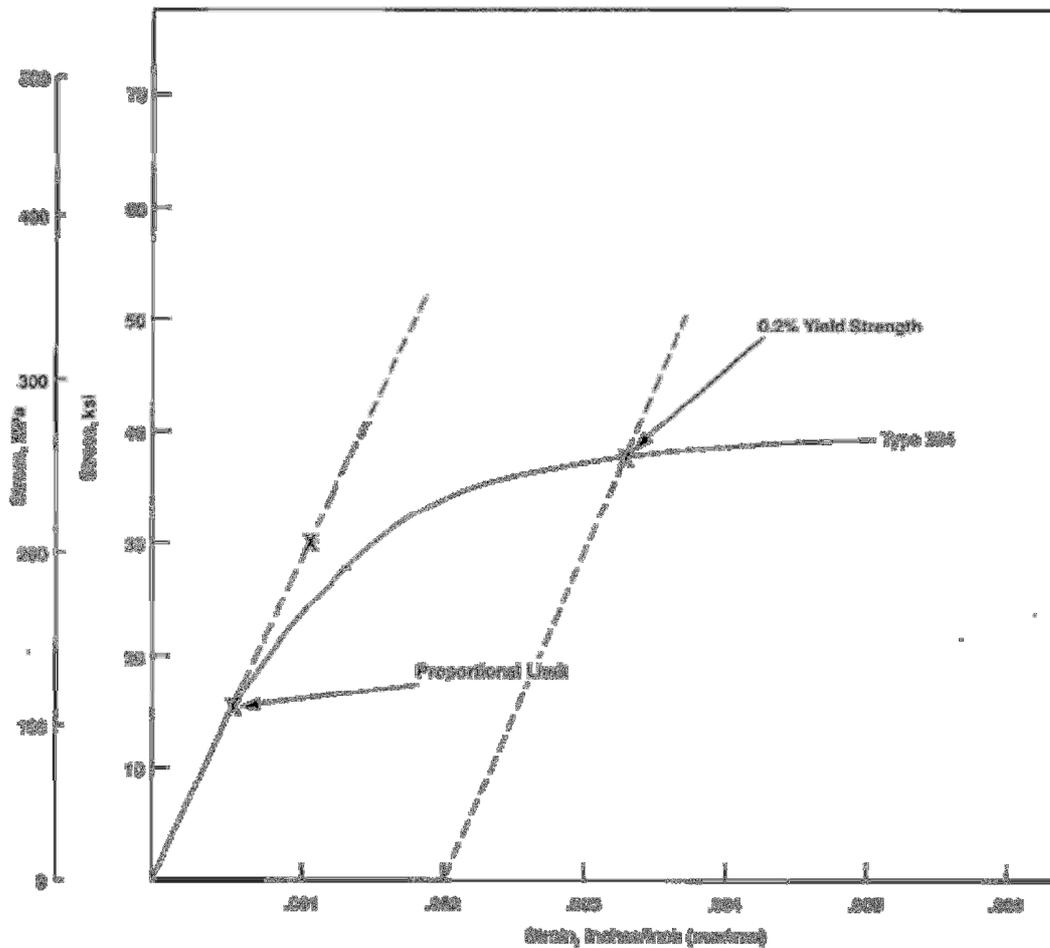


Figura 2-17: Curva tensión deformación acero 304 [11]

2.3 Antecedentes del programa

ANSYS es un paquete de plataformas enfocadas a resolver problemas de la mayoría de las disciplinas de la física, utilizando métodos de elementos finitos. Abarca herramientas que van desde la fluido-dinámica, hasta el electromagnetismo, pasando por la mecánica de estructuras.

El programa puede interactuar con el usuario mediante dos interfaces, el APDL, llamado también "ANSYS clásico", la cual se caracteriza por tener un input basado en líneas de comando; y el "Workbench", una plataforma de apariencia más sencilla e intuitiva, la cual integra las herramientas más utilizadas del programa mediante iconos y ventanas. Si bien Workbench no incorpora en su totalidad las herramientas del programa, es posible adjuntar líneas de código a los diferentes procesos, con tal de ingresar las tareas requeridas. En el presente trabajo, se utilizó la interfaz Workbench, por ser más intuitiva y de rápida adaptación para el usuario, sin embargo, fue necesario ingresar líneas de comando para realizar simulaciones específicas.

Entre las plataformas que incorpora ANSYS, se encuentra el "Mechanical Structural", el cual incorpora herramientas para solucionar problemas estructurales y térmicos, de carácter transiente y estático, así como encontrar modos de pandeos, entre otros. Es con este conjunto de herramientas con el que se trabaja en el modelo del estanque.

2.4 Modos de falla

En diversos eventos sísmicos se han registrado las fallas evidenciadas por los estanques de acero. Estas tienen diferentes causas, las cuales pueden ser fallas en el anclaje, fundaciones, problemas con la presión hidrodinámica, el techo, entre otras. A nivel del manto de la estructura, se han identificado y estudiado principalmente dos modos: el pandeo punta de diamante y el pandeo pata de elefante.

La falla por punta de diamante corresponde a una concentración de tensiones en el manto del estanque, lo que produce un pandeo no axisimétrico del manto. Esta puede ser debido a un cambio brusco de rigideces, como la que se da al cambiar el espesor de la pared, o en el sistema de anclajes (Figura 2-18). [1]

El pandeo pata de elefante está caracterizado por el pandeo elasto-plástico axisimétrico de la base del estanque. Este puede presentarse tanto en un sector localizado, como alrededor de la base del manto cilíndrico, donde se concentran los esfuerzos de flexo-compresión (Figura 2-19). [1]



Figura 2-18: Pandeo punta de diamante [2]



Figura 2-19: Pandeo pata de elefante [2]

Por último, una falla que se observó en menor medida fue la desencadenada debido a esfuerzos de corte que superaron la capacidad de los elementos. Esta se desarrolla cuando no se alcanzan a concentrar tensiones de compresión en la base, dado por la geometría del estanque o bien por el perfil de cargas solicitantes (Figura 2-20).

Debido a su poca recurrencia [3], las fallas de techo no serán incluidas en el análisis. De la misma manera las fallas inducidas por las subpresiones tampoco serán consideradas al ser una consecuencia de otras fallas.



Figura 2-20: Falla por corte [2]

2.5 Modelos simplificados

A modo de validar el modelo computacional, se compara con procedimientos manuales aproximados, los cuales permiten calcular esfuerzos resultantes en la estructura, modos de falla o bien tensiones admisibles tal que el manto del estanque no falle o se pandee, tal como lo hace Fecci [4] y Garcés [12].

2.5.1 Procedimiento simplificado para análisis sísmico de estanques de almacenamiento de líquidos [1]

Corresponde a un método simplificado presentado en Malhotra (2000) [1], el cual permite obtener valores aproximados del periodo de un estanque, así como reacciones de corte y momento basal frente a una perturbación dentro del rango lineal.

Supone como condición de apoyo, la estructura completamente anclada en la base. Concentra toda la masa del líquido en dos masas puntuales, las cuales representan a los dos modos principales (Figura 3-1) de la estructura. Para obtener los valores de estas masas, así como la altura a la que se ubican, se presentan ábacos y tablas que dependen de la relación *altura-de-líquido/radio*, los cuales entregan estas magnitudes expresadas como fracción de la masa del líquido y la altura de borde de este respectivamente.

H/r	C_i	$C_c [s\sqrt{m}]$	m_i/m_l	m_c/m_l	h_i/H	h_c/H	h_i'/H	h_c'/H
0.3	9.28	2.09	0.176	0.824	0.400	0.521	2.640	3.414
0.5	7.74	1.74	0.300	0.700	0.400	0.543	1.460	1.517
0.7	6.97	1.60	0.414	0.586	0.401	0.571	1.009	1.011
1.0	6.36	1.52	0.548	0.452	0.419	0.616	0.721	0.785
1.5	6.06	1.48	0.686	0.314	0.439	0.690	0.555	0.734
2.0	6.21	1.48	0.763	0.237	0.448	0.751	0.500	0.764
2.5	6.56	1.48	0.810	0.190	0.452	0.794	0.480	0.796
3.0	7.03	1.48	0.842	0.158	0.453	0.825	0.472	0.825

Figura 2-21: Tabla para obtener las masas y alturas para cada modo [1]

Otro ábaco entrega los coeficientes necesarios para obtener los periodos:

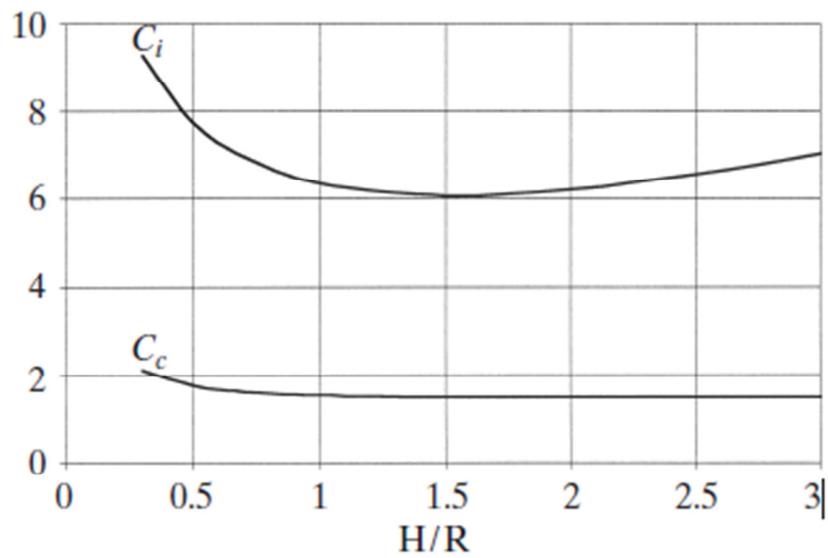


Figura 2-22: Ábaco para obtener los coeficientes de cada modo[1]

La magnitud de la aceleración aplicada es obtenida a partir del espectro de respuesta elástico propuesto en la NCh 2369 [8] (Figura 2-23), considerando los parámetros correspondientes a la zona III, suelo tipo 2.

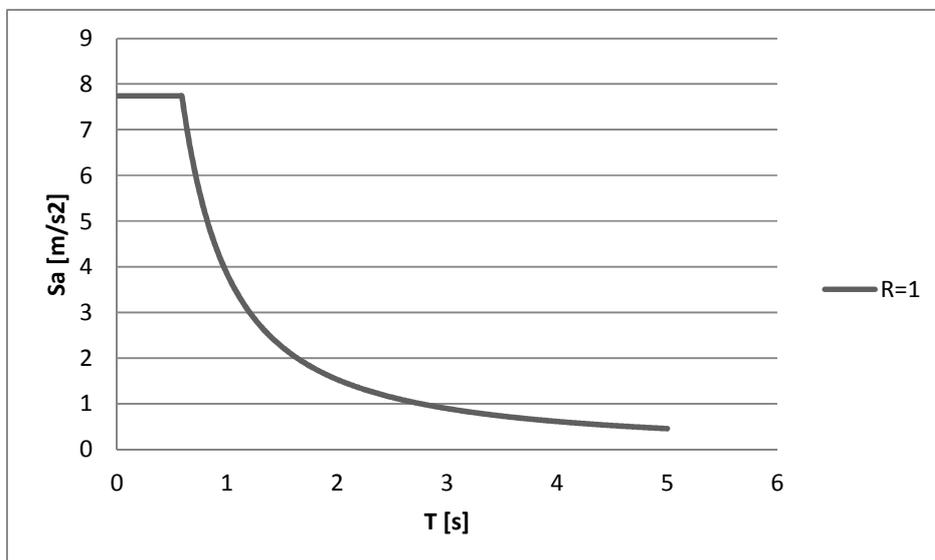


Figura 2-23: Espectro de aceleraciones NCh 2369 [8]

Los parámetros utilizados para generar el espectro son:

$$\begin{aligned}
 T' &= 0,35 \text{ [seg]} \\
 n &= 1,33 \\
 \xi &= 0,02 \\
 R &= 1 \\
 A_0 &= 3,92 \text{ [m/seg}^2\text{]} \\
 I &= 1 \\
 C_{\max} &= 0,79 \text{ [m/seg}^2\text{]}
 \end{aligned}$$

Para obtener el periodo del sistema, se propone la siguiente expresión:

$$T_{\text{imp}} = C_i \frac{H * \sqrt{\rho}}{\sqrt{\left(\frac{t}{r}\right) * \sqrt{E}}} \quad (2.1)$$

Utilizando la fórmula presentada en el punto 5.4.2 de la norma, en conjunto con el periodo y los parámetros obtenidos anteriormente de los ábacos y tablas, se calcula la aceleración aplicada en el modelo:

$$Sa = \frac{2,75 * A_0 * I}{R} * \left(\frac{T'}{T}\right)^n * \left(\frac{0,05}{\xi}\right)^{0,4} = 7,742 \left[\frac{m}{s^2}\right] \quad (2.2)$$

$$Q = (m_i + m_w + m_r) * S_e(T_{\text{imp}}) \quad (2.3)$$

$$M = (m_i * h_i + m_w * h_w + m_r * h_r) * S_e(T_{\text{imp}}) \quad (2.4)$$

Los parámetros a utilizar son:

- H : altura del contenido
- r : radio del estanque
- t : espesor equivalente del manto
- ρ : densidad del contenido
- E : módulo elástico del material del estanque
- C_i : coeficiente impulsivo (tabulado)
- m_i : masa asociada al modo impulsivo (tabulada)
- h_i : altura asociada al modo impulsivo (tabulada)

2.5.2 Pandeo plástico de mantos cilíndricos bajo cargas transversales [13]

Corresponde a un análisis paramétrico planteado por Zhang, et al [13]

Se define una tasa crítica para el pandeo plástico R_t con la cual se puede deducir el modo de falla del manto cilíndrico.

$$R_t = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma_y R}{E t} \quad (2.5)$$

Esta depende del coeficiente de Poisson (ν), la tensión de fluencia σ_y , el módulo de elasticidad del material E , el radio del cilindro R y el espesor t .

Se estima que el valor crítico para R_t se encuentra en el rango]0,120 , 0,147]. Para valores menores a este, se espera que el manto exhiba una falla tipo *pata de elefante*, de la misma manera que si el valor de R_t es mayor al recién mencionado, la falla sería tipo *punta de diamante*.

2.5.3 Tensión admisible en el manto según la NCh 2369 [8]

En el punto 11.7.4 se estipula que el manto del estanque debe diseñarse de tal modo que no exista pandeo local. Para ello, se define una tensión de compresión admisible, la cual se obtiene de la siguiente manera:

$$- \quad (2.6)$$

Este valor no debe ser mayor que el 80% de la tensión de fluencia del acero.

2.5.4 Esfuerzos según API 650 [7]

En el apéndice E de la norma API Standard 650 del año 2007, se presentan requerimientos mínimos para el diseño sísmico de estanques de almacenamiento. Con esto, se obtendrá el periodo de la estructura, así como los esfuerzos de corte y momento.

Para obtener el periodo, es necesario conocer un coeficiente C_i , el cual se desprende del siguiente ábaco y para este caso corresponde a un valor de 6.7.

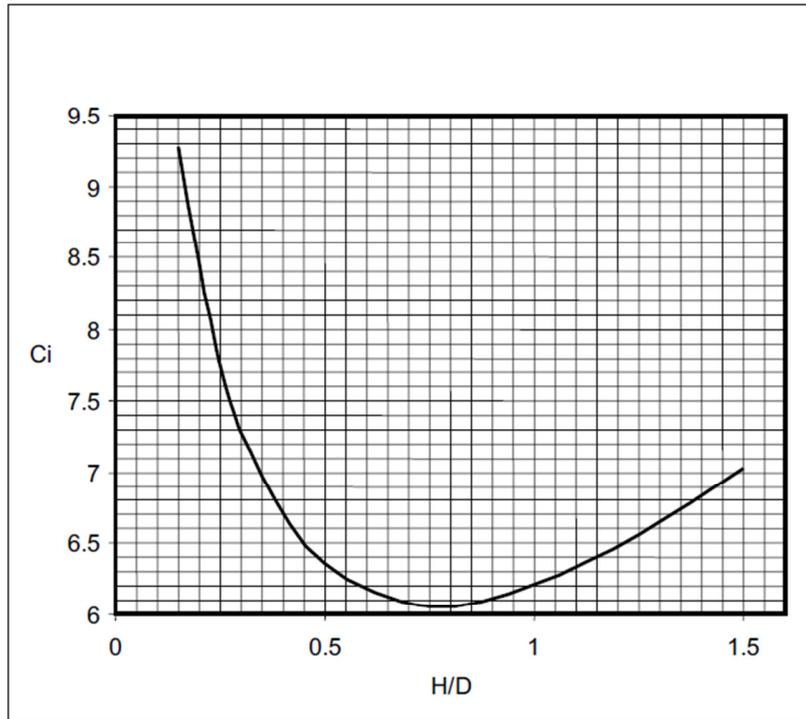


Figura 2-24: Ábaco para obtener el coeficiente C_i [7]

3 Modelamiento

En el proceso de estudio del estanque, se confeccionaron diferentes modelos, los cuales tienen como fin analizar tanto el comportamiento del sistema frente a diferentes solicitaciones, como también verificar la capacidad del programa computacional de reproducir ciertos patrones buscados. En esta sección se explica cómo se procederá a modelar, describiendo las consideraciones a tomar y las condiciones de borde de los diferentes modelos.

3.1.1 Condiciones de borde y supuestos

A modo de simplificar el análisis y enfocarse en los modos de falla y el comportamiento del manto del estanque, se toma una serie de consideraciones a nivel geométrico, de materiales o bien del comportamiento del sistema.

A nivel de geometría del estanque, se han ignorado las diferentes singularidades, como los son las conexiones, cambios de pendiente en la base o tuberías adjuntas a la estructura. Esto con el fin de simplificar el análisis y centrarse mayormente en los fenómenos relacionados con el manto. Esto se resume en una superficie del estanque uniforme, a priori sin singularidades que puedan generar concentraciones de tensiones forzadas.

El estanque en la base se supone simplemente apoyado en los bordes del manto, condición que luego se desea modificar, pasando a un apoyo discreto, que representaría mejor a los estanques apoyados con sillas de pernos (sistema de sujeción).

Al modelar el líquido y los esfuerzos que este impone sobre las paredes de la estructura, se considerará que el estanque se encuentra completamente lleno. Esto guarda relación con el proceso productivo del vino y el uso de las cubas de acero, ya que estas se encuentran a máxima capacidad el mayor tiempo del año [6]. Esto repercutirá en la forma de analizar el modelo, como se expone más adelante.

La base de cómo se abordará el sistema estructural son los estudios de Housner, Veletsos y Malhotra presentados en Virella et, al (2006) [5]. En sus estudios se plantea un modelo de masas equivalentes, las cuales representan los modos de líquido contenido en el estanque. Se reconocen dos modos principales: el modo convectivo y el modo impulsivo (Figura 3-1). El primero representa el fenómeno de *sloshing* del líquido y corresponde a como se mueve una fracción superior del contenido, la cual tiene un periodo más bajo que su símil inferior y genera esfuerzos tanto en las paredes del estanque, como en el techo de este. El segundo

modo identificado, corresponde al modo impulsivo, el cual representa la fracción inferior del líquido, aquella que se mueve solidaria al estanque mismo y tiene un periodo más alto. [5]

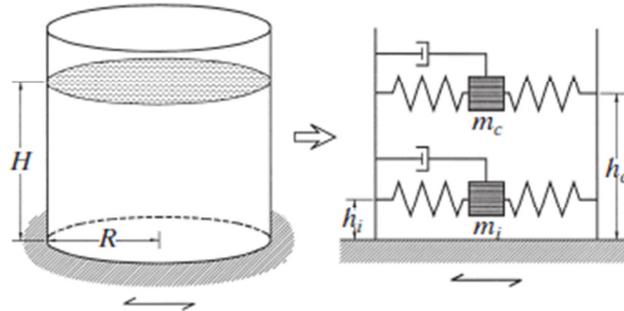


Figura 3-1: Modelo de masa-resorte propuesto por Housner [1]

Como anteriormente fue mencionado, entre las simplificaciones está el considerar el estanque completamente lleno. Esto implica que el modo convectivo desaparece, ya que no existe el espacio para que el oleaje del líquido, por lo que el modelo se reduce a tan solo el modo impulsivo.

Dado lo mencionado anteriormente, el modelo computacional se basará en las solicitaciones inducidas por el único modo principal, por lo que se buscará relacionar el perfil de presiones, fuerzas o desplazamientos a lo indicado por Malhotra [1]

En relación al material, se utilizará la ley constitutiva bilineal del acero inoxidable no-lineal que incorpora el propio ANSYS (Figura 3-2), considerando los parámetros de módulo de Young, tensión de fluencia y tensión última, nombradas en 2.1.2. Si bien no corresponde al modelo más cercano a la curva original, para el análisis numérico es suficiente para representar la no-linealidad del material.

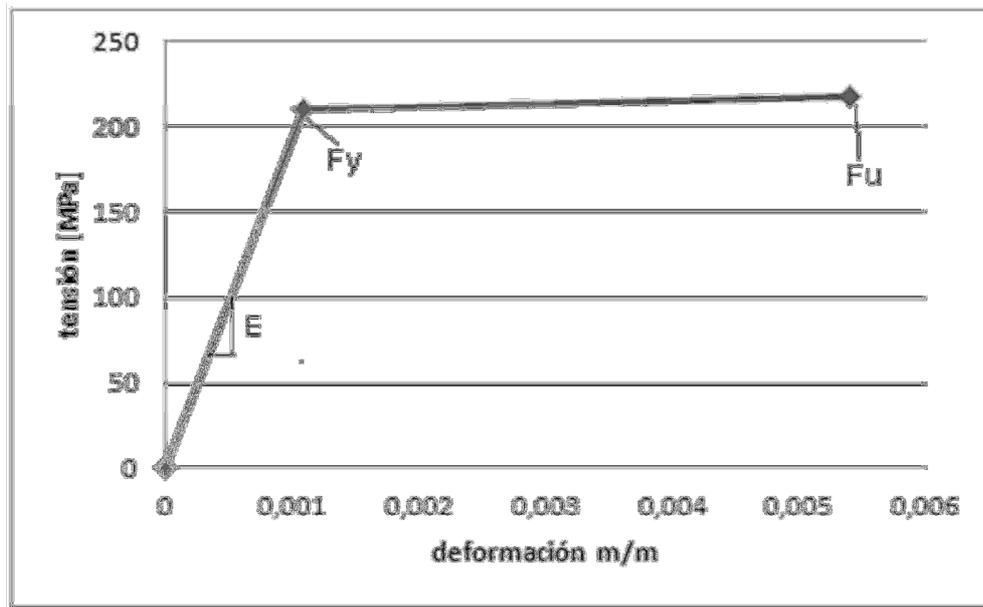


Figura 3-2: Curva tensión-deformación acero A304L

3.2 Elementos y funciones del programa

En la confección de los modelos computacionales, se utilizan elementos y funciones que puedan representar y reproducir los fenómenos estudiados. Entre los criterios para discernir entre los tipos de elementos, son sus funciones y que sean compatibles con los requerimientos del modelo, como las no-linealidades y las grandes deformaciones.

Algunos de estos elementos el programa los elige automáticamente dadas las sollicitaciones de la modelación.

3.2.1 SHELL 181

Elemento de cuatro nodos, con seis grados de libertad por nodo: tres traslaciones y tres rotaciones, que por defecto utiliza integración reducida. Este elemento se puede utilizar para aplicaciones de grandes deformaciones y rotaciones, además de análisis no lineales. Es utilizado para la confección del manto y techo en los modelos del estanque apoyado.

