

EVALUACIÓN DE FALLAS DE TANQUES HORIZONTALES DE ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS

Rossana C. Jaca^a, Carlos A. Burgos^b y Luis A. Godoy^c

^a *Grupo de Métodos Numéricos y Experimentales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar*

^b *Grupo de Métodos Numéricos y Experimentales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, carlosburgoss@hotmail.com*

^c *CONICET y FCEFN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina, lgodoy@com.uncor.edu*

Palabras Clave: tanques horizontales, fallas, cáscaras, vacío, descenso apoyos.

Resumen. Tanques cilíndricos horizontales son usados en la industria del petróleo para almacenar combustible, agua o fluidos producto de las operaciones de producción de petróleo. Estos tanques atmosféricos generalmente son construidos en acero y están montados sobre apoyos de tipo cuna o silla de montar en dos o tres puntos. Si bien existen códigos aplicables a su diseño, en muchos casos son construidos en talleres en base a experiencia propia presentándose posteriormente daños con riesgos de pérdidas de fluido y posible contaminación ambiental. Hay escasas contribuciones sobre el tema en la literatura técnica. En este trabajo se pretende caracterizar los modos de falla de esta tipología de tanques horizontales frente a solicitaciones de presión hidrostática combinada con vacío interior por operaciones de descarga y/o por asentamientos diferenciales de apoyo. Estos tanques son de menor tamaño que los verticales y se han observado formas de falla de características diferentes respecto a los de eje vertical. El análisis se realiza mediante una modelación de la cáscara con un código de elementos finitos de propósitos generales. Se implementa análisis de bifurcación lineal (LBA) y análisis no lineal geométrico (GNLA) para evaluar las deformadas asociadas a estados críticos y poscríticos, comparando con las observadas en tanques con daños.

1 INTRODUCCION

Los tanques atmosféricos ubicados sobre el terreno son la forma usual de almacenamiento de fluidos, y si bien se construyen con diferentes materiales, los más usados se fabrican en acero y con forma cilíndrica de eje vertical u horizontal. Los tanques horizontales son en general de dimensiones pequeñas comparados con los verticales que se usan para almacenamiento de petróleo o sus derivados, estando su fabricación a cargo de empresas más pequeñas que las que se encargan de fabricar grandes tanques. Las normativas también difieren, y en general atienden los tanques verticales de grandes dimensiones, mientras que para tanques pequeños se concentran principalmente en los verticales. Existe una variedad de normativas aplicables a tanques de diferentes capacidades de API (American Petroleum Institute), BS (British Standard Institution) y UL (Underwriters Laboratories Standard), pero solamente algunas de ellas hacen referencia a tanques horizontales.

Los estudios sobre tanques de almacenamiento de fluidos presentes en la literatura técnica en su mayoría están referidos a tanques verticales de grandes dimensiones, la existencia de trabajos sobre tanques horizontales es escasa y vinculada a algunos grupos particulares de investigadores. Chan et al. (1998) presentaron un análisis sobre pandeo de recipientes horizontales con contenido de agua apoyados sobre soportes, con base analítica y experimental. Determinaron que las tensiones que producen el pandeo se desarrollan en la parte superior e inferior del cilindro a la mitad de la luz entre los apoyos y en la zona de los apoyos. Otros estudios sobre tanques horizontales ubicados sobre y bajo el terreno fueron realizados por Magnucki y Stasiewicz (2003) identificando las relaciones entre espesor y radio que producen cargas críticas de pandeo. El estado de cargas analizado para tanques sobre el terreno fue una combinación de presión hidrostática y bajas presiones internas negativas. Los análisis fueron realizados en forma analítica mediante la evaluación de autovalores y autovectores. Otros trabajos del mismo grupo de investigadores (Jasion y Magnucki, 2007; Jasion, 2008) son análisis numéricos donde muestran las mejoras que se obtienen en el comportamiento de tanques horizontales si el cuerpo del tanque presenta una forma de barril con respecto a una forma cilíndrica.

Una causa de falla en tanques de almacenamiento de fluidos suele ser la existencia de vacío o presiones negativas que puede llevar la estructura al colapso para presiones aun menores a las de trabajo. El vacío en el tanque puede producirse durante una operación de descarga del fluido por bombeo, debido al mal funcionamiento de la válvula de alivio o venteo o porque éstas se encuentran obstruidas. También puede ocurrir que debido a la presencia de vapor en la parte superior del tanque se desarrollen presiones negativas por un enfriamiento rápido.