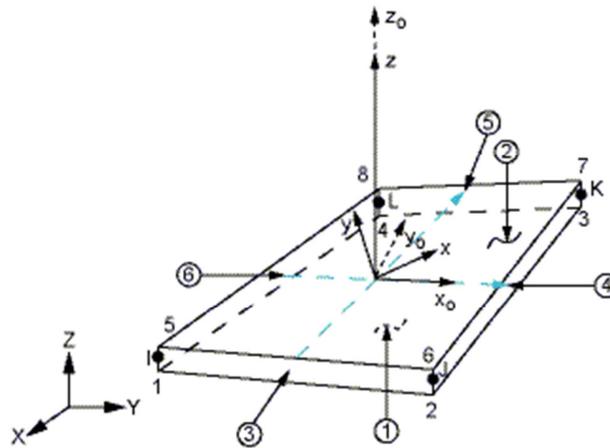


Figura 3-3: Elemento SHELL 181

3.2.2 SOLID 185

Elemento utilizado para modelaciones en 3-D, compuesto por ocho nodos con tres grados de libertad cada uno, tres traslaciones. Es capaz de simular materiales incompresibles, así como compatibilizar grandes deformaciones. Se usa para modelar el fluido en el modelo descrito en 3.2.6.

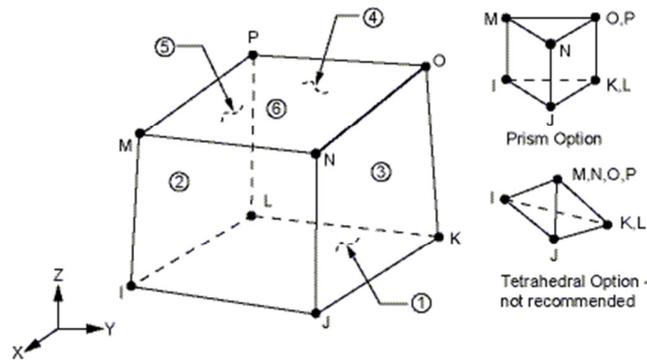


Figura 3-4: Elemento SOLID 185

3.2.3 Contactos

Se generan contactos entre las distintas partes de la geometría, de tal manera que se representen de mejor manera los supuestos y condiciones de borde de cada modelo. Para imponer la condición de continuidad entre los mantos de distinto espesor que conforman la estructura, se utiliza el tipo de contacto "bonded". En el caso de la interacción del fluido con

el estanque, se define un contacto "no-separation", idealizando la una unión sin roce entre ambos cuerpos, los cuales pueden deslizar entre si libremente sin despegarse.

3.2.4 Remote displacement

Corresponde a un desplazamiento o rotación del nodo, superficie o borde seleccionado. Es necesario definir previamente un eje de coordenadas, tal que las rotaciones se realizan con respecto a este. Es posible definir el comportamiento del objetivo como "rígido", de tal manera que este no se deforme al efectuar el desplazamiento. Una aplicación de esto último es el definir un diafragma rígido en la estructura al desplazarlo lateralmente.

3.2.5 Mesh

Tras la confección de la geometría, se define en cuántos elementos se dividen cada cuerpo. En el caso del manto, se controla tanto la forma como el tamaño de los elementos, utilizando las funciones "Mapped Face" y "Face Sizing" respectivamente. La primera genera un patrón de meshing uniforme en la cara seleccionada, eligiéndose cuadriláteros dada la geometría del modelo. Face Sizing define el tamaño de los elementos a generar, lo que determina también el número de nodos y elementos a utilizar, factor directo del tiempo de procesamiento del programa. Al modelar el fluido, se genera una grilla en la base, la que luego es replicada en la altura utilizando la función Sweep.

3.3 Modelos

3.3.1 Manto cilíndrico

En un principio y a modo de familiarizarse con el programa a utilizar, se confeccionaron modelos relativamente simples, como una primera aproximación al estanque analizar, basados en los estudios de Zhang, et al. [13]

Entre los objetivos se encuentra el reproducir los modos de pandeo comúnmente observados en este tipo de estructuras y descritos en 2.4. También se estudia los tipos de elementos idóneos para el modelamiento en ANSYS, de tal manera que se puedan reproducir los tipos de pandeo esperados.

La geometría corresponde a mantos cilíndricos empotrados en la base, de altura 800 [mm], radio 100 [mm] y un espesor que varía según el tipo de estanque, los cuales se definen en el estudio (Figura 3-5). Siguiendo la nomenclatura del artículo [13] se analizaron el cilindro tipo 1, cuyo espesor es de 2 [mm] y el tipo 7, el cual corresponde a un cilindro de espesor 0,8 [mm]. La elección de estas configuraciones es tomada consciente de la predisposición a

un modo de falla específico que se desea, siendo el tipo 1 relacionado con el modo “pata de elefante” y el tipo 7 con la “punta de diamante”.

El material a utilizar, es acero A36, cuya ley constitutiva está definida por una curva bilineal, de tensión de fluencia igual a 295 [MPa], módulo de elasticidad 200000 [MPa] y tensión última 458 [MPa]

A las estructuras se aplican dos cargas. La primera corresponde a una carga axial de compresión y que equivale a un 15% de la tensión de fluencia material, es decir:

$$(3.1)$$

La segunda tiene relación con una carga aplicada en el extremo superior del cilindro y que se materializa en el modelo como un desplazamiento horizontal monotónico creciente en el eje x (Ver figura 3-6).

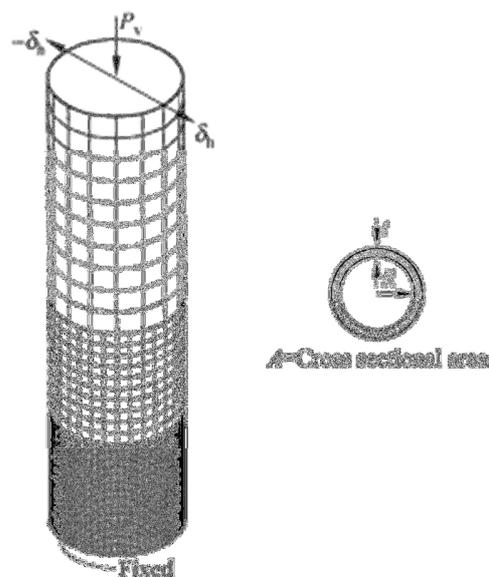


Figura 3-5: Esquema del manto cilíndrico [13]

Para el modelo en ANSYS se utilizó el elemento tipo SHELL 181, dada su capacidad de compatibilizar grandes deformaciones y giros, además de las ventajas a nivel de tiempo de procesamiento que este entrega, en comparación con elementos tipo SOLID. Se aplica un mesh de 1 [cm] al manto del cilindro. -

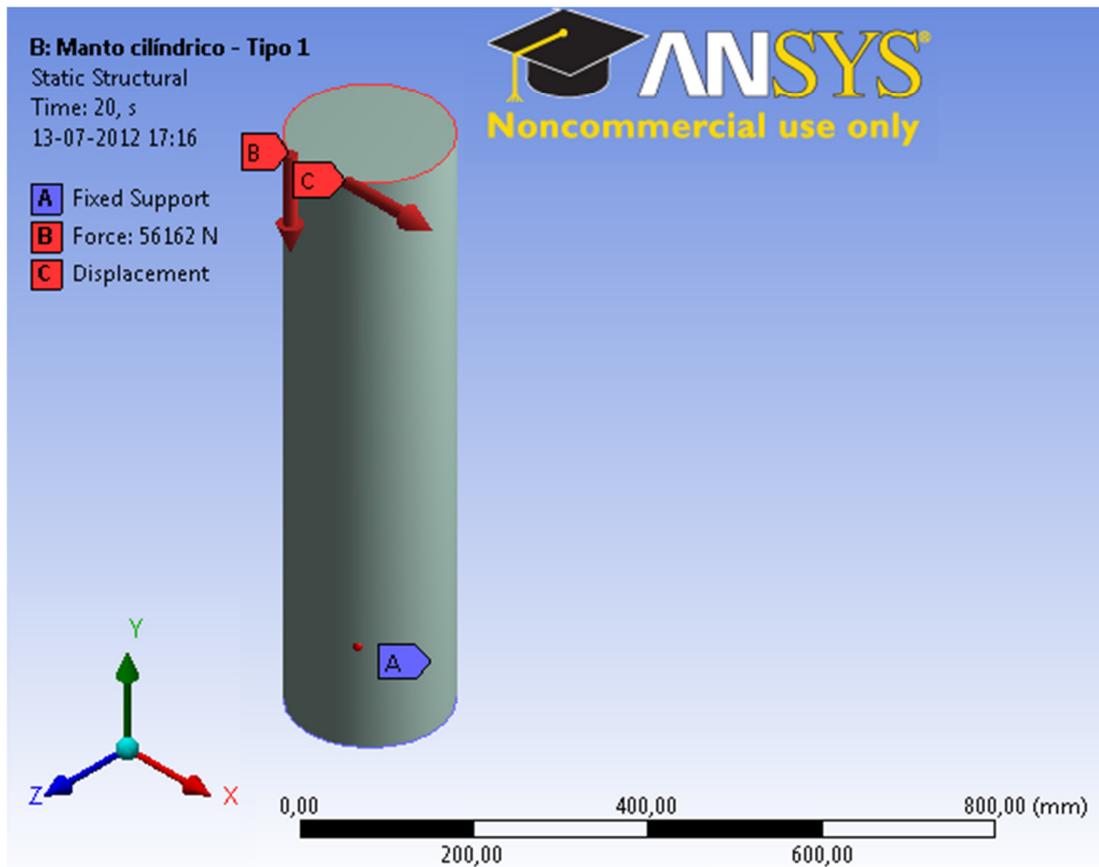


Figura 3-6: Modelo manto cilíndrico

3.3.2 Modelos del estanque

Para conocer la respuesta de la estructura frente las sollicitaciones fluido-dinámicas del contenido, se toma como base el modelo de Malhotra [1]. Se confeccionan diversos modelos que se acercan al perfil de presiones postulado, observando en cada uno de ellos el comportamiento del estanque. Por otro lado, se le aplica un pushover, aplicando un desplazamiento en el extremo superior de este.

3.3.2.1 Estanque – Modelo de masas en franjas

En un análisis de tipo transiente, se aplica una aceleración sinusoidal al estanque (Figura 3-8).

Se divide la geometría del estanque en doce franjas de 200 [mm] de altura. A cada franja se le asignan las propiedades tanto del material a utilizar, así como del espesor correspondiente. Siguiendo la distribución de presiones propuesta por Veletsos y

Shivakumar [5] , se une una masa puntual a cada franja, la cual representa la masa del líquido equivalente (Figura 3-7).

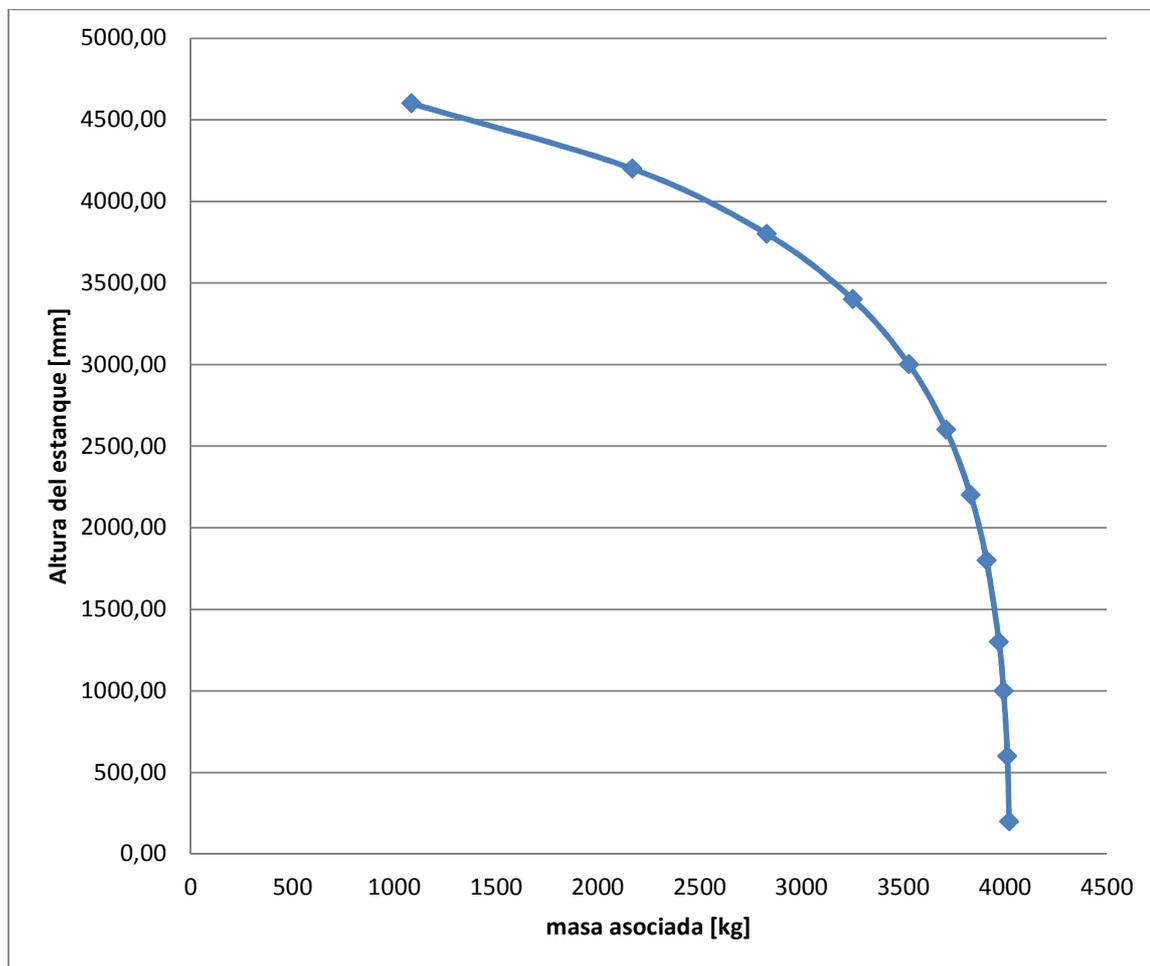


Figura 3-7: Distribución de masas en la altura propuesta por Veletsos y Shivakumar[5]

A la geometría se le aplican tres tipos de solicitaciones: la presión hidrostática, el peso propio y las fuerzas inerciales producto de aceleraciones. Las dos primeras corresponden al caso estático, por lo que son aplicadas inicialmente. El peso propio se representa con una fuerza vertical equivalente a la masa por la aceleración de gravedad. (Figura 3-9)

La aceleración se aplica ingresando líneas de comando. Corresponde a una onda definida arbitrariamente de periodo 0,5 [seg], cuya amplitud aumenta después de cada periodo. La excitación comienza luego del primer segundo, dado que antes de eso se cargan las solicitaciones iniciales.

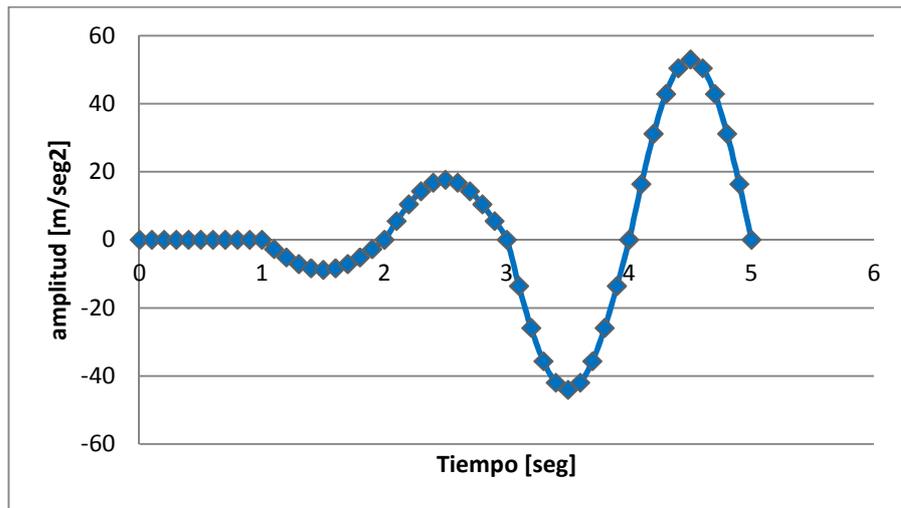


Figura 3-8: Aceleración en el tiempo

Este patrón de aceleraciones (Figura 3-8) se define para analizar el comportamiento del estanque en el transcurso de los pasos de convergencia (tiempo [seg]).

El estanque se encuentra simplemente apoyado en su base. Este apoyo se distribuye a lo largo de todo el borde basal, sin embargo se puede modificar el modelo discretizando el apoyo en 6 arcos distribuidos simétricamente, los cuales representan las sillas con las que se apoyan los estanques sin patas.

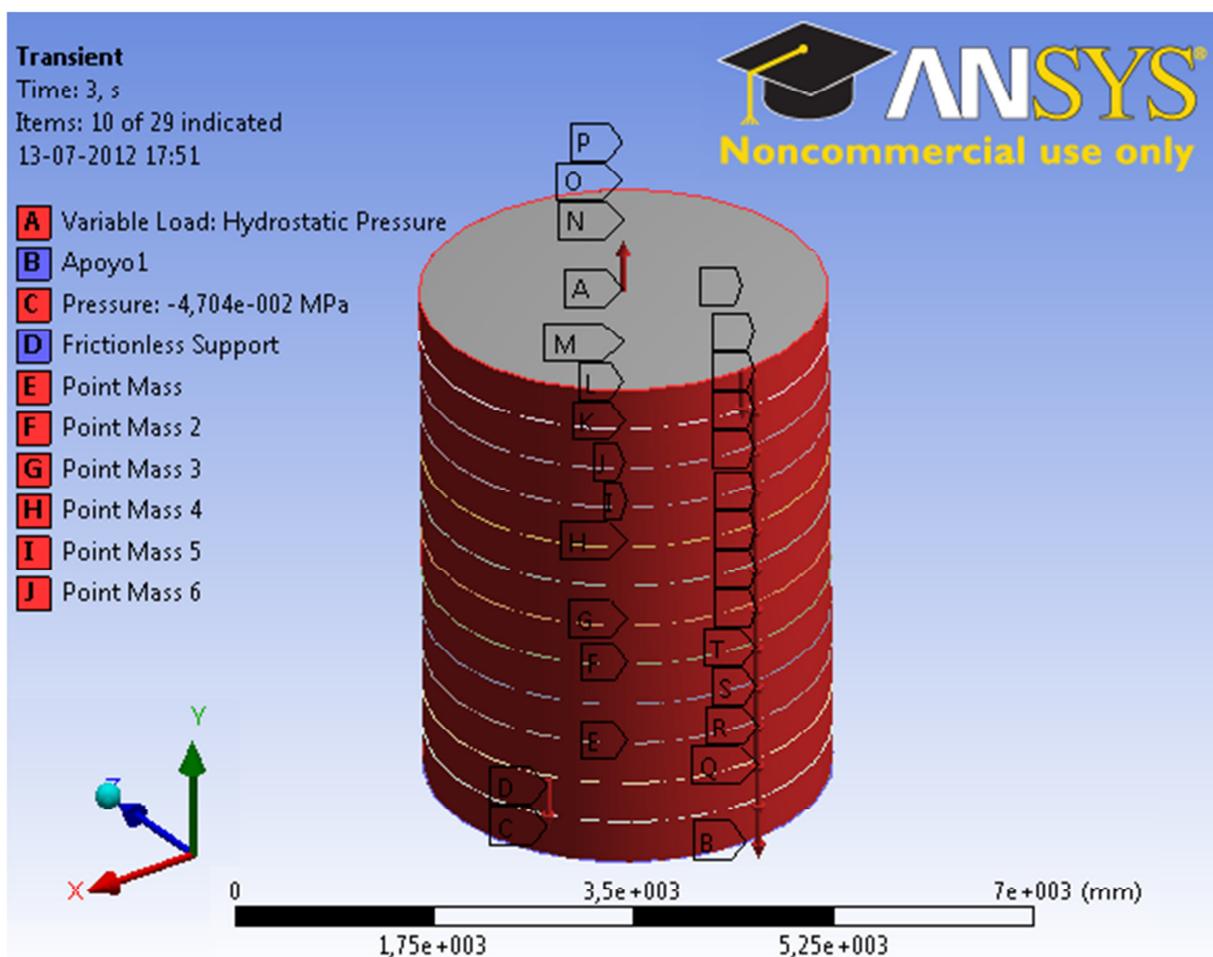


Figura 3-9: Modelo de masas en franjas

3.3.2.2 Estanque – Modelo de presiones en franjas

Utilizando la misma geometría del modelo anterior, se hace un análisis estático del estanque sometido a presiones normales al manto, las cuales varían en el ángulo perpendicular al eje vertical. Tanto la presión hidrostática como el peso propio se definen de la misma manera que el primer modelo, así como las condiciones de apoyo. A cada franja se le aplica una presión normal al manto, la cual varía continuamente en el ángulo transversal al cilindro, y discretamente en la altura, basándose en la distribución de presiones del modelo de Veletsos y Shivakumar [5] (Figura 3-10, 3-11).

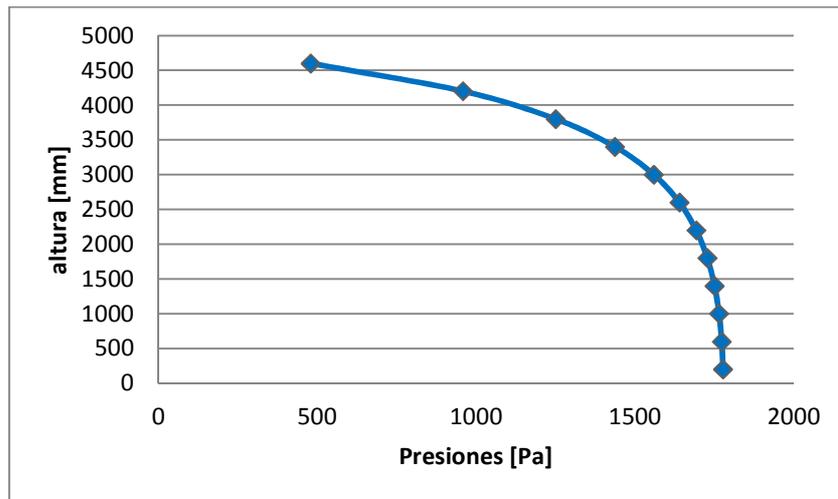


Figura 3-10: Distribución de presiones en la altura

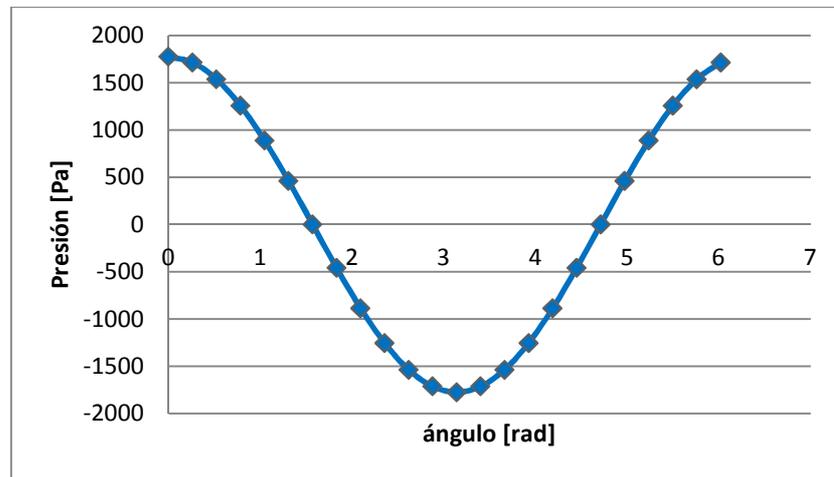


Figura 3-11: Distribución de presiones en el ángulo

3.3.2.3 Estanque – Modelo pushover desplazamientos

En un análisis estático, se aplica un desplazamiento horizontal en el techo del estanque, de la misma manera que se hizo con los modelos de los mantos cilíndricos (Figura 3-12).

Las condiciones iniciales se mantienen, es decir, complementario a la traslación aplicada, se carga la presión hidrostática y el peso propio del estanque.

El perfil de cargas solicitantes puede volver inestable la solución del modelo, por lo que en este caso se incorpora el comando STABILIZE, el cual activa la estabilización no-lineal de los elementos.

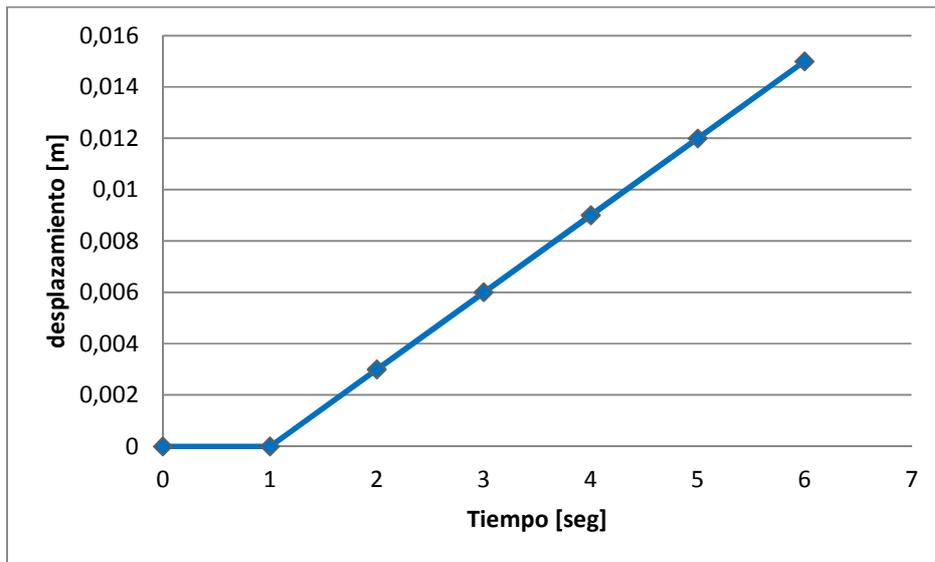


Figura 3-12: Perfil de desplazamiento superior

El desplazamiento se aplica a partir del segundo paso para que primero se carguen las condiciones de carga iniciales, es decir, peso propio y presión hidrostática. Luego se aplica un desplazamiento monótonico al techo en la dirección x (Figura 3-13).

Para mejorar el procesamiento del programa, la aplicación de la carga se ha dividido en 5 pasos.

A nivel de geometría, a este modelo se le modifican los apoyos. En el sector de la base, se adjuntan seis placas de grosor 20 [mm], las cuales representan el sistema de apoyos con pernos y sillas de algunos estanques.

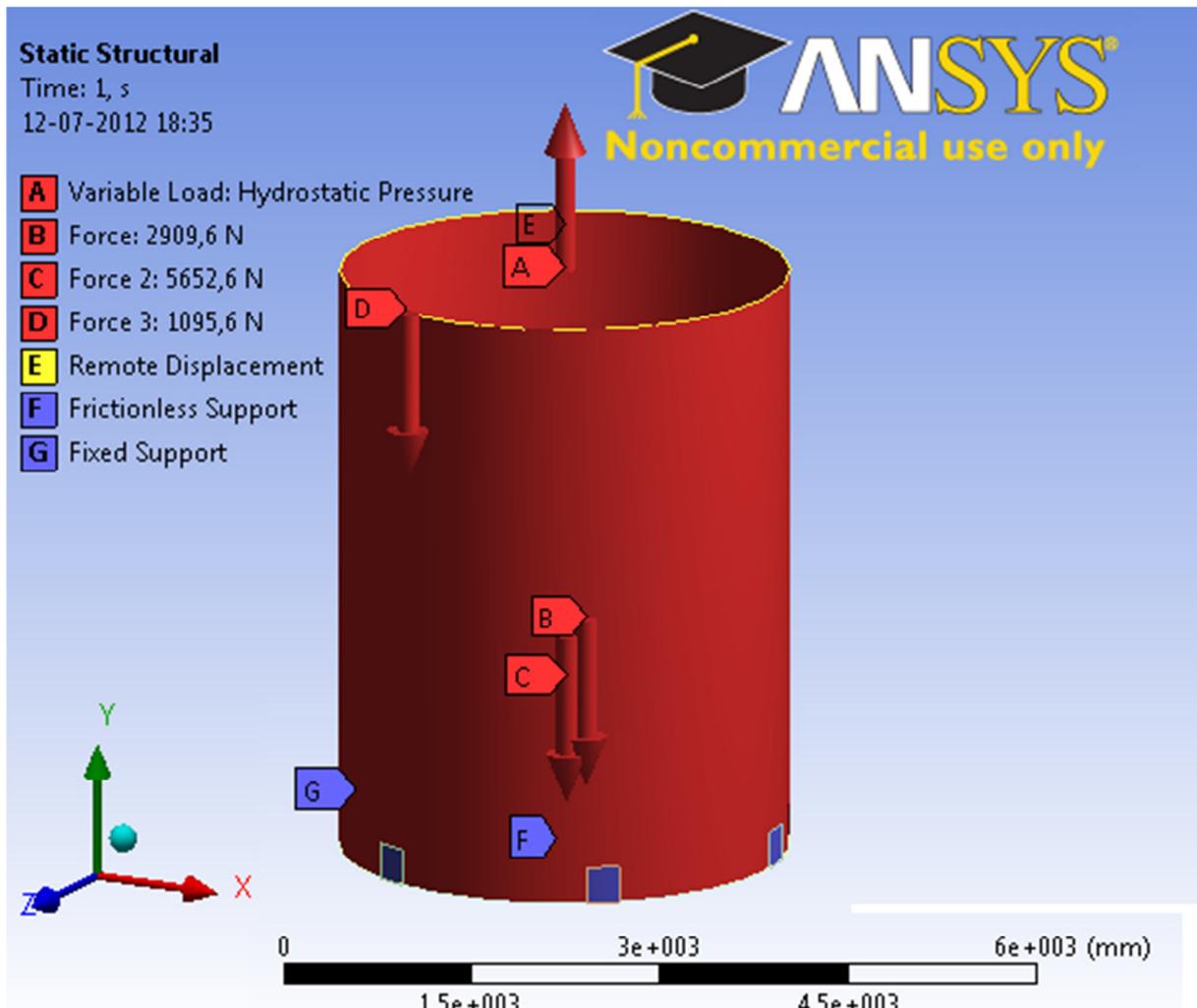


Figura 3-13: Modelo pushover desplazamientos

3.3.2.4 Estanque – Geometría modificada

Se perturba la geometría del estanque agregándole imperfecciones al manto. Para ello, se buscan los modos de pandeo de la estructura, seleccionando arbitrariamente un modo cuya forma predisponga algún tipo de falla estudiado, en particular, aquel que se asemeje a una pata de elefante (Figura 3-14). De esta manera, con la siguiente línea de código se escala el modo tal que la máxima imperfección tenga 5[mm]:

```
/prep7
upgeom, 5, 1, 40, file, rst
cdwrite, db, file, cdb
```

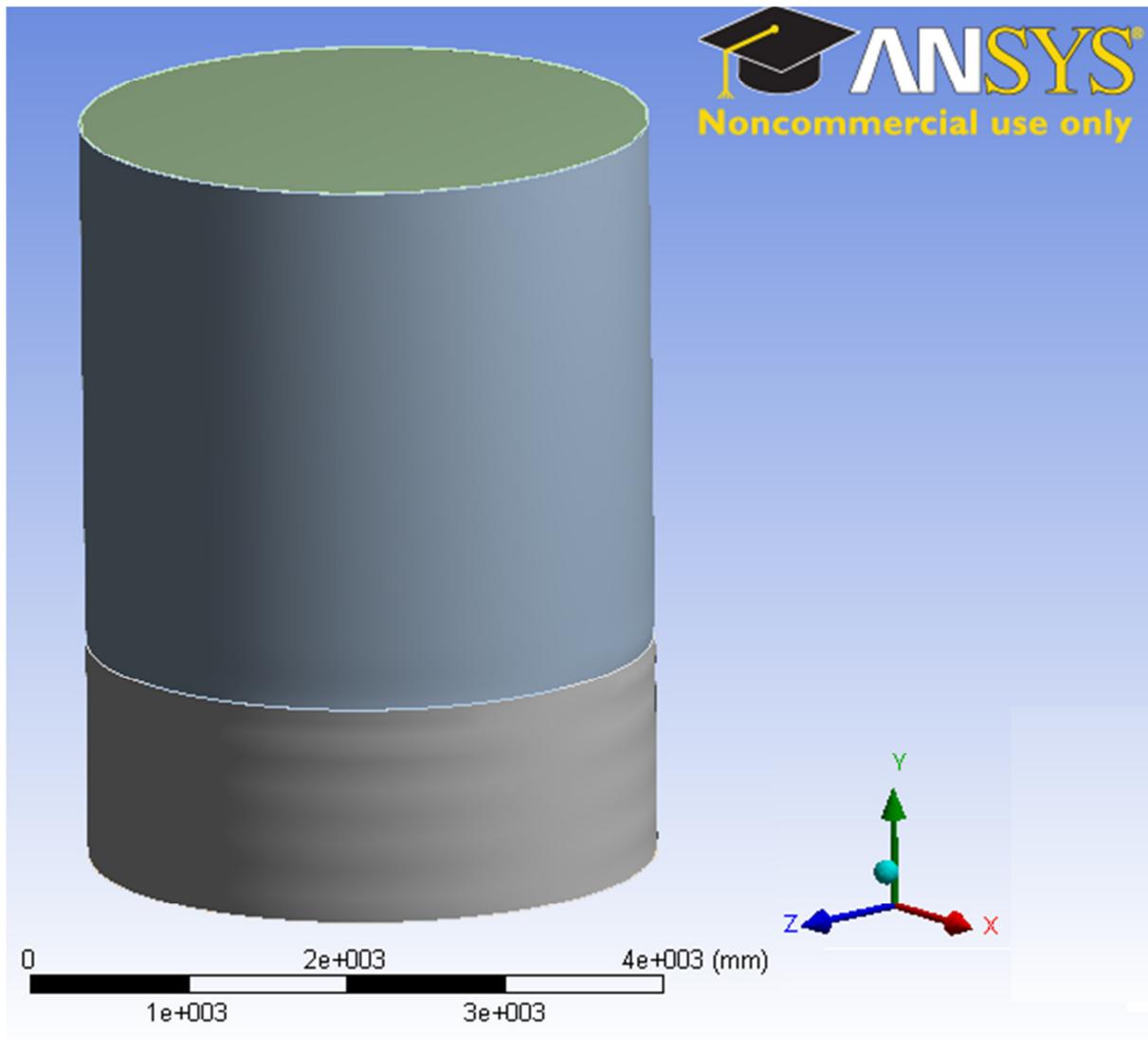


Figura 3-14: Geometría modificada

Luego a la estructura se le aplican las mismas sollicitaciones que en el modelo pushover desplazamientos.

Tanto la línea de comando como el procedimiento para generar la geometría, fueron tomados de una fuente en línea [14].

3.3.3 Estanque – Elemento Solid

En este modelo, el fluido es simulado utilizando un elemento tipo solid (3.2.2). Para recrear la incompresibilidad y baja resistencia al corte del líquido, se le asignan los siguientes valores a las propiedades del material:

Módulo de Young	= 115,8	MPa
Módulo de Poisson	= 0,49999	
Módulo volumétrico	= 1930000	MPa
Módulo de corte	= 0,64	MPa

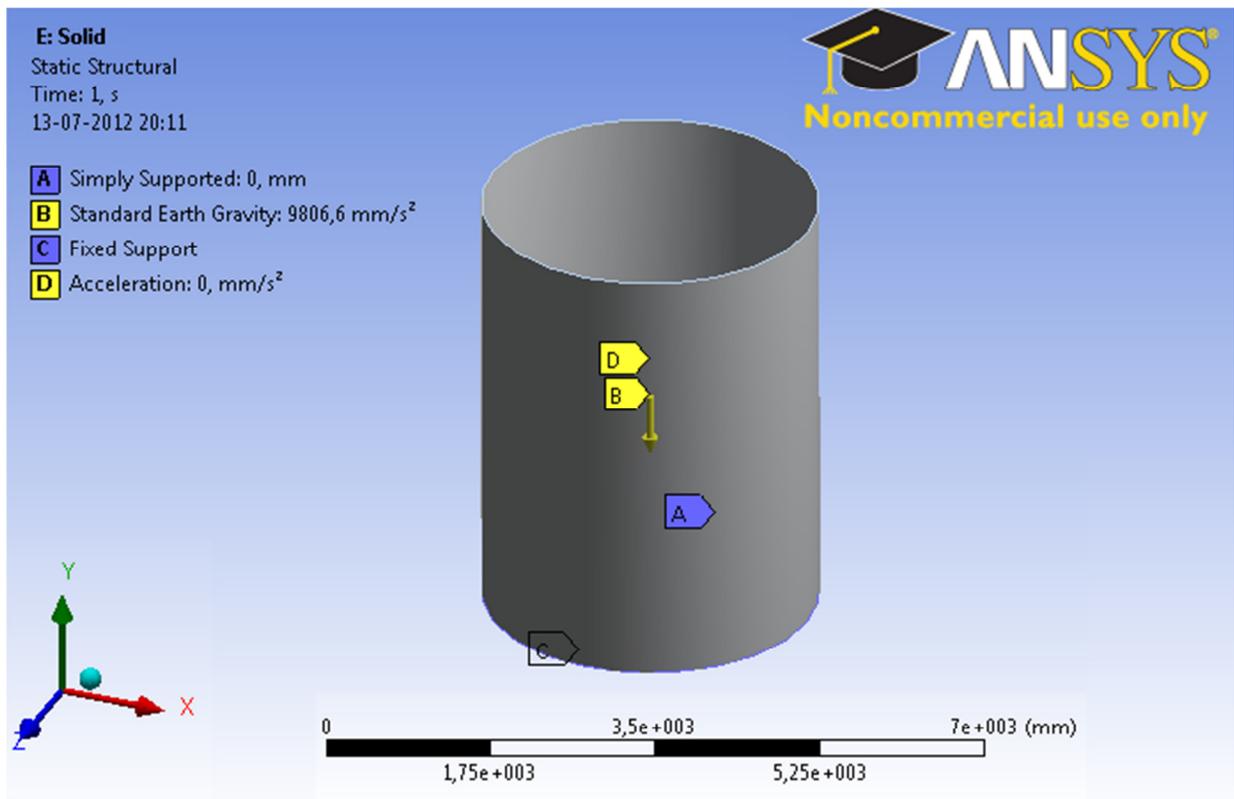


Figura 3-15: Modelo elemento solid

A la estructura se le aplica una aceleración de gravedad, para luego aplicar una aceleración horizontal, de tal manera de simular las presiones hidrodinámicas con la interacción del elemento solid con el manto (Figura 3-15).

Para compatibilizar la interacción del elemento solid con el manto, se utiliza el contacto "no-separation" (3.2.4)

3.3.4 Estanque – Análisis de sensibilidad

Entre los factores que afectan directamente el modo de falla de la estructura, se encuentran las propiedades del material y la relación radio-espesor [13]. Para observar como varía la falla de los estanques, se hace un análisis paramétrico, modelando dos estanques distintos, utilizando la geometría ya descrita en los modelos anteriores (Figura 3-16). Las condiciones de apoyo son el estanque simplemente apoyado en la base. A los mantos se les asignan arbitrariamente espesores de 10 [mm] y 5 [mm] respectivamente.

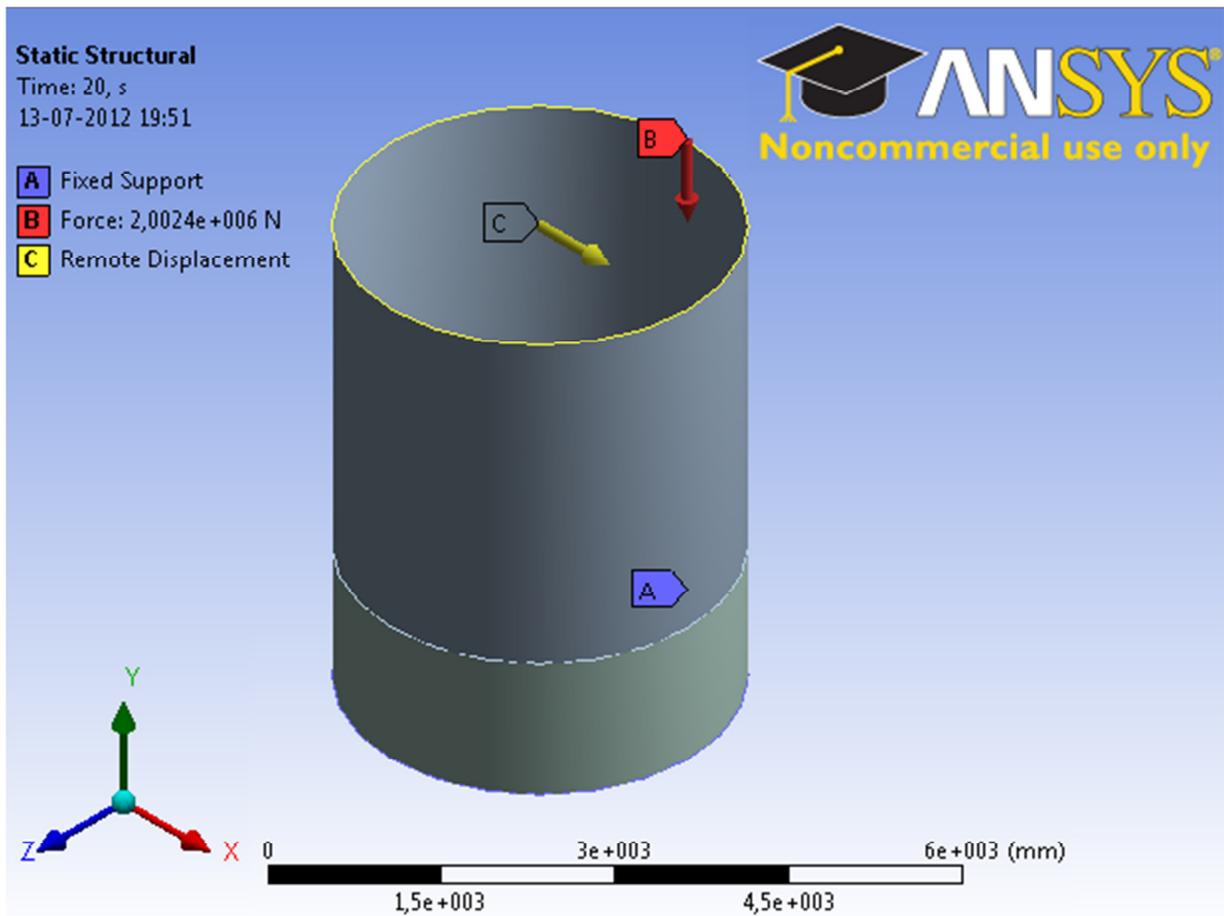


Figura 3-16: Análisis de sensibilidad

4 Resultados y análisis

Tras la confección de los modelos y su procesamiento, se obtiene la respuesta de cada uno de las configuraciones. En el presente capítulo se exponen uno por uno los resultados de cada modelo, para luego hacer un análisis comparativo.

4.1 Modelos

4.1.1 Manto cilíndrico

Al cargar los dos tipos de cilindros, se llega a la falla del manto, observándose principalmente dos factores importantes:

Se reprodujeron los modos de falla teóricamente esperados, en el estanque tipo 1, el de mayor espesor, se desarrolla claramente en la base del cilindro el pandeo "pata de elefante" (Figura 4-1, 4-2). De la misma manera, en el estanque tipo 7 se logra reproducir en las cercanías del apoyo el modo "punta de diamante" (Figura 4-3, 4-4), esperado dada la relación radio-espesor de la geometría.