Diferentes autores han reportado la realización de estudios experimentales sobre cilindros o tanques de almacenamiento verticales y la influencia en las cargas de pandeo de la presencia de imperfecciones geométricas (Hornung y Saal, 2002; Paor et al, 2012). Jaca y Godoy (2008) realizaron estudios numéricos considerando no linealidad geométrica (GNLA) sobre tanques verticales colapsados bajo vacío. Otro posible origen de fallas en estructuras de láminas es la existencia de asentamientos diferenciales en los apoyos que generan importantes desplazamientos perpendiculares a la cáscara. Godoy y Sosa (2003) evaluaron el efecto de asentamientos localizados de apoyos sobre la pared de tanques de almacenamiento de petróleo y derivados de grandes dimensiones, mediante una metodología numérica y experimental. Fernández et al. (2010) analizaron el comportamiento estructural de naves industriales frente a descenso diferencial de un apoyo, donde se evalúa la magnitud de los desplazamientos en el cerramiento lateral inducidos por el asentamiento localizado de un apoyo y la configuración deformada del sistema.

El objetivo de este trabajo es estudiar posibles modos de falla de tanques horizontales de almacenamiento de fluidos por cargas de vacío, fluido combinado con vacío y/o asentamientos diferenciales de apoyos. Se analiza un tanque colapsado en particular tratando de identificar las posibles causas del daño presente en dicha estructura.

En la Sección 2 se presenta una descripción de la tipología de la estructura a estudiar y las normativas aplicables a tanques horizontales. La Sección 3 detalla el modelo analizado y las características de la simulación. En la Sección 4 se muestran los resultados obtenidos para una combinación de carga hidrostática y vacío, mientras que en la Sección 5 se analiza las consecuencias sobre la estructura que puede producir un asentamiento diferencial de los apoyos.

2 TANQUES HORIZONTALES

La base de diseño para los tanques horizontales usados para almacenamiento de fluidos son las cargas gravitatorias del propio material y la presión hidrostática del fluido. De esta manera las presiones desarrolladas son bajas y se calculan como tanques atmosféricos con válvulas de venteo para asegurar esa condición. Estos tanques aéreos son usados en la industria petroquímica para almacenamiento de agua, combustibles derivados del petróleo o fluidos usados en la producción de petróleo en una condición de fijos en un lugar, si bien pueden ser transportables esa operación se realiza sin contenido interior. Son tanques de dimensiones menores a los verticales y las relaciones entre radio y espesor (r/t) más comunes oscilan entre 150 y 500, cuando se diseñan ajustados a normativas. En general, los tanques disponibles de este tipo tienen una capacidad máxima de hasta 200m^3 y suelen ser construidos en fábrica usando como material chapas de acero, en algunos casos se usa acero inoxidable si es requerido por las características del fluido.

Los tanques tienen un cuerpo cilíndrico con extremos planos, cónicos o curva con forma de domo esférico rebajado. La Figura 1 muestra un esquema con las principales dimensiones geométricas: longitud (L) total del tanque, diámetro (D) del cilindro, separación (s_3) y ancho (a) de soportes de apoyo y profundidad de extremo (s_1). Los soportes suelen designarse como cunas de apoyo y tiene como función mantener elevada la posición del tanque para permitir una visión clara con fines de inspección del fondo. Según el diseño, los tanques pueden presentar dos o tres cunas de apoyo. La Figura 2(a) muestra un tanque con dos soportes y la Figura 2(b) presenta un detalle de cuna. Este tipo de soportes acompañan la forma cilíndrica del tanque y están unidos al cilindro mediante una chapa soldada para reforzar la zona de contacto presentando diferentes formas en la parte inferior vertical.

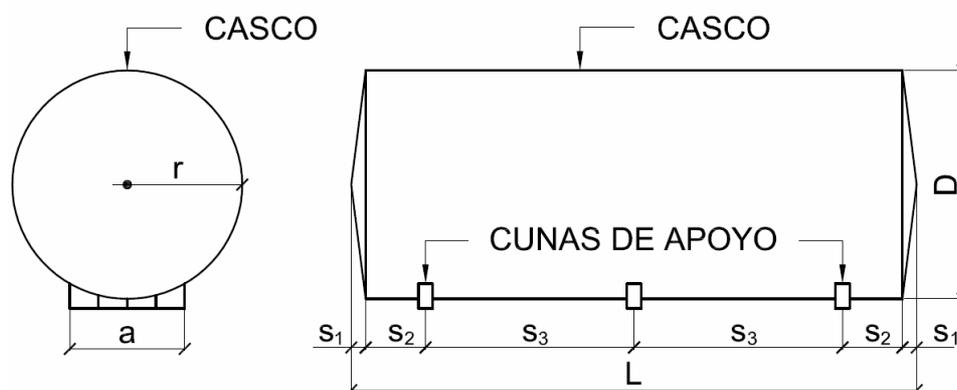


Figura 1: Esquema de la geometría de los tanques horizontales.