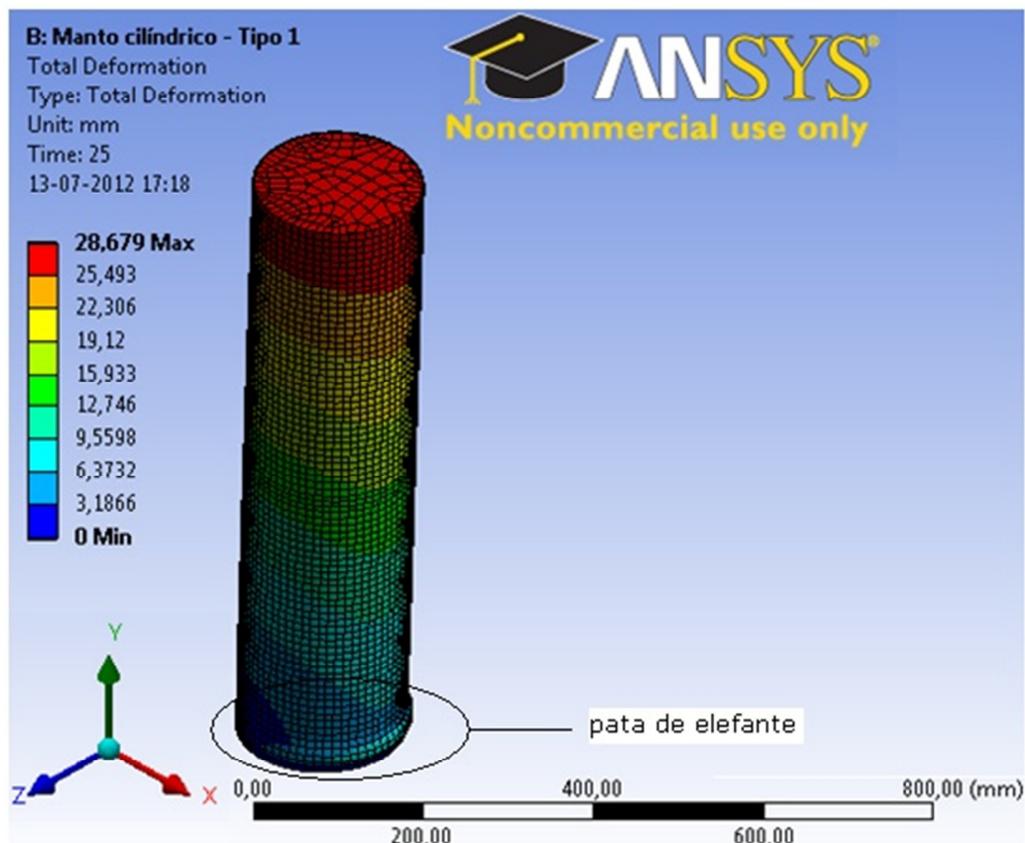


Figura 4-1: Modelos mantos cilíndricos - tipo 1

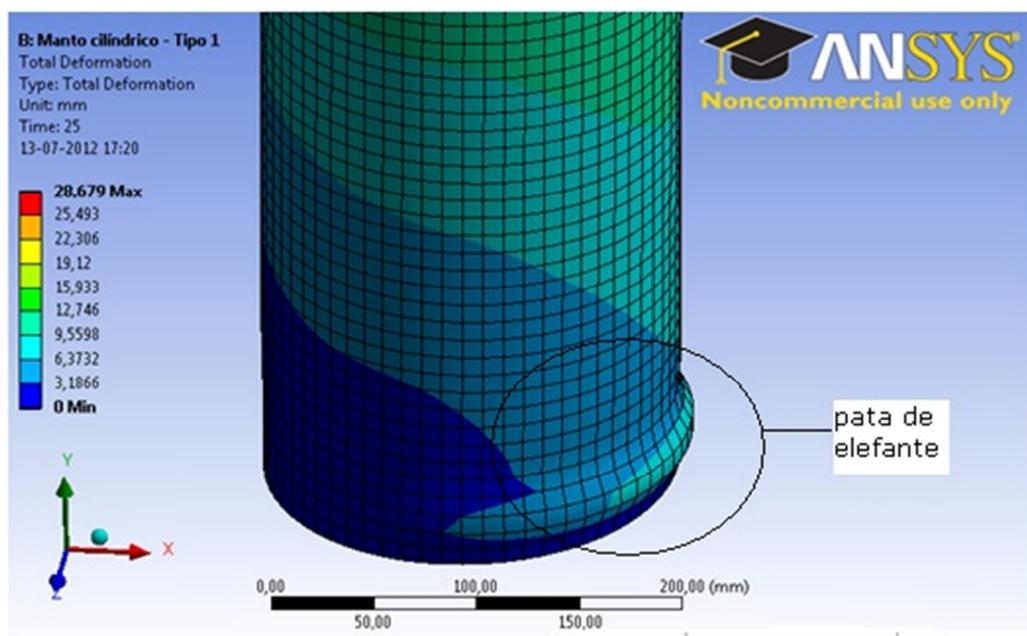


Figura 4-2: Pandeo pata de elefante - cilindro tipo 1

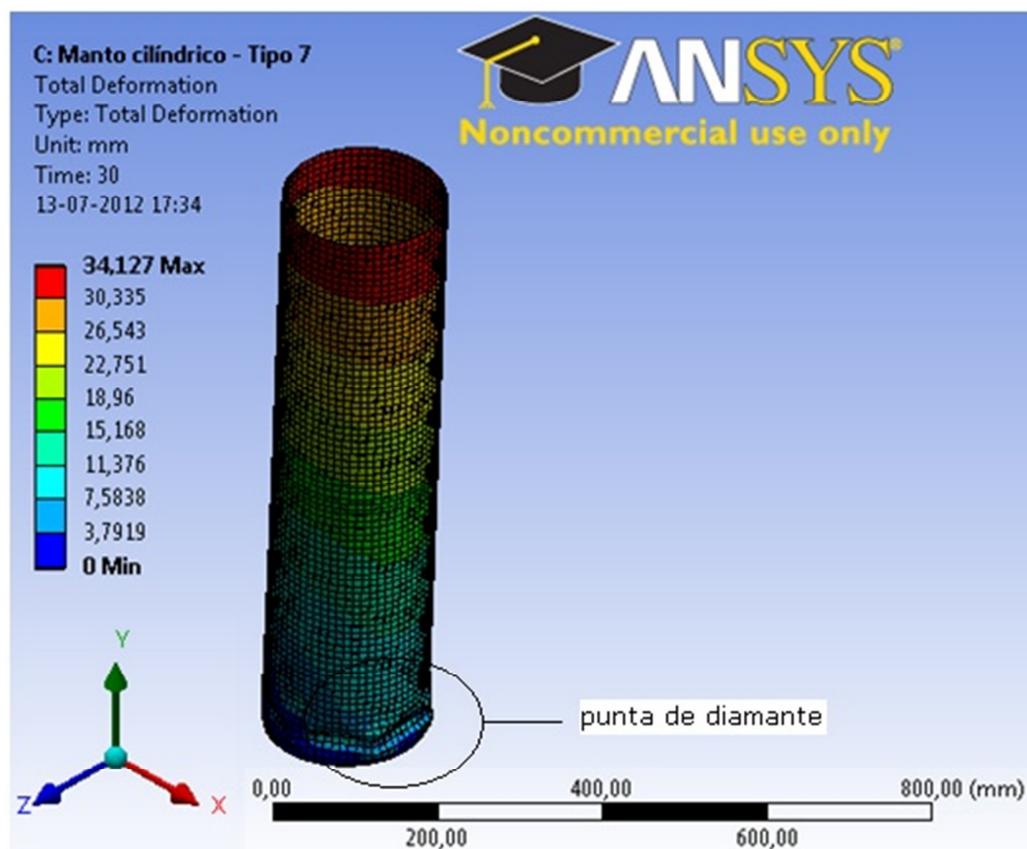


Figura 4-3: Pandeo punta de diamante- cilindro tipo 7

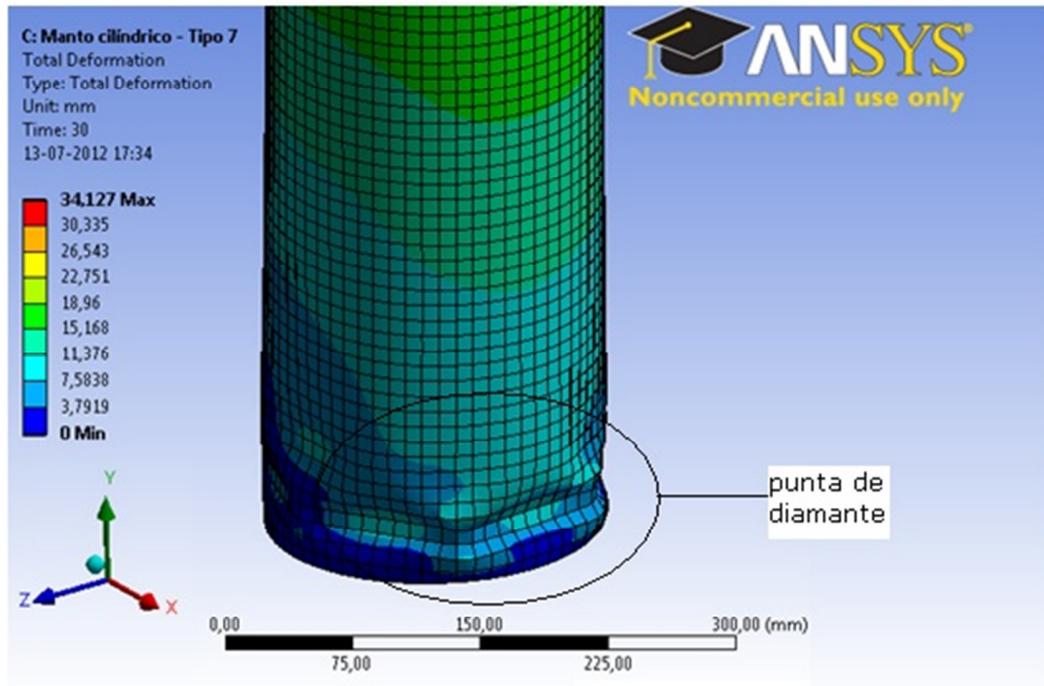


Figura 4-4: Pandeo punta de diamante- cilindro tipo 7

El segundo factor importante de este análisis fue el rescate de los esfuerzos de corte basal, los cuales son comparados con el desplazamiento del nivel superior, confeccionando una curva de capacidad de la estructura (Figura 4-5), la cual alcanza un peak de corte basal y luego comienza a degradar. Esto resulta interesante para efectos de diseño y evaluación de un estanque de almacenamiento, ya que se puede tener una referencia de cuanto carga puede tomar la estructura para solicitaciones laterales y cual es la capacidad remanente después de producido el pandeo.

En la curva de capacidad (Figura 4-5) se observa una diferencia de rigideces, representada por la pendiente de la curva en la parte lineal. Esto se debe a la diferencia en las inercias de los cilindros, la cual afecta también la capacidad del sistema, la que si bien se alcanza para desplazamientos laterales similares (alrededor de 5 [mm]), en el caso del estanque tipo 1 es 3 veces mayor que la del tipo 7.

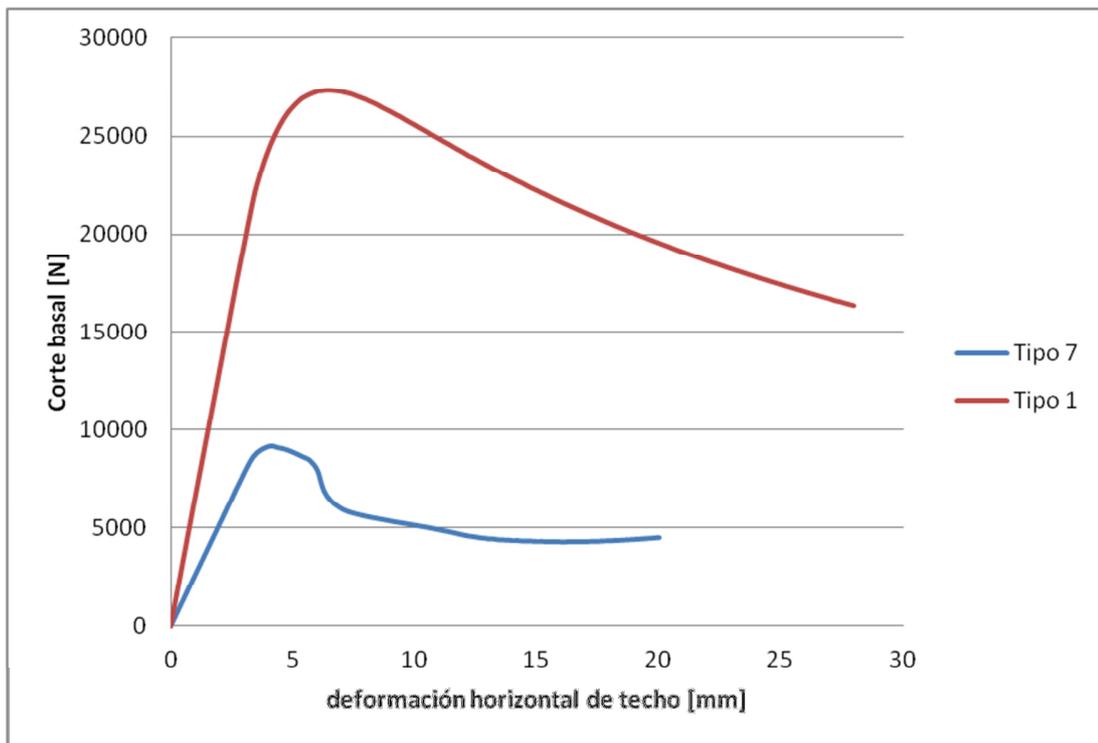


Figura 4-5: Curva capacidad mantos cilíndricos

4.1.2 Estanque – Modelo de masas en franjas

El análisis transiente converge hasta llegar a la falla, la cual se produce en el tiempo 5,36. Este tiempo corresponde al comienzo del tercer periodo de la excitación sinusoidal, la cual tiene como peak una aceleración de 4,5g.

A nivel de deformaciones, se observa un incipiente pandeo “pata de elefante” en la base en cada ciclo (Figura 4-6). La falla se desarrolla en la zona posterior del estanque (en relación a la dirección del movimiento), pandeándose localmente el manto en la altura donde el espesor es menor. El desplazamiento del techo al momento de la falla alcanza un valor de 5,7 [mm], y las abolladuras del manto una profundidad de 9,19 [mm] (Figura 4-7).

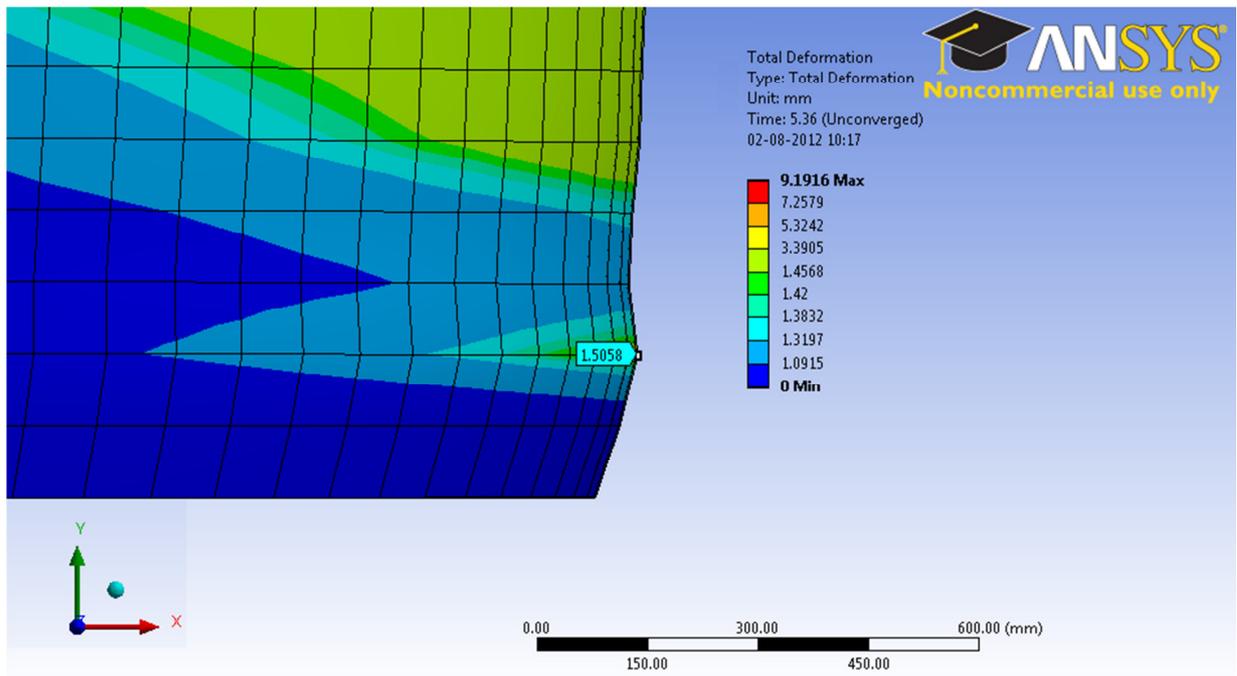


Figura 4-6: Deformación modelo masas en franjas

Los esfuerzos a nivel de la base alcanzan los 1608 [kN] al producirse el peak, habiéndose desplazado 2,3 [mm]. Al analizar el comportamiento del sistema, comparando el desplazamiento con el corte basal, se observa que la tendencia es de carácter lineal, excepto cuando el sistema ya es inestable y el manto se pandea, como se observa en la parte inferior de la curva (Figura 4-8).

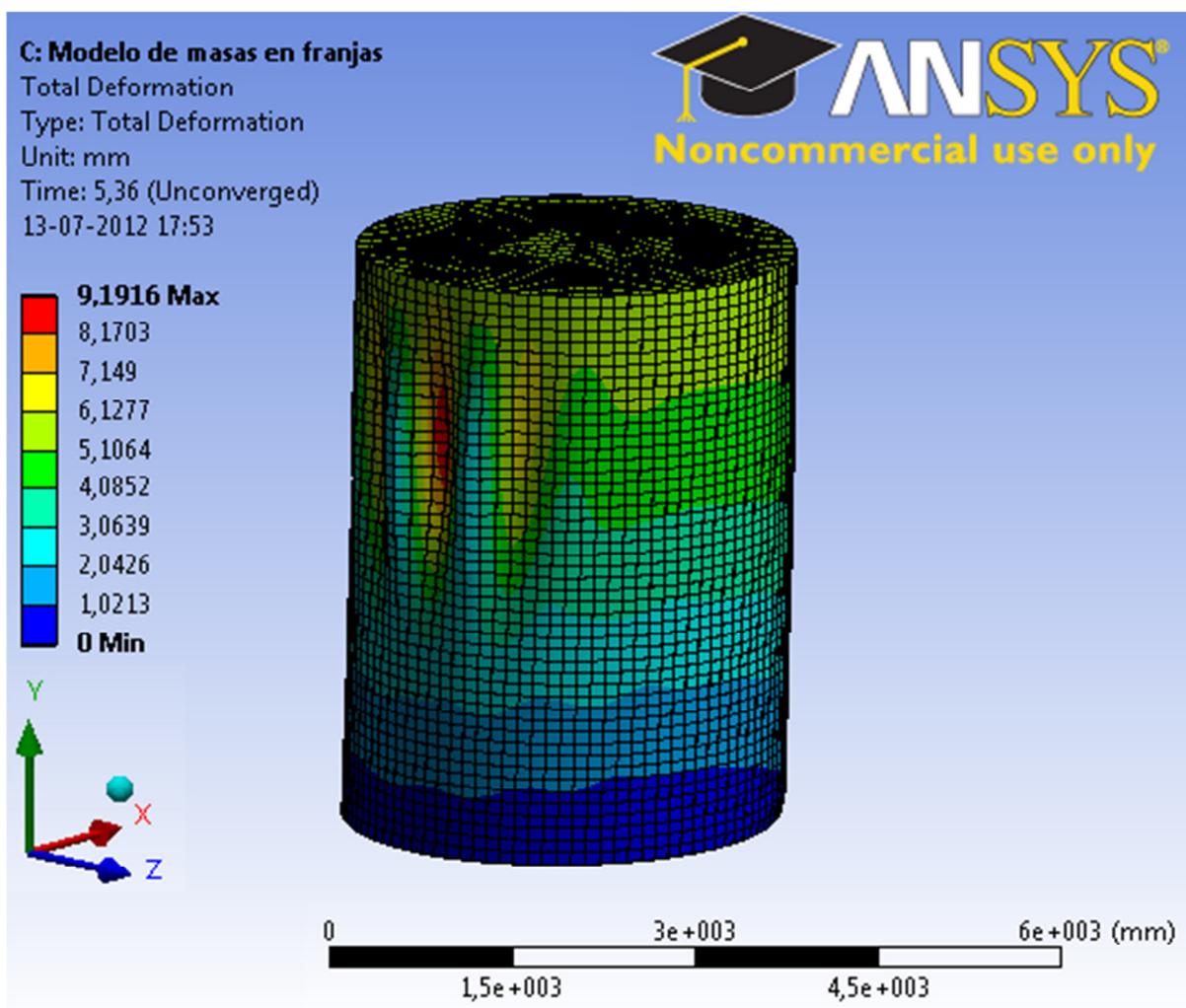


Figura 4-7: Deformación modelo masas en franjas

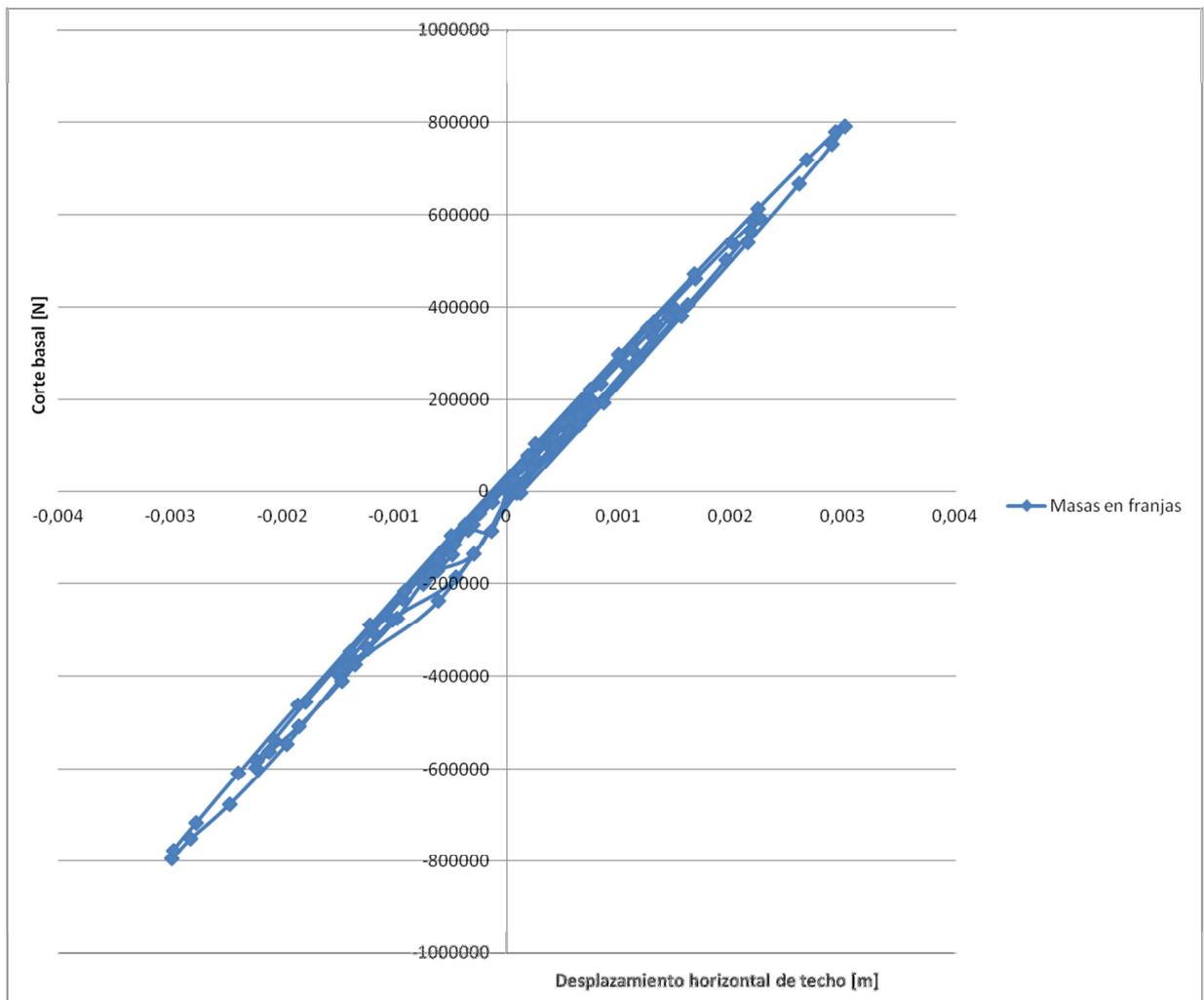


Figura 4-8: Curva corte basal - desplazamiento modelo masas en franjas

A nivel del manto, las concentraciones de tensiones se ubican en la base del estanque (Figura 4-9), y estas alcanzan valores de hasta 138 [MPa].

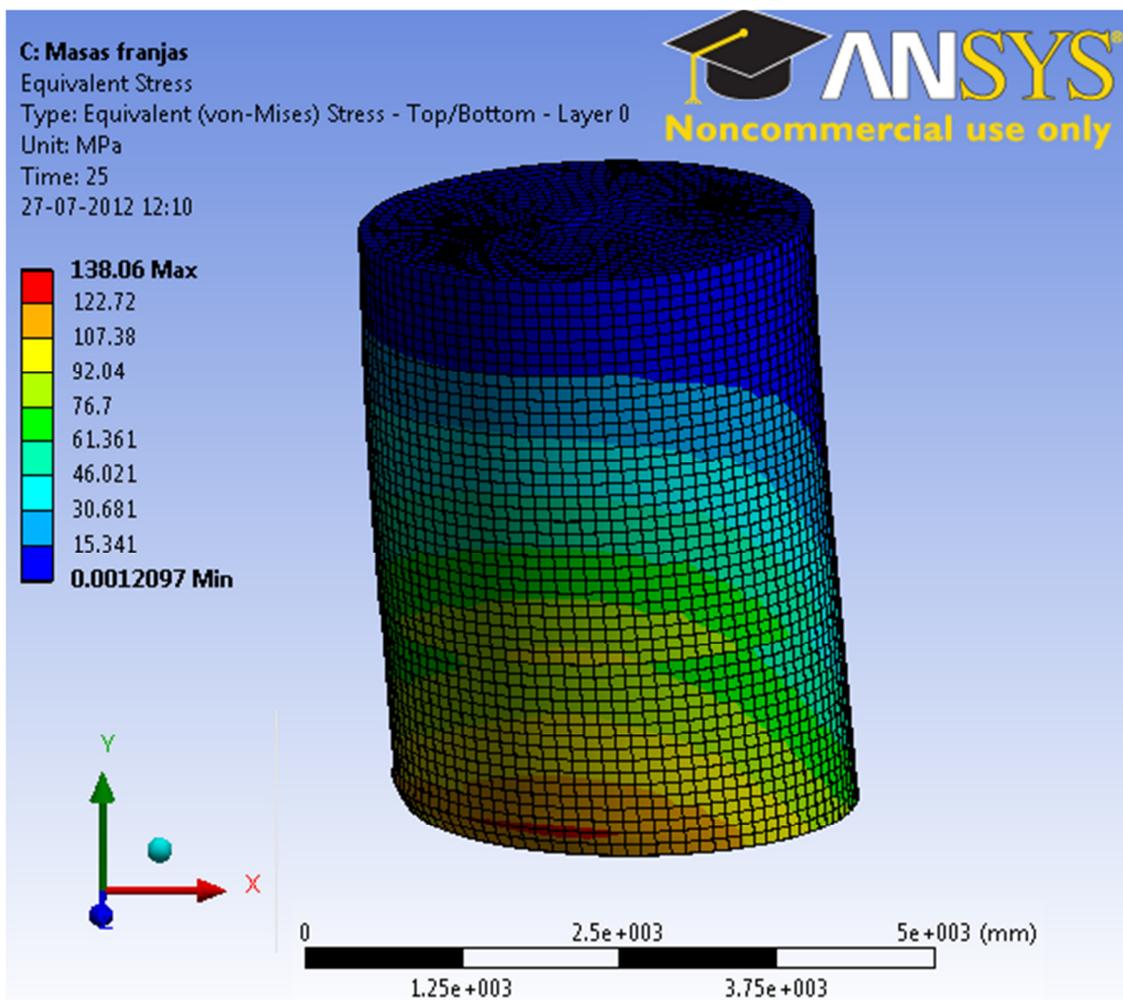


Figura 4-9: Tensiones en el manto – modelo masas en franjas

4.1.3 Estanque – Modelo de presiones en franjas

El análisis estático del modelo de presiones distribuidas tanto en la altura, como en el ángulo del manto, el programa lo corre en un solo tiempo. Esto deriva en que tanto las condiciones iniciales, como las presiones hidrodinámicas se cargan progresiva y simultáneamente. Otra consecuencia que tiene esto, es que no es posible generar una curva de capacidad y observar el comportamiento mientras se cargan las solicitaciones no tiene mayor provecho para el análisis.

En este modelo, el perfil de presiones fue escalado de tal manera que represente las solicitaciones equivalentes a una aceleración de 10 [m/seg²].

Las deformaciones producidas por las presiones se desarrollan principalmente en la base, donde se puede apreciar el pandeo local, al igual que en el cambio de espesor, las cuales llegan a 3,2 [mm] en el extremo superior de la estructura (Figura 4-10).

El esfuerzo de corte basal resultante de las presiones, tuvo una magnitud de 354,1 [kN] (Figura 4-11), mientras se resiste un momento volcante de 843 [kN*m]

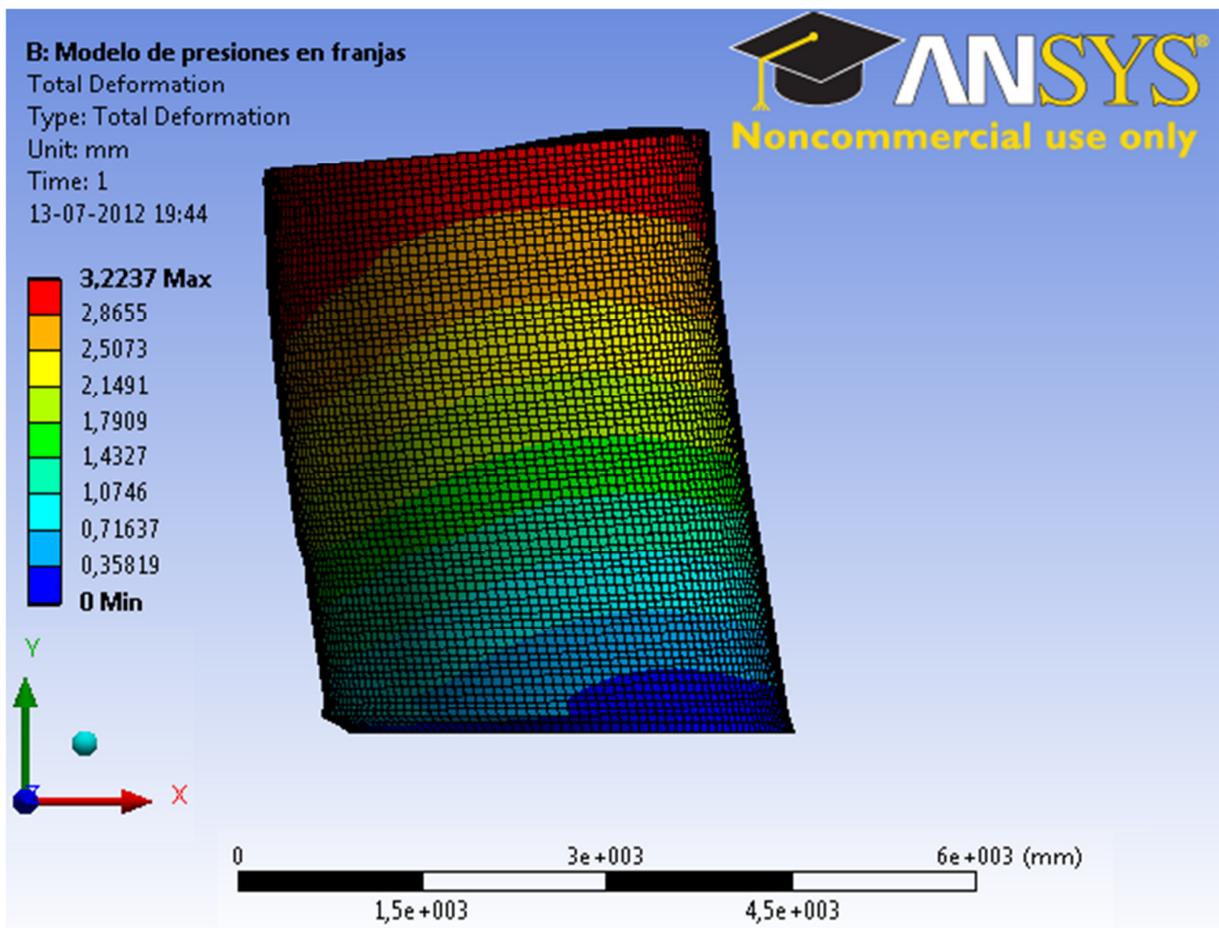


Figura 4-10: Deformación modelo presiones

De manera similar al modelo de masas en franjas, las tensiones se concentran en la zona inferior de la estructura, llegando a los 87 [MPa] de magnitud (Figura 4-12).

Este análisis es de carácter lineal, por lo que no se aprecian variaciones en rigidez del sistema al llegar al peak de capacidad (Figura 4-9).

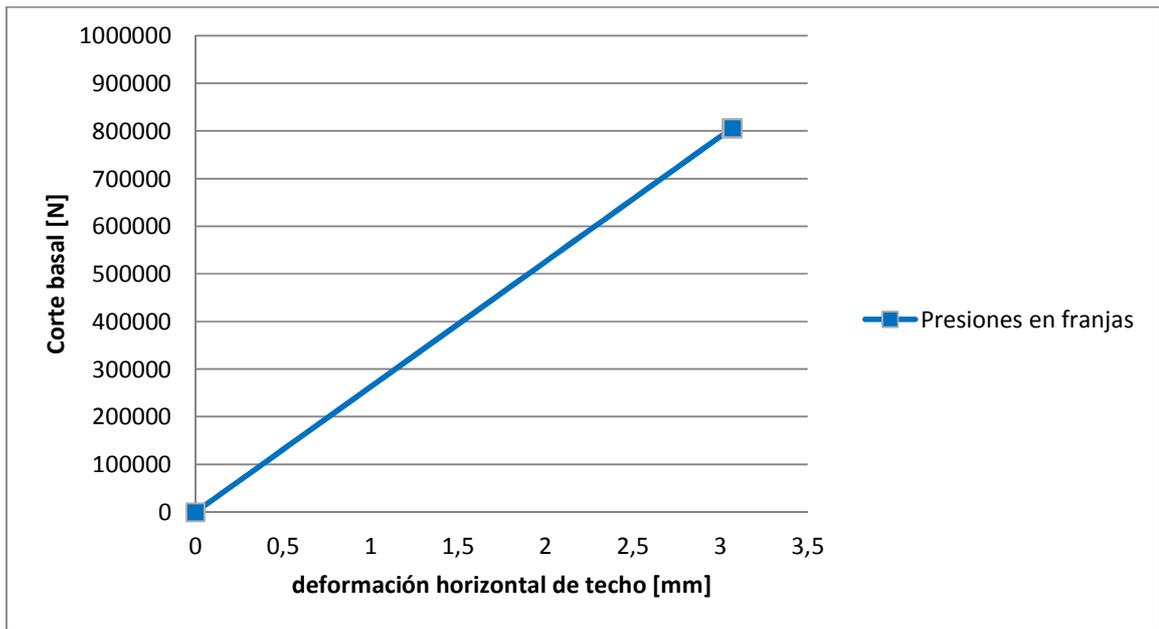


Figura 4-11: Curva capacidad modelo de presiones en franjas

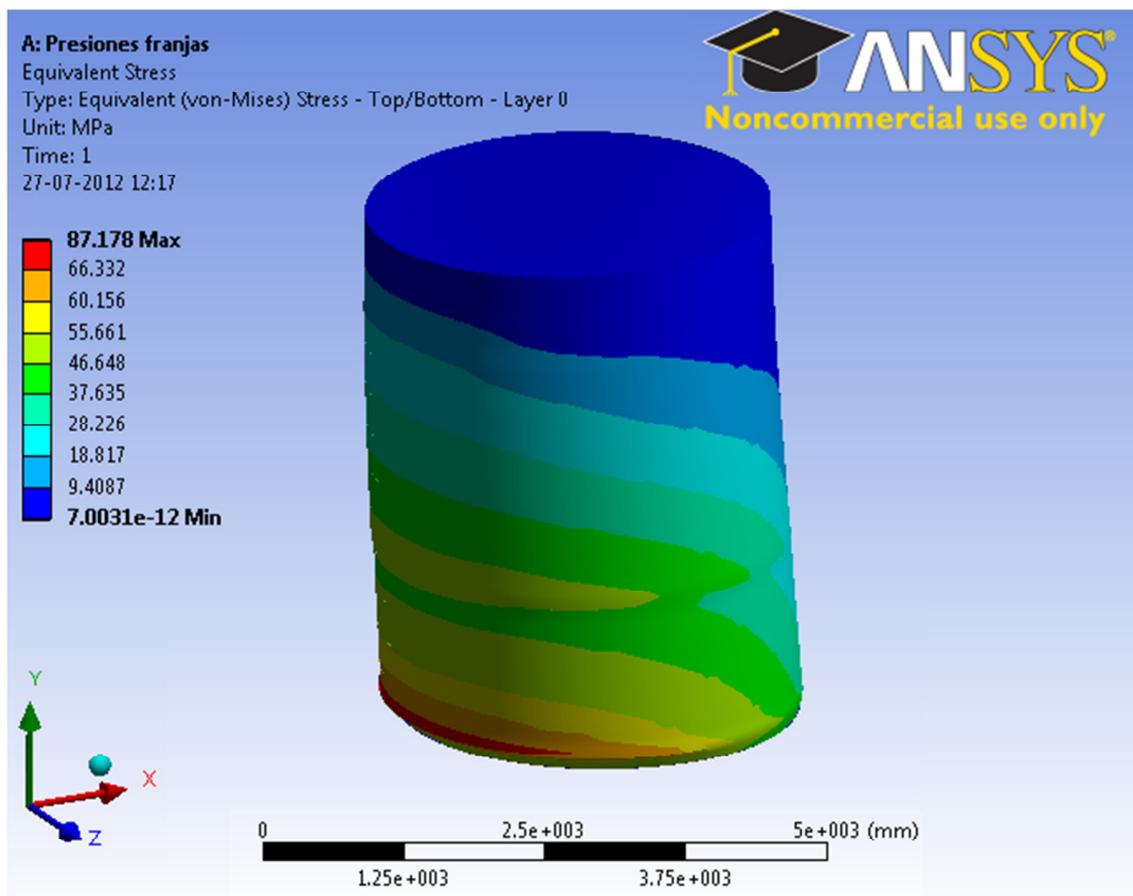


Figura 4-12: Tensiones en el manto – modelo presiones en franjas

4.1.4 Estanque – Modelo pushover desplazamientos

En este modelo, tras cargarse las solicitaciones del caso estático, se aplica un desplazamiento monotónico creciente del techo del estanque, hasta llegar a la falla. Esta se produce en el paso 2,34 [seg], cuando el desplazamiento superior es de 7,86 [mm] en el nodo más desplazado.

El modo de pandeo resultante corresponde a una falla por corte en el nivel superior del manto. Esta se puede formar debido a que el corte interno de la estructura es uniforme en la altura, lo que sumado a la esbeltez del estanque gatillan este modo, antes que se acumulen grandes tensiones en la base del cilindro.

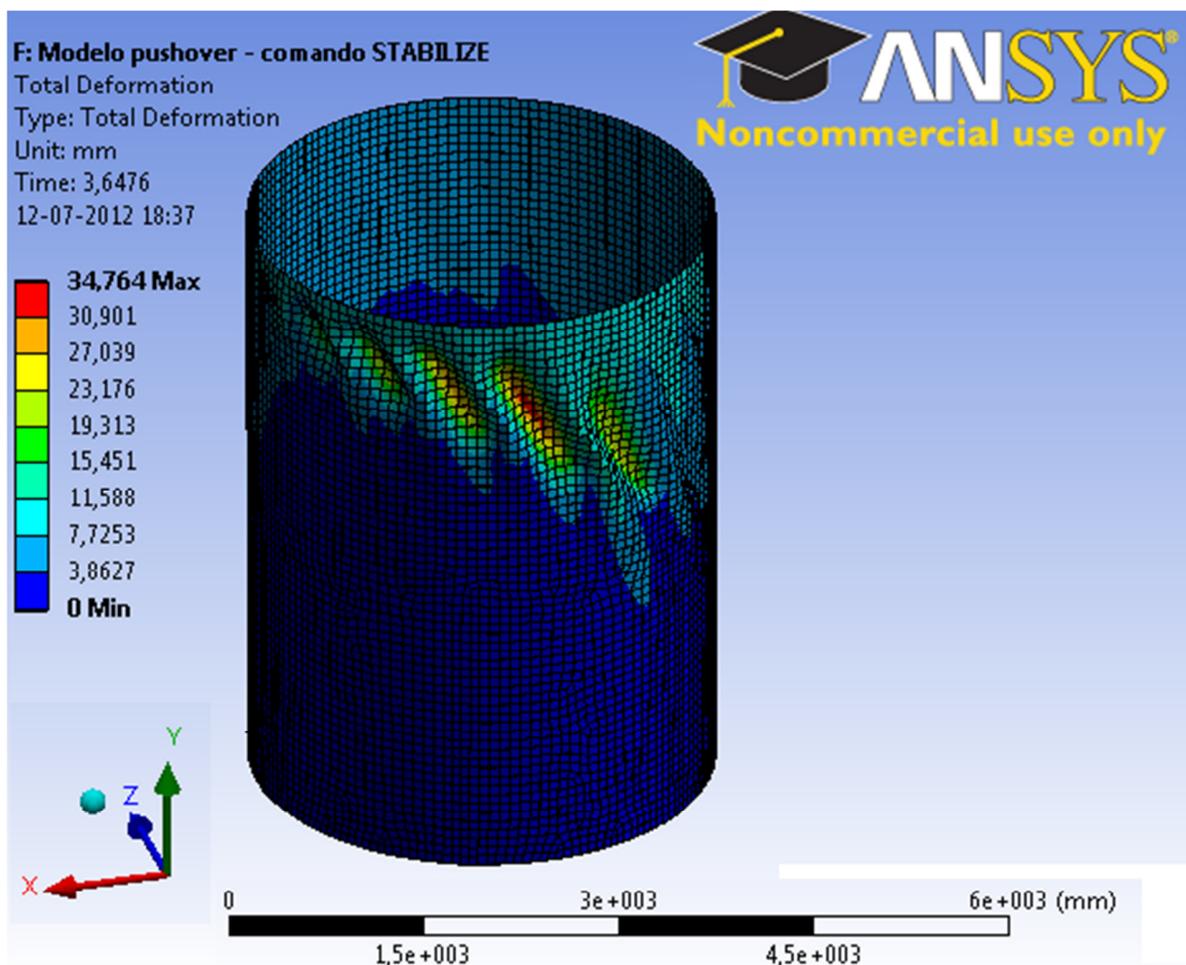


Figura 4-13: Deformación modelo pushover desplazamientos

Al igual que en el modelo de mantos cilíndricos, es posible comparar el corte basal con el desplazamiento del nivel superior, confeccionando una curva de capacidad que alcanza un peak de 648 [kN] con un desplazamiento lateral de 6,15 [mm], para luego degradar

(Figura 4-14). La curva tiene un primer tramo lineal, para luego del peak decaer y comenzar a dejar de tomar cargas frente al aumento de la traslación horizontal.

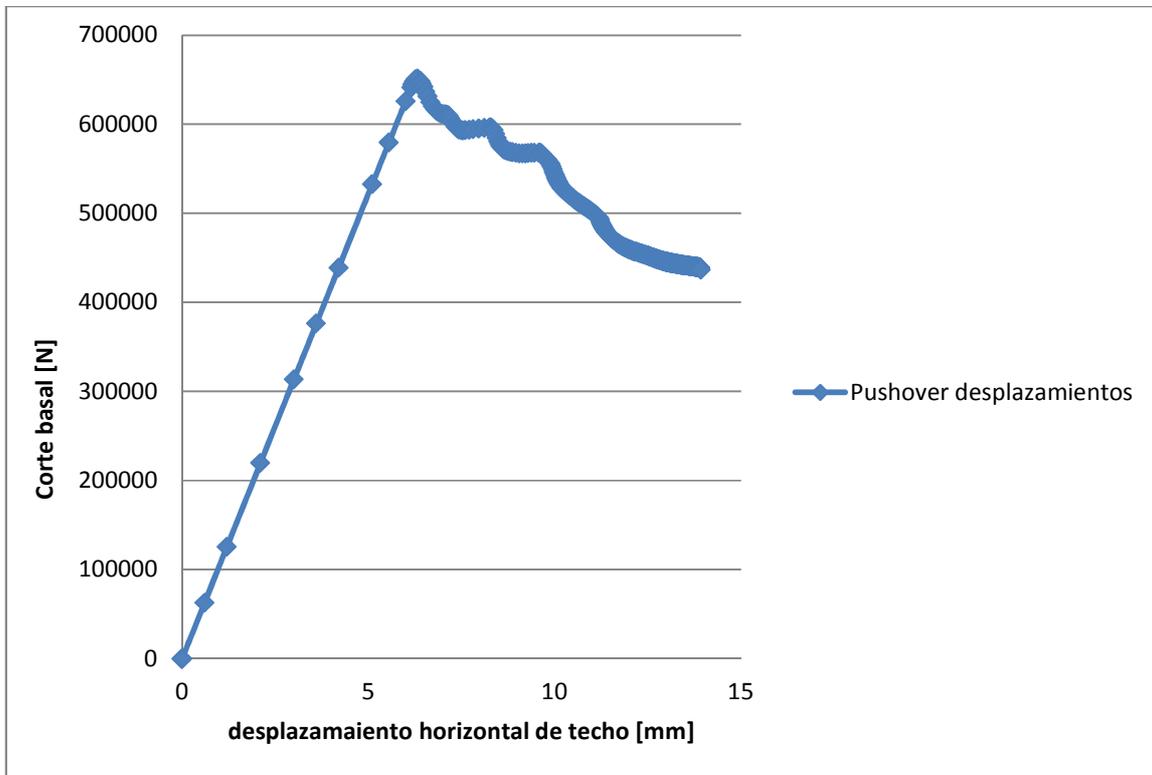


Figura 4-14: Curva capacidad modelo pushover desplazamientos

Las tensiones máximas se observan en el área de falla del manto, teniendo un máximo de 211 [MPa] (Figura 4-15).

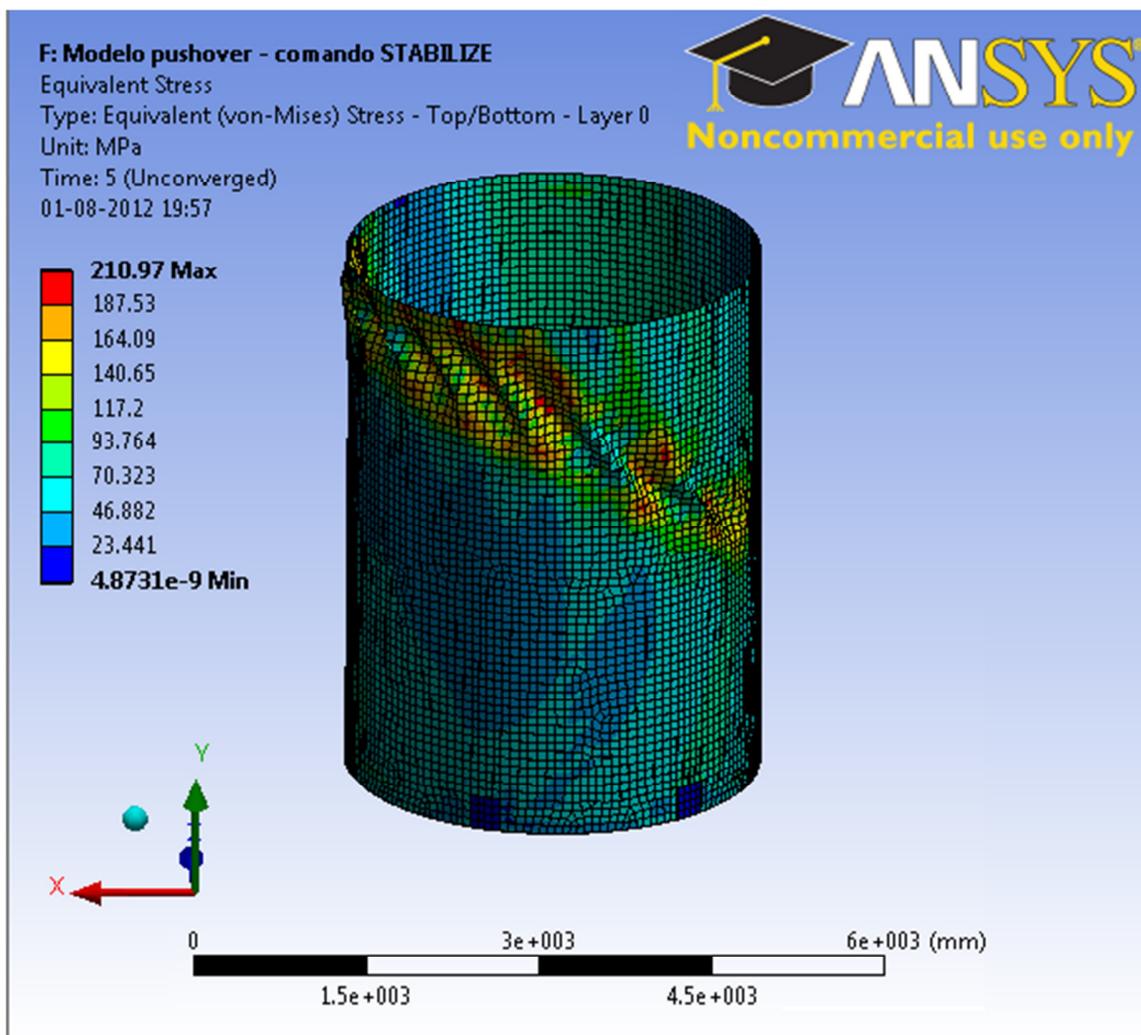


Figura 4-15: Tensiones en el manto – modelo pushover desplazamientos

4.1.5 Estanque – Modelo geometría modificada

Los pasos del análisis estático convergen linealmente hasta llegar al peak, donde diverge al comenzar a decaer la capacidad del estanque. Esta última se alcanza a los 266 [kN], cuando el techo de la estructura se ha desplazado unos 4,17 [mm] (Figura 4-16).