Figura 2: Tanques horizontales, (a) Extremos planos con dos soportes, (b) Detalle de cuna de apoyo.

2.1 Normativas

Para el cálculo, diseño y construcción de tanques de almacenamiento de fluidos existen varias Normas y Códigos, pero las más difundidas y empleadas en las industrias de procesos son las del American Petroleum Institute (API). Una de las más difundidas para tanques de almacenamiento es API Standard 650 (2010) que es aplicable a grandes tanques verticales soldados en el campo, aéreos, atmosféricos que operan a presiones menores a 3.5kPa. Para tanques de menores dimensiones, API ha desarrollado otras especificaciones según el volumen del recipiente. API Specification 12D (1994) es aplicable a tanques horizontales o verticales soldados en el campo para almacenaje de líquidos de producción y con capacidades estandarizadas entre 75 y 1500m³. API Specification 12F (1994) se aplica a tanques horizontales o verticales soldados en taller para almacenaje de líquidos de producción y con capacidades estandarizadas entre 13.5 y 75m³. Las especificaciones API 12D y 12F están diseñadas principalmente para servicios petroleros, mientras que API-650 es más general permitiendo diseñar tanques de cualquier dimensión y requiere más ingeniería para su diseño, cálculo y construcción.

Estos códigos API cubren el diseño, fabricación, inspección, montaje, ensayos y mantenimiento de tanques y fueron desarrollados para el almacenaje de productos de la industria petrolera y petroquímica, pero también se aplican para almacenar numerosos productos en otras industrias. Si bien estas normas cubren muchos aspectos, no todos están contemplados, razón por la que existen otras normas complementarias a las mismas. Una de ellas, que es aplicable al tipo de tanque estudiado en este trabajo, es el Standard UL 142 (1998) que cubre tanques de acero de diferentes diseños soldados en taller para almacenaje de líquidos inflamables y combustibles, para volúmenes comprendidos entre 2 y 190m³. Underwriters Laboratories (UL) es una compañía de certificación y consultoría en seguridad para la industria del seguro, que además provee asistencia en validación, ensayos, auditoría y servicios de entrenamiento destinados a fabricantes, diseñadores, empresas de servicios y consumidores. Otra norma aplicable es British Standard BS-2594 (1975) destinada a tanques cilíndricos horizontales de acero al carbono soldados para tanques con capacidad variable entre 5 y 90m³.

Los códigos mencionados anteriormente establecen características geométricas de los tanques para rangos de volúmenes específicos. El tanque a estudiar tiene un volumen de aproximadamente 25m³, API 12F establece un espesor mínimo para el cilindro de ¼" (6.35mm) mientras que UL-142 fija como valor mínimo 6mm para un diámetro máximo de 3.7m. Ambas normas establecen presiones de trabajo menores a 3.5kPa. BS-2594 fija condiciones de trabajo con presiones menores a 40kPa medidas en la parte superior del tanque

y vacío máximo de 1kPa, como admite presiones mayores el espesor mínimo establecido para el tanque estudiado es de 8mm, tanto para el cilindro como para los extremos. El código API 12F no hace mención a espesores mínimos de extremos mientras que UL-142 fija un espesor mínimo de 5/16" (7.9mm) si el extremo fuera plano con diámetros menores a 1.8m y para diámetro mayores establece la necesidad de colocar refuerzos en la placa de extremo. Para extremos con forma de domo esférico indica una profundidad mínima de 89mm. No menciona extremos cónicos.

Resumiendo lo establecido por las normas para un tanque atmosférico como el estudiado, el espesor mínimo debería ser de 6mm. La chapa de espesor comercial 1/4" cumple el requerimiento de espesor si el diseño del tanque fuera en base a las normativas existentes.

3 CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE MODELADO

Con el fin de investigar comportamientos típicos de tanques horizontales y sus formas de falla asociadas, se ha investigado un caso específico que se ha encontrado en una granja de tanques en una industria petrolífera. Las ventajas de estudiar este caso no se limitan a que sea un tanque real, sino que además ha fallado bajo condiciones de operación, presentando un patrón de deformaciones tal como se muestra en la Figura 3. La empresa propietaria del tanque carece de información relacionada a las condiciones bajo las cuales se produjo la falla, debido a que la misma ocurrió en un periodo anterior a su adquisición de la planta. Este es un buen desafío, dado que permite investigar varios escenarios de carga y operación, y los modos de falla asociados a inestabilidad. En el proceso de representar la falla específica que se visualiza en la figura, es posible aprender acerca de los modos de deformación y niveles de carga que se pueden esperar en tanques de estas geometrías.