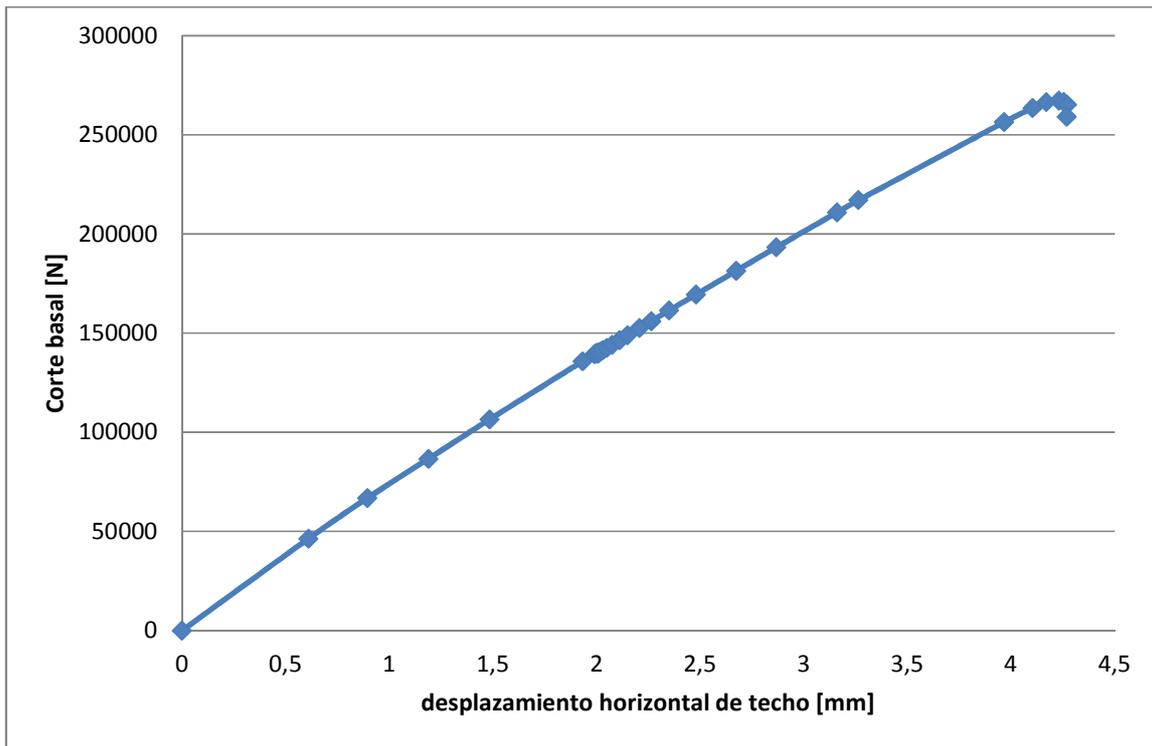


Figura 4-16: Curva capacidad modelo geometría modificada

Al analizar el tipo de falla, se observa un pandeo en el manto que alcanza los 20 [mm] de profundidad y el cual abolla diagonalmente el estanque, suponiendo una falla por corte. La superficie del techo también se ve dañada tras la deformación, lo que puede haber influido en la pronta falla (Figura 4-17).

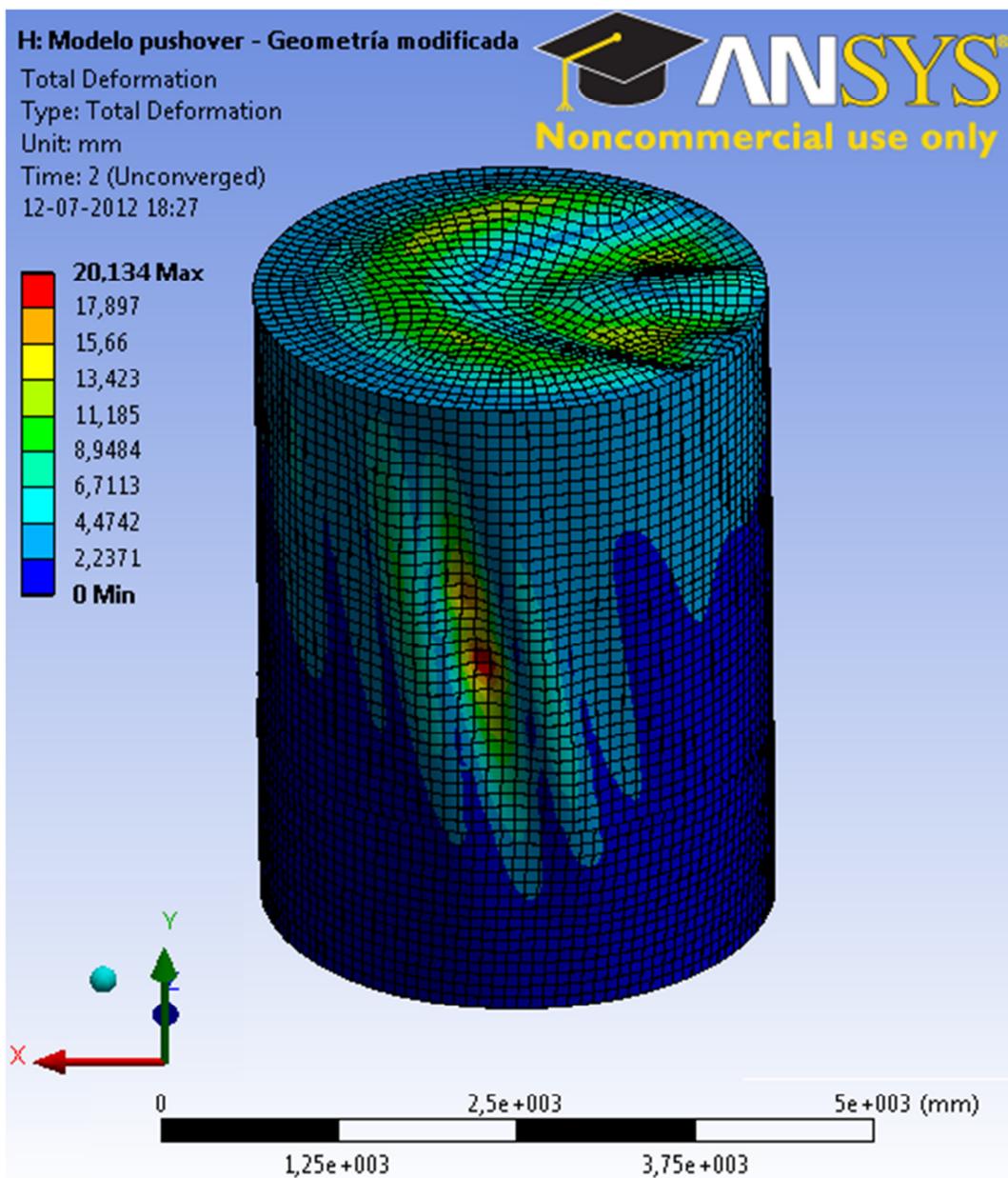


Figura 4-17: Deformación modelo geometría modificada

En la figura 4-18 se observa una concentración de tensiones a nivel del techo, llegando a los 208 [Mpa].

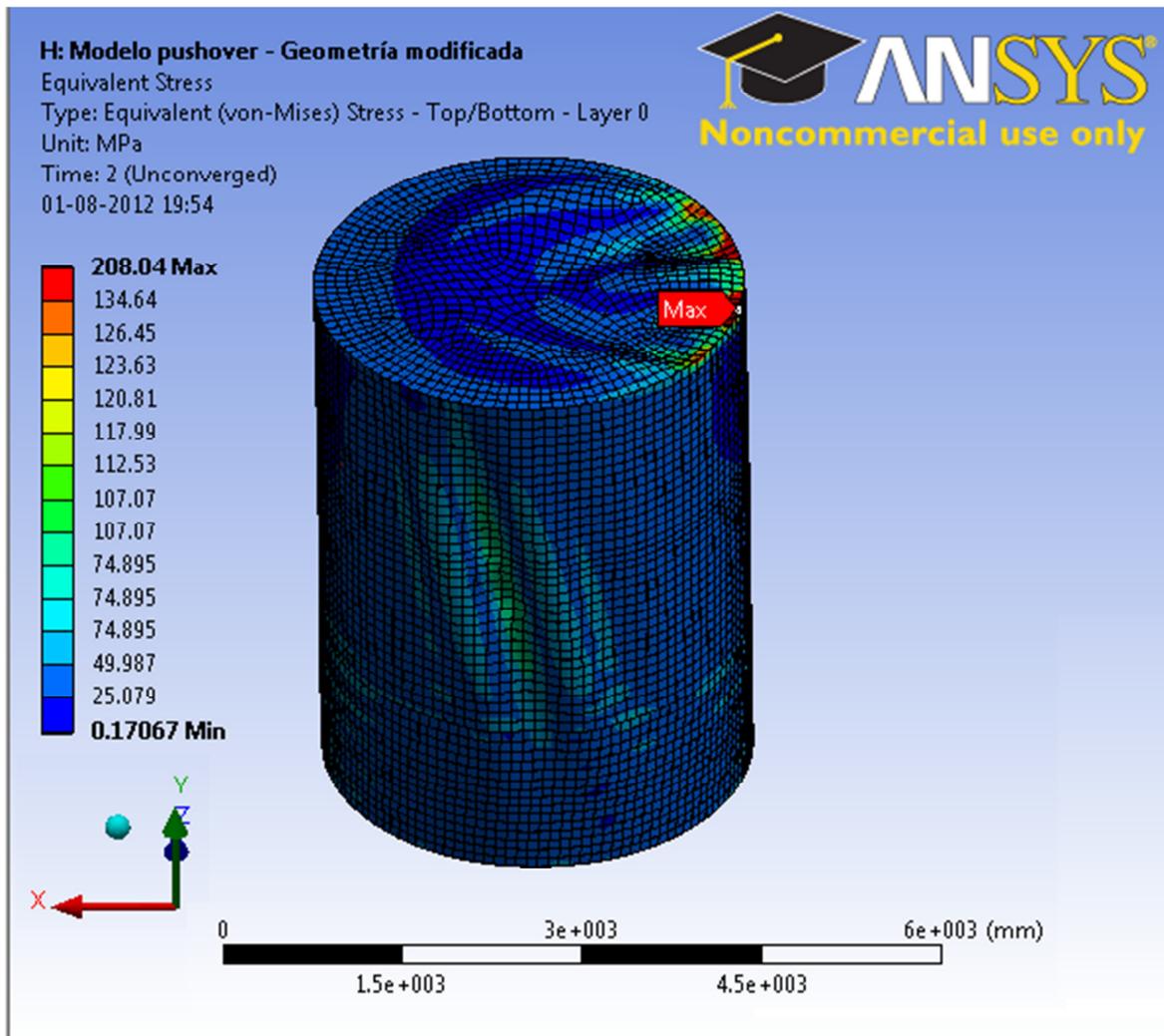


Figura 4-18: Tensiones en el manto – modelo geometría modificada

4.1.6 Estanque – Modelo elemento solid

Al igual que la mayoría de los modelos anteriormente descritos, el proceso converge hasta llegar a la falla. Esta no se observa claramente en el manto del estanque, si bien se aprecia una incipiente pata de elefante en las cercanías a la base, no se identifican pandeos locales mayores como en los otros modelos.

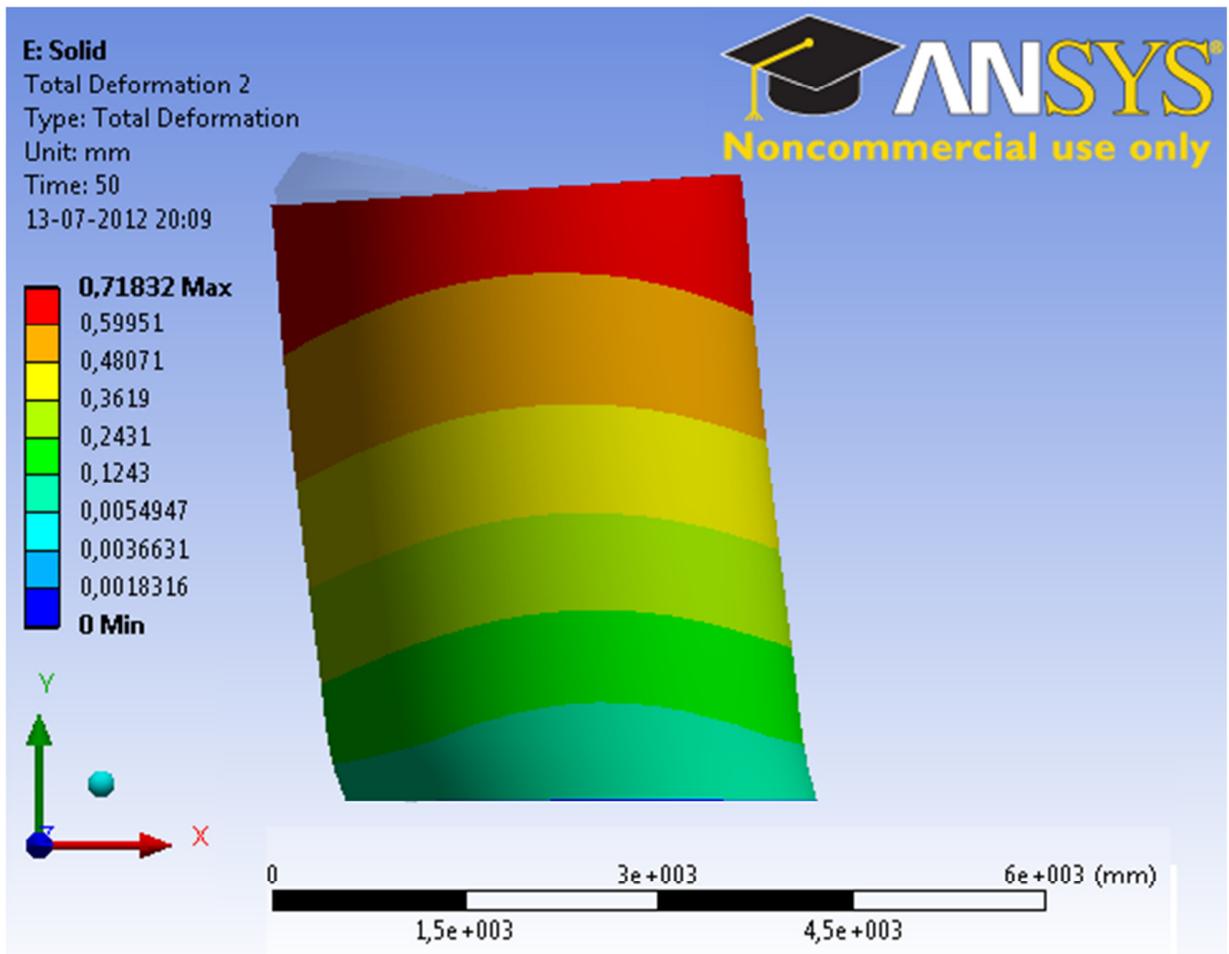


Figura 4-19: Deformación modelo elemento solid

En el gráfico de corte basal versus desplazamiento de techo se puede apreciar el cambio de pendiente de la capacidad, lo que responde al rango no lineal de la estructura. Este se ubica cuando el estanque se ha desplazado cerca de 8,6 [mm], tomando un esfuerzo en la base de 2187 [kN]. En el momento de la divergencia del modelo computacional, el nivel superior del estanque se ha desplazado ya 21,6 [mm], resistiendo 2776[kN] de corte (Figura 4-19, 4-20).

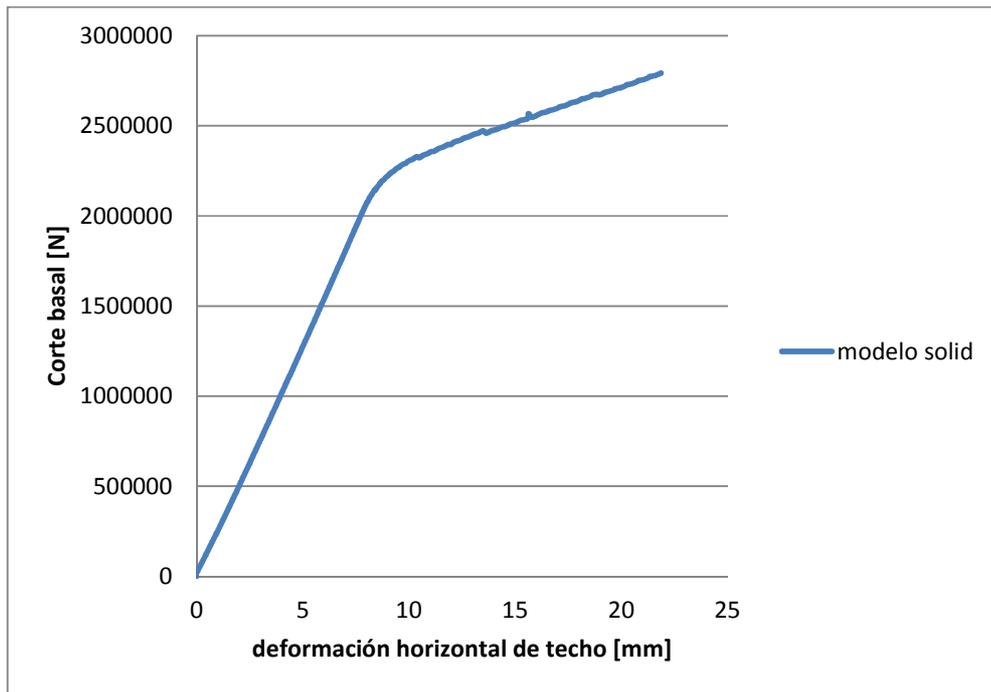


Figura 4-20: Deformación modelo elemento solid

En este modelo, las concentraciones de tensiones se observan a nivel basal (Figura 4-21) y llegan a los 217 [MPa]

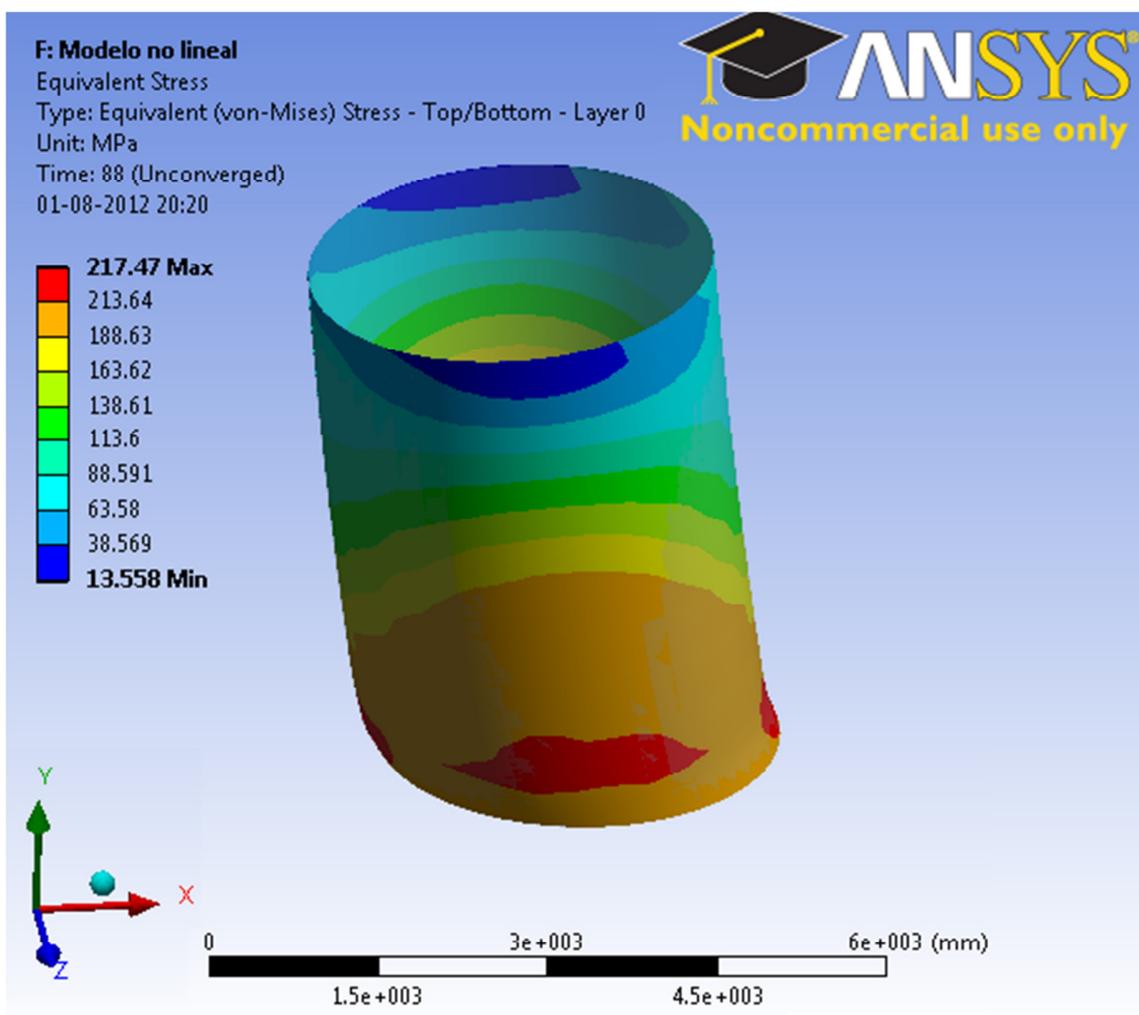


Figura 4-21: Tensiones en el manto – modelo elemento solid

4.1.7 Estanque – Análisis de sensibilidad

Ambos modelos son procesados hasta que la falla haga que el modelo deje de converger. Se observan distintos modos de pandeo y se obtienen las curvas de capacidad. En el caso del estanque con manto de espesor 10 [mm], se aprecia claramente un pandeo punta de diamante en la base (Figura 4-22). Cabe destacar que los mantos no poseen imperfecciones intencionales ni singularidades que condicionen un modo de falla.

Este estanque alcanza una capacidad de corte cercana a los 6000 [kN], cuando se ha desplazado lateralmente poco más de 13 [mm] (Figura 4-23).

La curva de capacidad decae tras alcanzar el peak, señal de que la estructura ya se ha pandeado y que comenzará a dejar de tomar cargas.

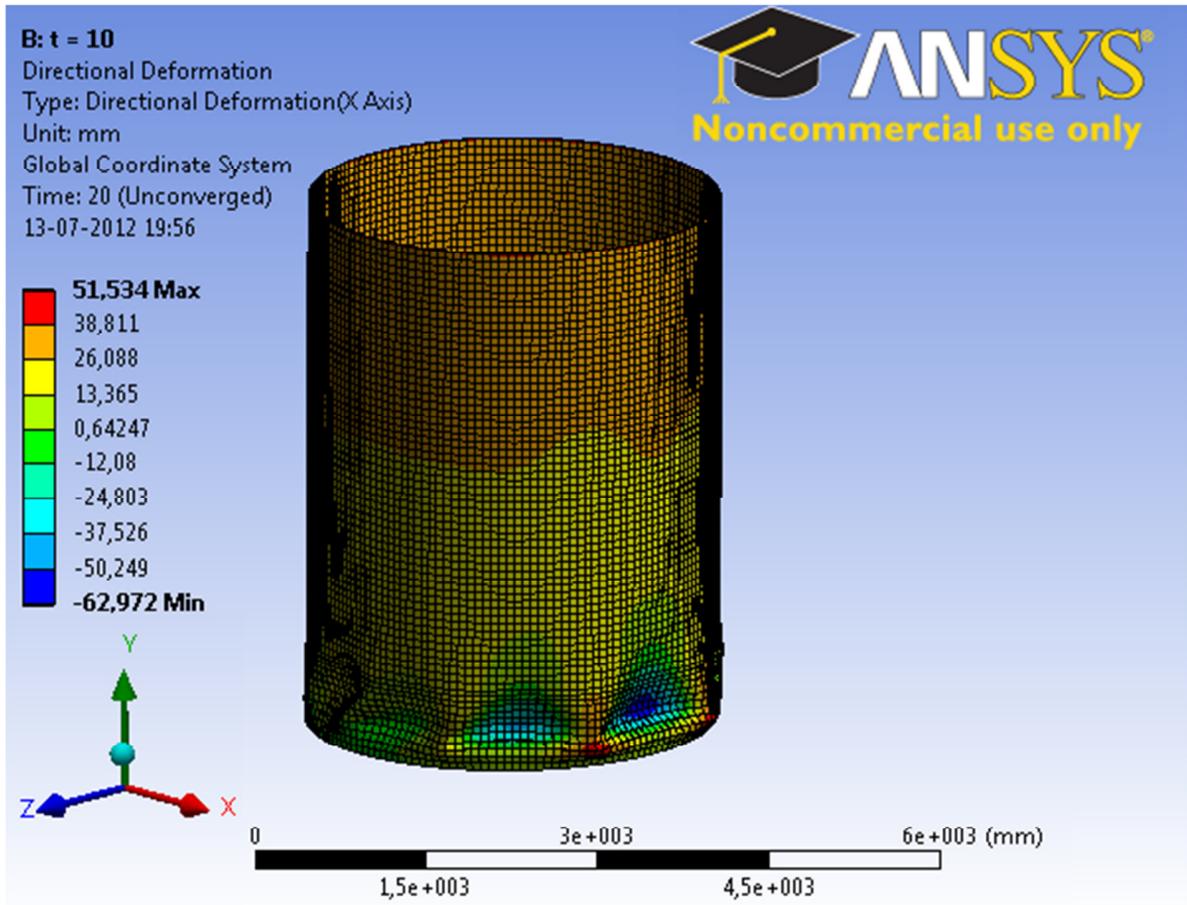


Figura 4-22: Deformación modelo t = 10mm

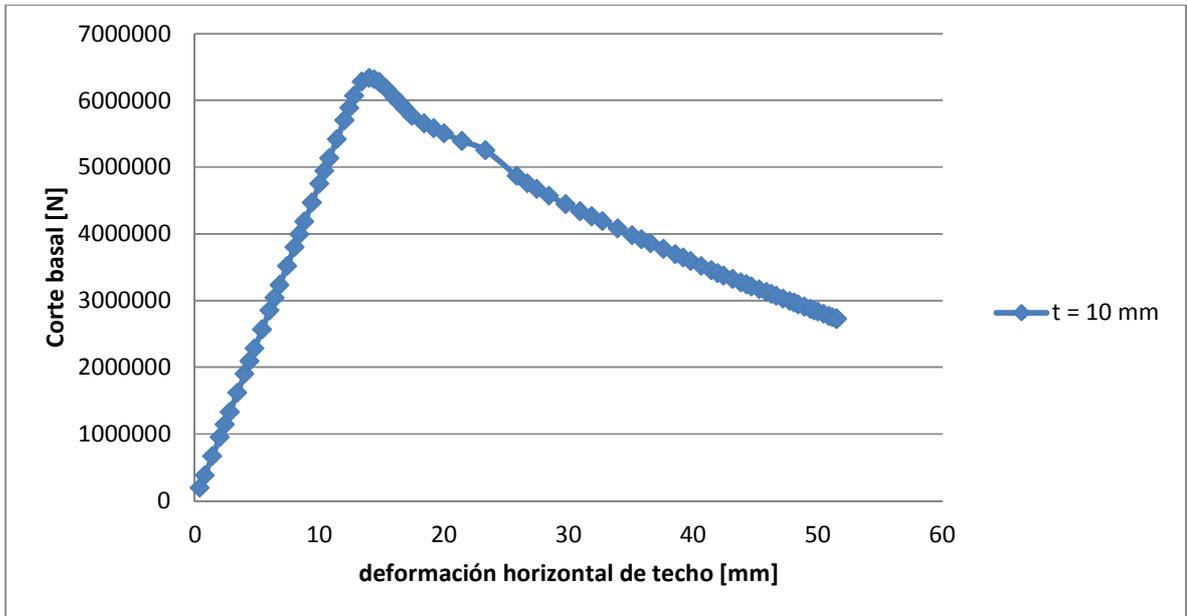


Figura 4-23: Curva capacidad manto 10 mm

El modelo de manto igual a 5 [mm] converge hasta la falla, la cual se corresponde a un pandeo local en el manto, de dimensiones más reducidas y localizado a mediana altura (Figura 4-25). No corresponde a un modo de falla típicamente descrito y se registra cuando el techo se ha desplazado 10,5 [mm], la reacción de corte es de 2563 [kN]. Se observa un comportamiento lineal en esta relación (Figura 4-24).

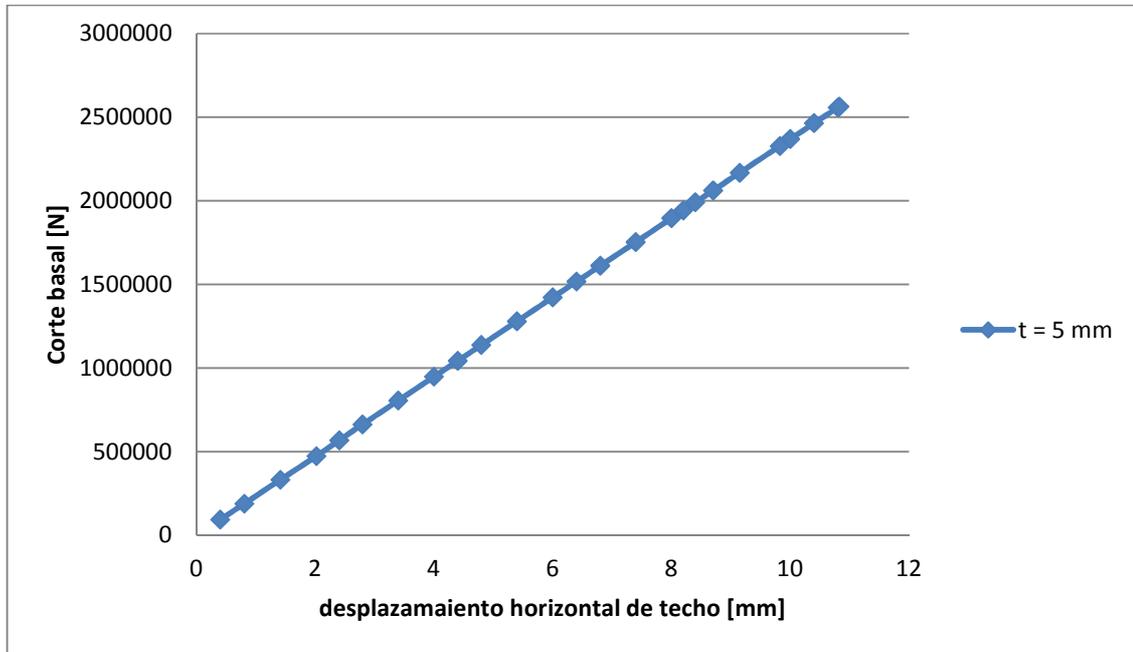


Figura 4-24: Curva capacidad manto 5mm

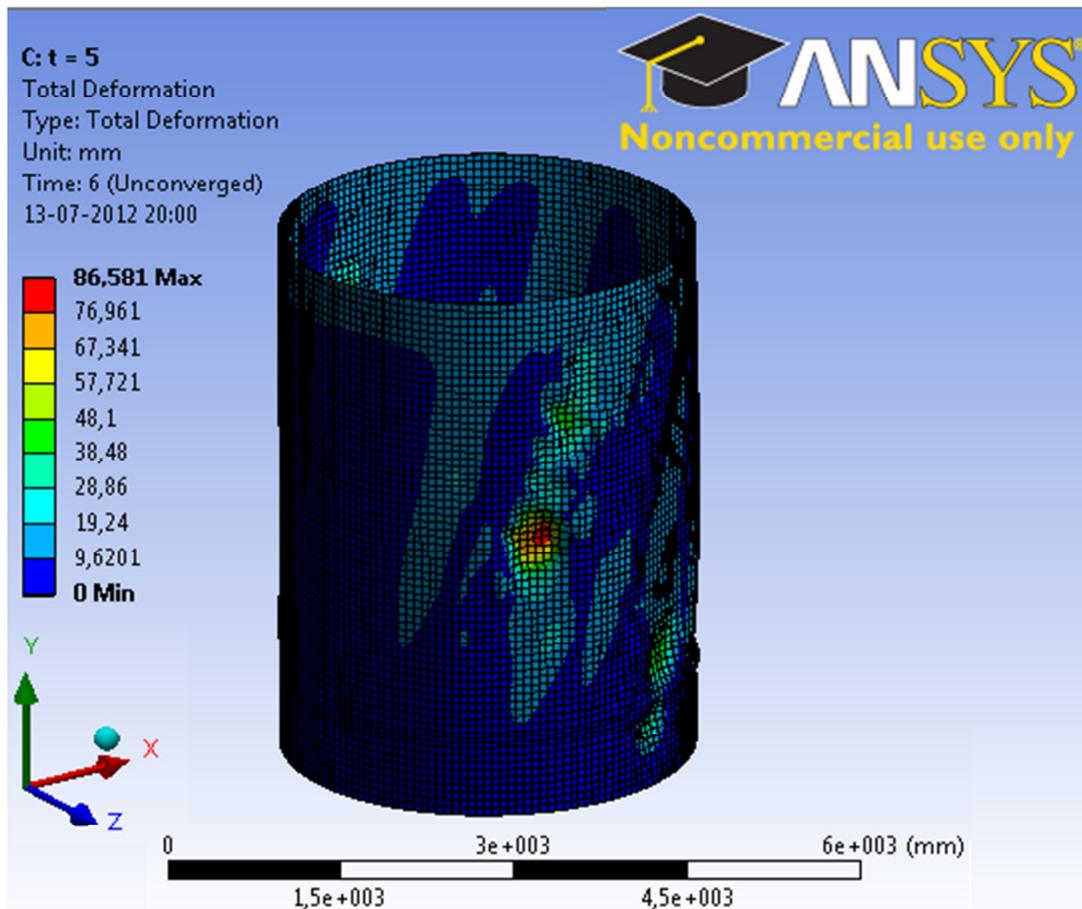


Figura 4-25: Deformación modelo t = 5 [mm]

4.2 Modelos simplificados

Se evalúan los métodos presentados en 2.5, utilizando los parámetros del estanque propuesto

4.2.1 Procedimiento simplificado para análisis sísmico de estanques de almacenamiento de líquidos [1]

Los valores a utilizar son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 C_i &= 6,16 \\
 H &= 4,8 \quad [\text{m}] \\
 \rho &= 1000 \quad [\text{kg/m}^3] \\
 t &= 0,00225 \quad [\text{m}] \\
 r &= 1,8 \quad [\text{m}] \\
 E &= 193000 \quad [\text{MPa}] \\
 m_i &= 40096 \quad [\text{kg}] \\
 h_i &= 2,17 \quad [\text{m}] \\
 m_w &= 887,54 \quad [\text{kg}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_w &= 2,26 & [\text{m}] \\
m_r &= 55,49 & [\text{kg}] \\
h_r &= 4,8 & [\text{m}] \\
m_l &= 48858 & [\text{kg}]
\end{aligned}$$

Se obtiene el periodo y la aceleración a imponer, lo que deriva en las reacciones en la base del estanque:

$$\begin{aligned}
T_{imp} &= 0,066 & [\text{seg}] \\
S_e(T_{imp}) &= 7,74 & [\text{m/seg}^2] \\
Q &= 317,6 & [\text{kN}] \\
M &= 691,4 & [\text{kN}\cdot\text{m}]
\end{aligned}$$

4.2.2 Pandeo plástico de mantos cilíndricos bajo cargas transversales [13]

Para el estanque a estudiar, los valores de los parámetros utilizados son:

$$\begin{aligned}
r &= 1,8 & [\text{m}] \\
t &= 0,0025 & [\text{m}] \\
E &= 193000 & [\text{MPa}] \\
\sigma_y &= 210 & [\text{MPa}] \\
\nu &= 0,3 & [\text{m}]
\end{aligned}$$

La tasa de pandeo plástico para el modelo es $R_t = 1,44$, mayor al rango crítico propuesto, por lo que se espera que el comportamiento del estanque en la falla sea del tipo *punta de diamante*.

4.2.3 Tensión admisible en el manto según la NCh 2369 [8]

Utilizando los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
D &= 3,6 & [\text{m}] \\
t &= 0,0025 & [\text{m}] \\
F_y &= 210 & [\text{MPa}]
\end{aligned}$$

El valor de la tensión admisible en el manto es:

$$F_a = 17,72 [\text{MPa}]$$

4.2.4 Esfuerzos según API 650 [7]

Con los siguientes valores, es posible obtener el periodo asociado al modo impulsivo.

$$\begin{aligned} H &= 4,8 && [\text{m}] \\ \rho &= 1000 && [\text{kg/m}^3] \\ t &= 0,00225 && [\text{m}] \\ D &= 3.6 && [\text{m}] \\ E &= 193000 && [\text{MPa}] \end{aligned}$$

$$T_i = \frac{C_i * H}{\sqrt{\frac{2 * t}{D}}} * \frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}} = 0,067 \quad (4.1)$$

Los esfuerzos de corte y momento derivan del espectro elástico de la norma, de la misma manera como se procede en 2.4.1.

4.3 Comparación y análisis de resultados

Tras la recopilación de resultados, se estudian las similitudes y diferencias entre los cinco modelos del estanque apoyado presentados (tanto 3.2.1 Manto cilíndrico como 3.2.7 Análisis de sensibilidad son análisis paramétricos). Se comparan cuantitativamente los valores recogidos de las curvas de capacidad confeccionadas, así como las tensiones generadas en el manto. Se hace un análisis cualitativo de los tipos de falla registradas para cada modelo.

4.3.1 Curvas de capacidad

Si bien la geometría de los 5 modelos es a grandes rasgos la misma, los perfiles de sollicitaciones cambian para cada caso, lo que repercute en que el comportamiento del sistema sea diferente. En la Figura 4-26 se observa la respuesta de cada modelo frente a la sollicitación aplicada.

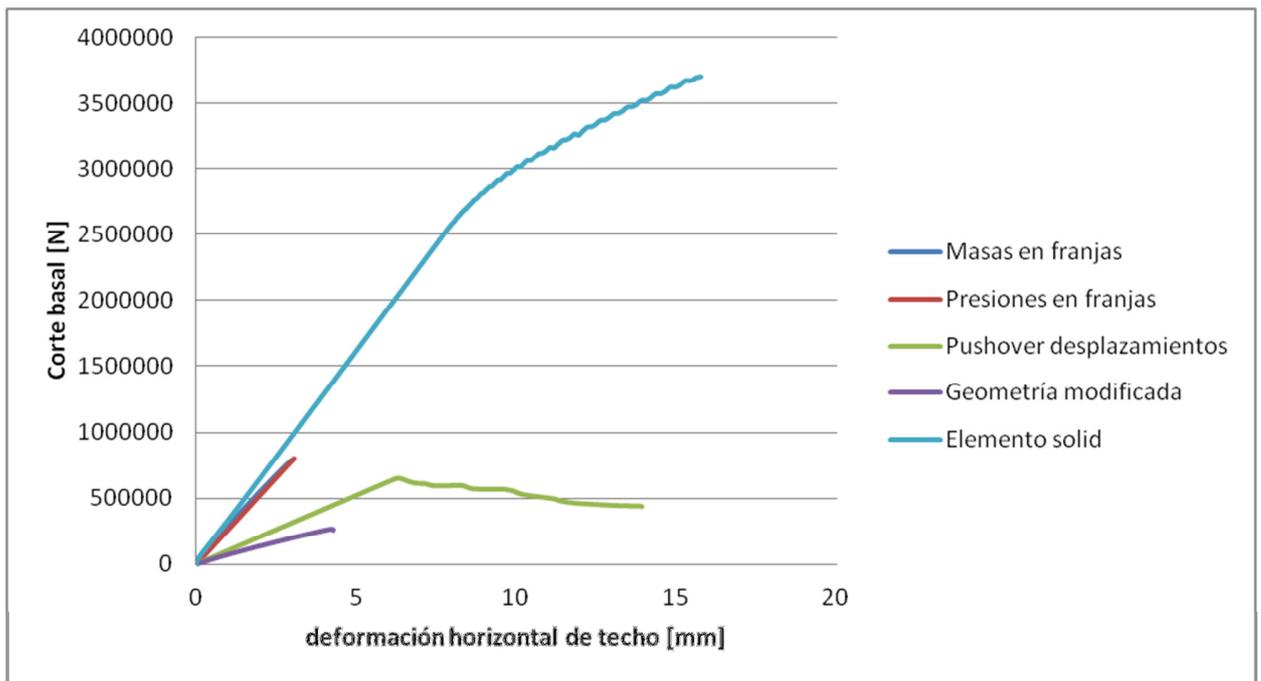


Figura 4-26: Comparación curvas de capacidad

Los estanques cuyos perfiles de carga pretenden representar las presiones hidrodinámicas (3.2.2 Masas en Franjas, 3.2.3 Presiones en franjas y 3.2.6 Elemento Solid) exhiben un comportamiento lineal muy similar, siendo la curva de los modelos con franjas casi idéntica. Estas presentan una pendiente lineal positiva que varía a lo máximo un 20% entre los modelos con franjas y el análisis con el elemento tipo solid.

Los modelos que se basan en el desplazamiento de techo son menos rígidos que los anteriores, es decir, para el mismo esfuerzo de corte basal su deformación horizontal de techo es mayor, siendo más notorio el efecto en el estanque con la geometría modificada, reflejado en que es la curva con la pendiente lineal positiva más baja de los modelos, en conjunto con el análisis pushover desplazamientos. Esto se explica por la forma en que se aplican las fuerzas. Mientras en los modelos de franjas y elemento solid las cargas se aplican distribuidas en el manto, en el esfuerzo en los modelos de desplazamientos se concentra el corte directamente en el anillo del techo, transmitiéndose luego por la estructura hasta los apoyos. A nivel de esfuerzos en la estructura, el diagrama de corte se observa en la Figura 4-27.

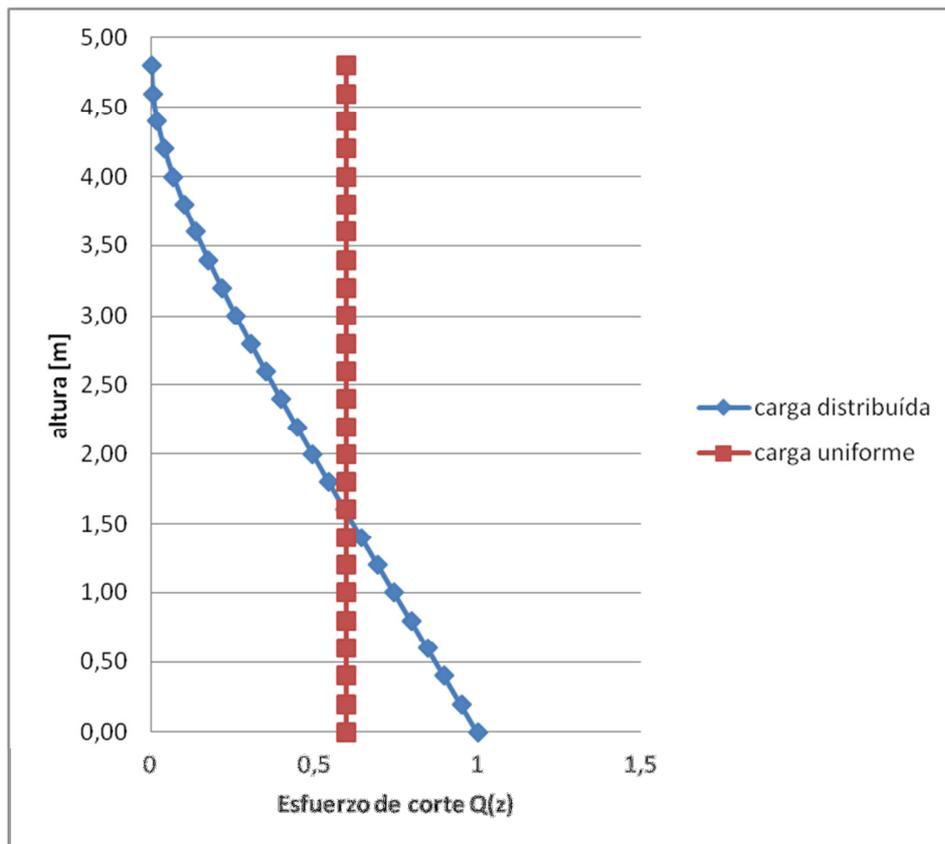


Figura 4-27: Esquema del perfil de esfuerzos de corte en la altura normalizado

En relación a las no-linealidades de los sistemas, se observa que tanto los modelos de franjas (3.2.2 y 3.2.3) como el de geometría modificada, no logran desarrollar claramente este comportamiento y las curvas son casi en su totalidad lineales, tan solo en el momento de la falla se pueden apreciar ciertos cambios de pendiente (Figura 4-26). Esto se debe a que al controlar el pushover por medio de las fuerzas inerciales (aplicando una aceleración), no es posible obtener pendientes negativas en la curva de capacidad y el modelo convergerá hasta la máxima capacidad del estanque, ya sea por no-linealidades geométricas o del material.

En los modelos de pushover desplazamientos y elemento solid se aprecia un claro cambio de pendiente. En el caso del primero, tras alcanzar un corte máximo, la estructura comienza a perder la capacidad de soportar carga a medida que van aumentando las deformaciones, fenómeno que se ve reflejado en la pendiente negativa de la curva (Figura 4-26).

Si se analizan los peak de corte basal (Figura 4-28), se aprecia claramente que el modelo con elemento solid alcanzó la mayor capacidad. Si se analizan por separado los otras cuatro estudios, se ve que alcanzan valores de corte máximo dentro del mismo orden, siendo la mayor diferencia entre los modelos con franjas y el geometría modificada, la cual es cerca de dos veces mayor.

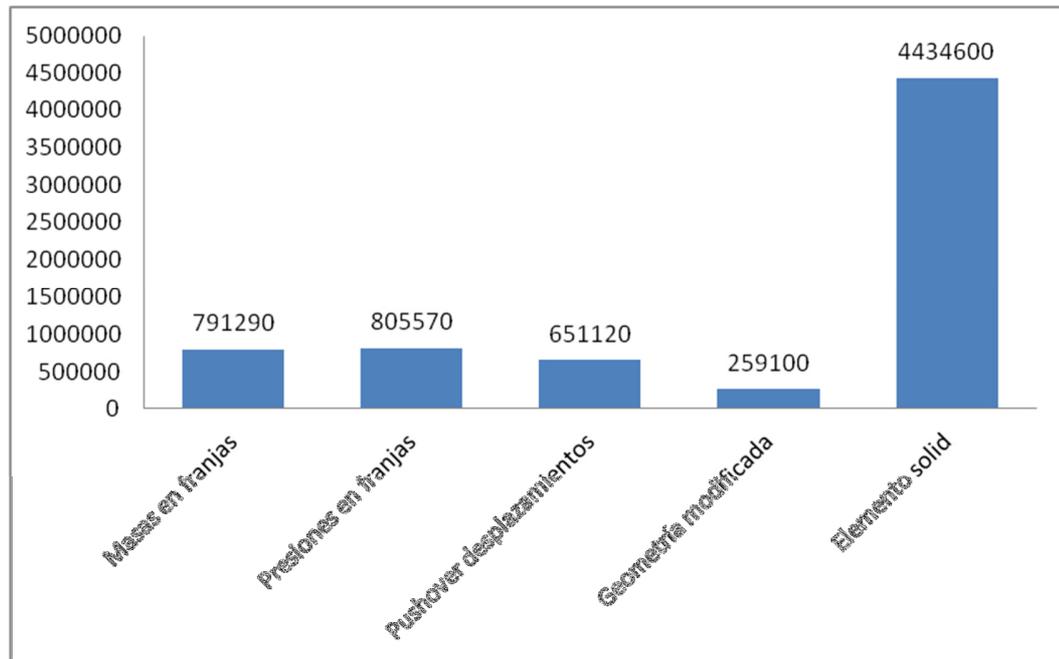


Figura 4-28: Máxima capacidad de corte basal [N]

A nivel de deformaciones (Figura 4-29), el estanque que registró un mayor desplazamiento horizontal de techo fue el modelo elemento solid. El análisis pushover desplazamientos alcanza una gran traslación lateral, dado que al entrar en el rango no lineal degradando su capacidad, puede seguir deformándose, a diferencia de los modelos en franjas y el de geometría modificada, los cuales dejan de converger al alcanzar un peak de capacidad.

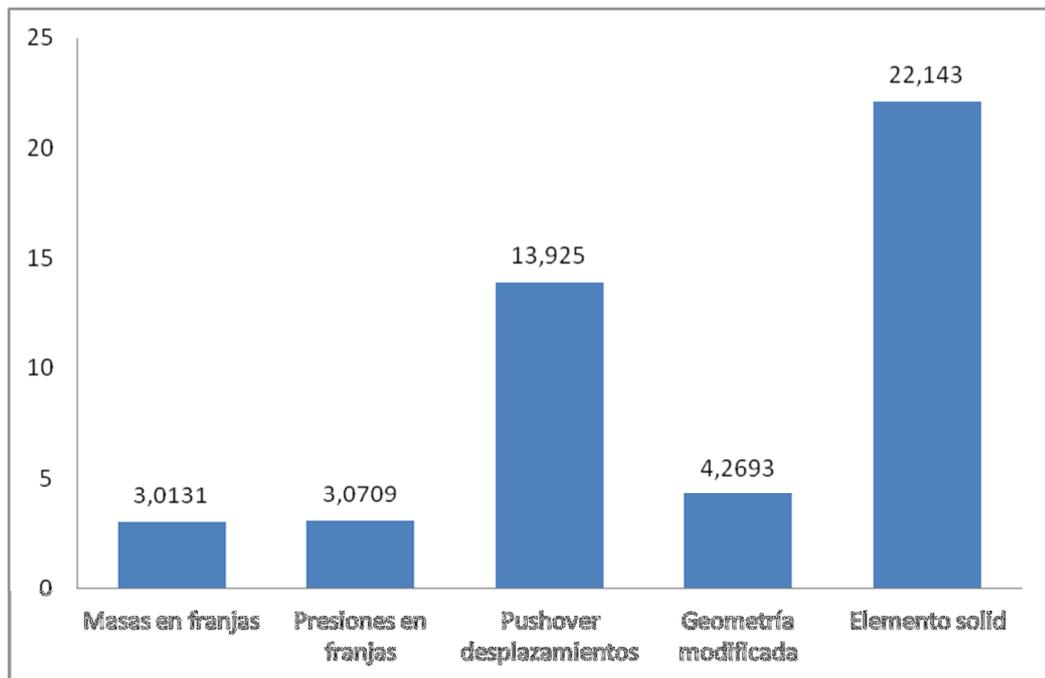


Figura 4-29: Máxima desplazamiento horizontal de techo [mm]

Al analizar ambas comparaciones, se observa que el modelo Elemento solid (3.3.3) alcanza una capacidad de corte basal de más 5 veces la capacidad de los otros modelos, y se deforma casi el doble del modelo pushover desplazamientos (3.3.2.3). Esto se asocia a que la rigidez del elemento solid evita la deformación fuera del plano del manto, no permitiendo así el desarrollo de pandeos locales, los que a la larga son los causantes de las fallas de los otros modelos estudiados.

Si se comparan los resultados de los modelos en el rango lineal (Figura 4-30), se observa que difieren en un 4% como máximo, lo cual tiene sentido ya que todos están basados en la teoría de presiones Veletsos y Shivakumar [5]. A su vez esto reafirma la posibilidad de utilizar estos modelos para el diseño estructural, en particular el de presiones, dado que es el que mejor representa el modelo original.

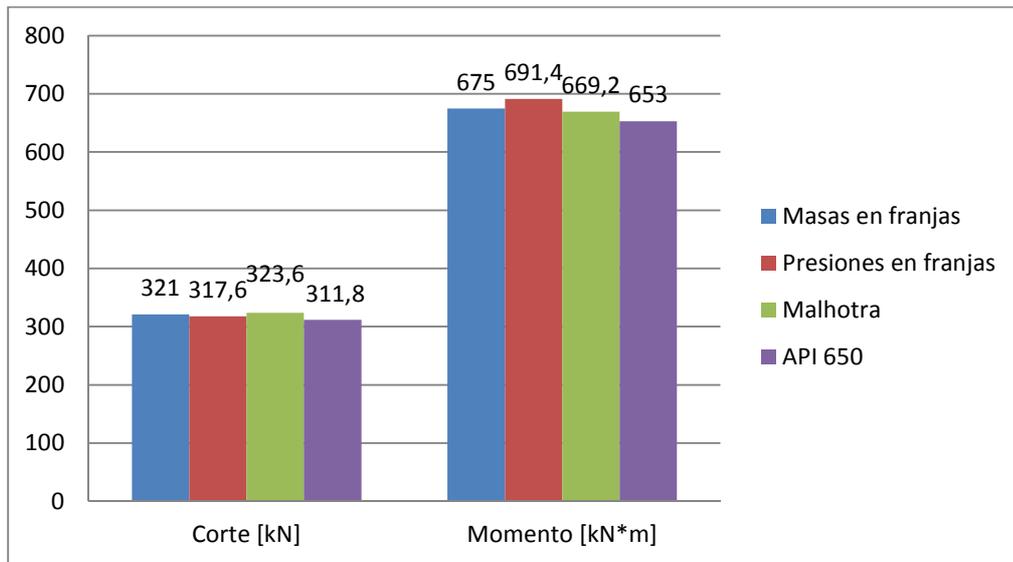


Figura 4-30: Comparación modelos rango lineal

4.3.2 Tensiones en el manto y modos de falla

Al analizar las tensiones en el manto de los distintos modelos, se observan diferencias entre los modelos que representan las presiones hidrodinámicas (masas y presiones en franjas, elemento solid) con los tipo pushover.

A nivel de concentración de tensiones, en los modelos con franjas y el con elemento tipo solid, la parte baja del manto se ve más solicitada y es donde se encuentran los máximos, lo que coincide con descripción de los modos de falla reportados por Sandoval [3]. Los modelos tipo pushover concentraron esfuerzos tanto en la falla diagonal en el manto como en el techo.

Con respecto a la magnitud de las solicitaciones a nivel de manto, el modelo con elemento solid es el que alcanza mayores tensiones (Figura 4-31), lo que se asocia a los grandes desplazamientos de techo alcanzados. Si se compara en el rango lineal las tensiones máximas de los modelos con franjas con la tensión admisible propuesta en la NCh 2369 [8], (Figura 4-32) se observa que estas superan bastante las solicitaciones máximas recomendadas, alcanzando el modelo con presiones en franjas tensiones 3.8 veces más grandes de lo indicado.

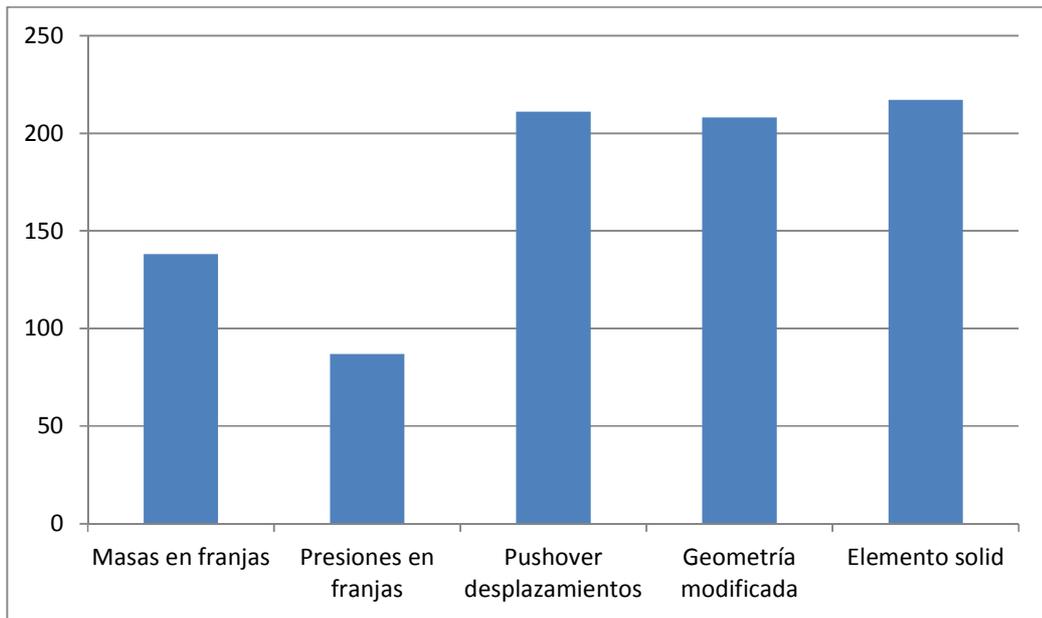


Figura 4-31: Comparación tensiones máximas en el manto [MPa]

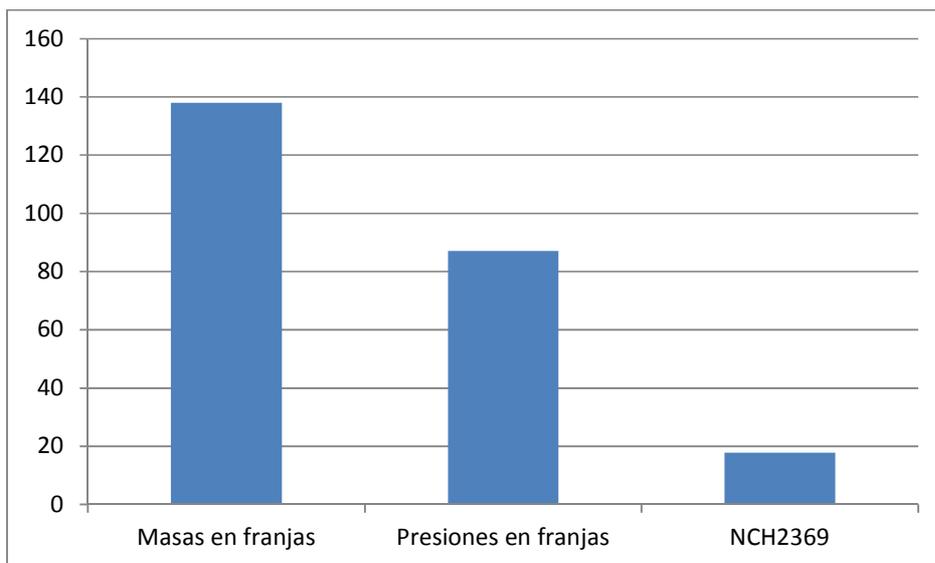


Figura 4-32: Comparación entre las tensiones máximas en el manto de modelos lineales con la admisible impuesta por la norma chilena 2369 y la tensión de fluencia del material [MPa]

A nivel de deformaciones, en el modelo pushover desplazamientos (3.3.2.3), se observa un pandeo diagonal en el sector lateral del cilindro, paralelo al desplazamiento. Si se revisa el vector de tensiones principales en distintos sectores de la geometría, se comprende el comportamiento y las deformaciones registradas. En la Figura 4-33 se exponen los vectores principales de tres puntos 1) Cara posterior, 2) Cara lateral y 3) Cara frontal del manto según el sentido del desplazamiento. Se aprecia como los nodos del punto 1 se encuentran

traccionados y los del punto 3 comprimidos, lo que tiene sentido dadas las solicitaciones aplicadas en el estanque (traslación lateral de techo). El punto 2 de la figura, muestra el estado de tensiones pandeo del manto en la falla, teniendo tracciones diagonales (en rojo) en la dirección longitudinal al pandeo, y compresiones en el sentido transversal, las cuales conllevan a las grandes deformaciones registradas.

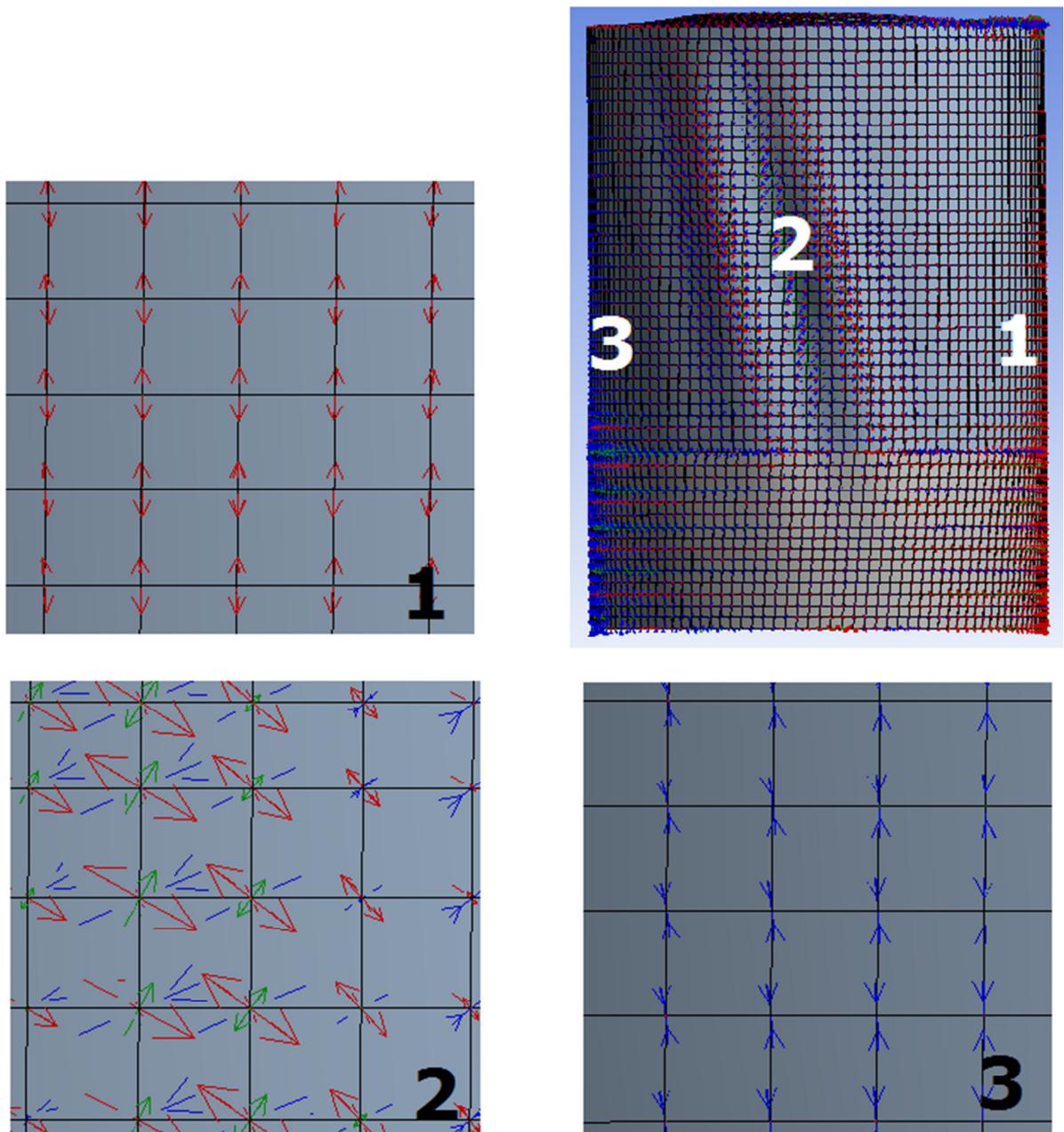


Figura 4-33: Vector de tensiones principales en modelo geometría modificada. Detalle de tres puntos diferentes, en rojo el máximo principal, en azul el mínimo principal y en verde el promedio

5 Conclusiones

Tomando en cuenta los resultados obtenidos y el posterior análisis de cada uno de los modelos confeccionados, es posible rescatar conclusiones relacionadas tanto con el programa computacional, los modelos teóricos y computacionales, así como los valores rescatados.

5.1 El programa

La plataforma Workbench de ANSYS resulta muy eficiente para resolver problemas de mediana complejidad. Entre las ventajas se encuentra la interfaz CAD al momento de trabajar la geometría, ya que es intuitiva para el usuario y ofrece herramientas que facilitan la confección del modelo. Al igual que el diseñador de modelos, la interfaz de procesamiento y obtención de resultados mejora los tiempos de modelamiento a la hora de utilizar las herramientas propuestas.

Si bien es posible incorporar a Workbench la mayoría de las herramientas de ANSYS clásico mediante comandos APDL, esto mengua las ventajas de la interfaz moderna, por lo que si se requiere confeccionar un modelo de mayor complejidad, se recomienda utilizar la plataforma APDL directamente.

Es posible reproducir las fallas observadas en terreno en el manto de los estanques, utilizando las herramientas adecuadas que proporciona el programa, para modelos paramétricos cuyos espesores no representan la realidad de la industria (Figura 5-1). Recurriendo a los elementos SHELL181 se pueden trabajar grandes deformaciones y realizar análisis no lineales que representen correctamente los mantos cilíndricos de los EAIPD.

Dado que el elemento que incorpora ANSYS para modelar fluidos, FLUID80, no compatibiliza análisis no lineales, es posible buscar alternativas a este para representar estos fenómenos. Una de estas puede ser el elemento SOLID185, el cual puede trabajar las grandes deformaciones y reproducir las propiedades del líquido.

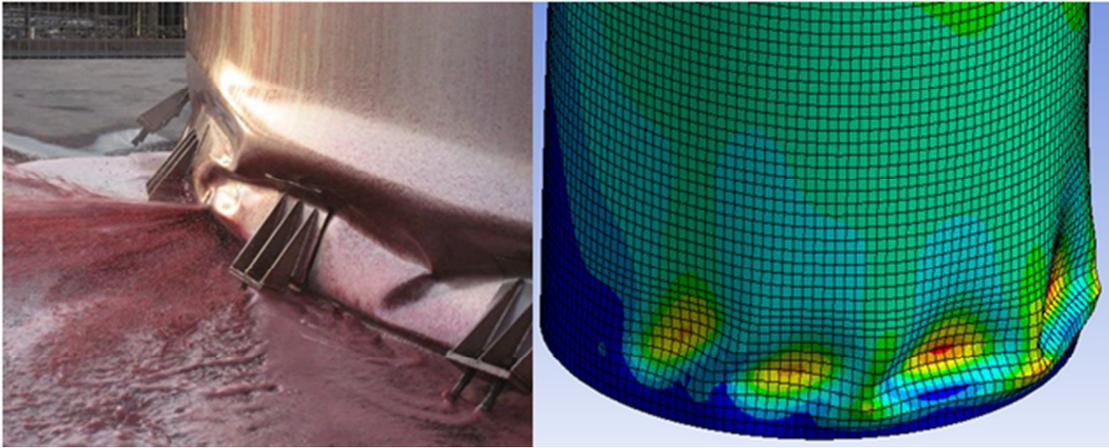


Figura 5-1: Comparación falla real – modelo paramétrico

5.2 Los modelos

Los modelos confeccionados logran representar en mayor o menor medida el fenómeno estudiado. Los modelos con masas distribuidas o el de presiones, se basan en los propuestos de Veletsos y Shivakumar [5], por lo que se espera una respuesta más representativa, con deformaciones que reproduzcan los modos de falla reconocidos, sin embargo, existen detalles en la concepción de los modelos o en las herramientas utilizadas que merman la calidad de la información deseada.

En el caso del primero, se relacionan masas a toda el área del manto, por lo que cuando se aplica una aceleración, además de modelar las presiones hidrodinámicas sobre este, también se aplican subpresiones concentradas, las que a la larga hacen fallar la parte posterior del estanque. Otro detalle de este modelo es que la distribución de las masas no es radial, es decir, no se aplican en la dirección normal al plano del manto, por lo que no representa 100% las presiones hidrodinámicas, solo las fuerzas inerciales y su resultante.

El segundo modelo es el que mejor representa la teoría de las presiones en el manto, ya que puede distribuir tanto en la altura como en el ángulo las solicitaciones, logrando un resultado más continuo y representativo. A pesar de esto, dadas las características de la herramienta utilizada, sólo es posible efectuar análisis del tipo lineal. De todas maneras, esto resulta de gran utilidad para el cálculo y diseño de estanques, ya que se pueden tanto los esfuerzos resultantes de corte o momento basal, así como tensiones en el manto, las cuales pueden dar nociones de que sectores reforzar a la hora de confeccionar la estructura.

Los modelos pushover que incorporan desplazamientos, si bien no representan fehacientemente el perfil de solicitaciones en el manto, logra desarrollar tensiones que lo pueden llevar a la falla. Es de esta manera que con geometrías tales como las de los mantos

cilíndricos inicialmente modelados, o como el estanque de 10 [mm] de espesor (el cual no posee dimensiones típicas reportadas por Garcés [12]), se pueden reproducir las fallas características observadas en terreno tras el terremoto. Por otro lado, este análisis otorga la posibilidad de confeccionar una curva de capacidad aproximada del estanque, la que entrega indicios del comportamiento del estanque posterior a la falla y cual será su capacidad si es que sobrepasó el nivel máximo de deformaciones.

Una de las limitantes de este modelo, es que debido a las condiciones de borde del sistema (geometría, condiciones de apoyo, solicitaciones, materiales entre otros) el problema se vuelve inestable, lo que limita la convergencia y acota la obtención de resultados.

Por último el modelo que incorpora el elemento solid, se espera que represente de mejor manera las presiones hidrodinámicas del modelo, sin embargo no logra conllevar a una típicamente observada, por lo que las no-linealidades registradas corresponden a fenómenos relacionados al material y no geométricas.

Para que se desarrollen las concentraciones de tensiones en la base del manto, o bien en los bordes donde existen singularidades, tales como cambios de espesor; es necesario cierto valor de la relación radio-espesor del manto. Esta es una de las razones con las cuales se explica el tipo de falla observado en la geometría seleccionada, la cual posee un espesor de virola muy delgado en comparación al radio de la estructura.

Finalmente se concluye que si bien, no se logran reproducir las fallas registradas en terreno en estanques de geometría estándar como los presentados en Garcés [12], los modelos presentados entregan buenas aproximaciones dependiendo del análisis deseado. En el caso de un análisis lineal, el modelo de presiones en franjas resulta ser el más representativo, ya que distribuye de mejor manera las solicitaciones y sigue el perfil de cargas propuesto en las normativas vigentes de estanques de acero. Ahora bien, si se desea conocer el comportamiento no lineal de la estructura y su capacidad remanente después de haber alcanzado el peak, el análisis pushover entrega una respuesta conservadora a nivel de esfuerzos y si bien no reproduce el estado de cargas propuesto por Veletsos y Shivakumar [5], si entrega una aproximación de como será el comportamiento del estanque a nivel de curva de capacidad.

6 Bibliografía

- [1] P. Malhotra, «Practical nonlinear seismic analysis of Tanks,» *Structural Engineering International*, pp. 197-201, 2000.
- [2] R. Herrera, J. F. Beltrán, E. Garcés, J. L. Almazán, V. Sandoval, A. González, E. González, A. Costa y P. Middleton, «Terremoto del Maule Chile 2010 Manual de Buenas Prácticas y recomendaciones sísmicas para equipos de boedgas viníferas», Vinnova, 2011.
- [3] V. Sandoval, «Análisis de los efectos del terremoto del 27 de Febrero de 2010 en Estanques de Acero Inoxidable de Pared Delgada (EAIPD) con Patas y Desarrollo de un Sistema de Protección Sísmica para estas Estructuras», Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificie Universidad Católica de Chile, 2011.
- [4] G. Fecci, «Análisis Transiente de un Estanque de Acero Considerando Interacción Fluído Estructura», Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2011.
- [5] J. C. Virella, L. A. Godoy y L. E. Suárez, «Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation,» *Journal of Constructional Steel Research*, nº 62, pp. 521-531, 2006.
- [6] D. Barros, «Estanques de acero inoxidable de la industria vitivinícola: Revisión del diseño,» Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2007.
- [7] American Petroleum Institute, *Welded Steel Tanks for Oil Storage*, API Standard 650, 2007.
- [8] Instituto Nacional de Normalización, NCh 2369 of 2003, *Diseño sísmico de estructura e instalaciones industriales*, Santiago, Chile.
- [9] Euro Inox and The Steel Construction Institute, «Manual de diseño estructural», 2006.
- [10] [En línea]. Available: <http://www.matweb.com>. [Último acceso: 2012].

- [11] «<http://www.aksteel.com>,» 2012. [En línea].
- [12] E. Garcés, Recomendaciones de uso para estanques de acero inoxidable en la industria vitivinícola y generación de manual de buenas prácticas, Memoria para optar al grado de ingeniero civil, Universidad de Chile, 2012.
- [13] C. ZHANG, Y. LIU y Y. Goto, «Plastic buckling of cylindrical shells under transverse loading,» *Tsinghua Science and Technology*, vol. 13, nº 2, pp. 202-210, Abril 2008.
- [14] «http://www.edr.no/blogg/ansys_bloggen/ansys_tutorial_non_linear_buckling,» [En línea]. [Último acceso: 2012].
- [15] «<http://www.eng-tips.com>,» [En línea]. [Último acceso: 2012].
- [16] «<http://www.cfd-online.com>,» [En línea]. [Último acceso: 2012].
- [17] Ansys Inc., *Structural Analysis Guide*, 2009.