Las dimensiones del tanque fueron escaladas a partir de la imagen de la Figura 3 y para el espesor se adopta en primera instancia el valor mínimo por norma. Por lo tanto, se estudia un tanque cilíndrico horizontal con diámetro (D) de 2.4m y longitud (L) 5.9m, con un espesor de cáscara de 1/4". El tanque se vincula a los tres apoyos mediante una chapa adicional de espesor (t) de 1/4". Los extremos son cónicos con chapa de igual espesor a la del cilindro. El tanque está fabricado con acero ASTM A36, con módulo de Elasticidad de 206MPa y coeficiente de Poisson de 0.3. En base al esquema de la Figura 1, la separación entre los apoyos (s_3) es 2.175m, la separación de los apoyos externos hasta los extremos (s_2) es 0.825m y la profundidad del extremo cónico (s_1) es 0.15m.



Figura 3: Tanque cilíndrico horizontal con daño.

Para la modelación se consideran como estados de cargas: peso propio, fluido interior con diferentes alturas y vacío, combinados bajo diferentes condiciones. Se supone agua como fluido interior, ya que los derivados del petróleo tienen una densidad menor. Además se evalúa la posibilidad de que haya ocurrido un descenso de apoyo.

3.1 Simulación computacional

La simulación se realiza con el código de propósitos múltiples ABAQUS (2006), con elementos de cáscara cuadráticos rectangulares de 8 nodos (S8R5), en el cuerpo cilíndrico del tanque y apoyos, y triangulares de 6 nodos (STRI65) con cinco grados de libertad por nodo en los extremos cónicos. La mayor dimensión de los elementos es de 0.15 m, que permite obtener errores menores al 0.04% en las cargas críticas. El estudio comprende la evaluación de cargas críticas y formas de modo asociadas mediante bifurcación lineal (LBA) en una primera instancia para tener una referencia de los valores a los que pueden aparecer problemas de inestabilidad del equilibrio. Además, se realiza un análisis no lineal geométrico (GNLA) por el método de Riks (1972, 1979) para obtener una mejor evaluación de la respuesta de la estructura, exhibiendo el comportamiento poscrítico. Este método permite descubrir la trayectoria de equilibrio planteando un incremento de carga automático en una escala normalizada de tiempo donde un estado de carga determinado es incrementado proporcionalmente.

ABAQUS permite realizar un análisis dividido en pasos (steps) donde en cada paso se puede cambiar las condiciones de borde o estados de carga. En este estudio se usó esa posibilidad con el objeto de simular diferentes condiciones que podrían generar la falla de la estructura. El método de Riks puede ser implementado en varios pasos considerando la carga actual P expresada como,

$$P = P_0 + \lambda (P_{ref} - P_0). \quad (1)$$

donde P_0 es la carga al final del paso previo, P_{ref} es la magnitud de carga correspondiente al paso actual y λ es el factor de proporcionalidad de carga. De esta manera se puede simular la acción de vacío solamente sin ninguna carga previa o considerar en un paso la acción de una presión hidrostática dada por una cierta altura (h) de fluido y en el paso siguiente una carga uniforme de presiones negativas para representar el vacío. También se considera como una simulación más cercana al proceso real de descarga una aplicación del método de Riks en el que simultáneamente disminuye la magnitud de la presión hidrostática y aumenta el vacío hasta que no hay más fluido en el interior del tanque y a continuación, en otro paso, una carga de vacío incremental.

4 COMBINACIÓN DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA Y VACÍO

4.1 Análisis de Bifurcación Lineal

Como una forma de abordar el análisis en una primera etapa se estudian los modos de falla por vacío interior asumiendo que una mala maniobra en el proceso de vaciado puede producir daños por esta causa. Para ello se realiza un análisis de bifurcación lineal para identificar las cargas críticas y formas de modo asociadas.

La Tabla 1 muestra las cargas críticas asociadas al primer modo para el caso que el tanque no tenga fluido en el interior o un nivel de fluido variable con alturas entre 0.5 y 2.4m. Se puede observar que a medida que el nivel del fluido es mayor las cargas críticas aumentan indicando el efecto estabilizante del fluido frente a la acción del vacío solamente. Dado que

tanto el cilindro como los extremos cónicos tienen el mismo espesor y que se trata de un cono rebajado, las deformaciones asociadas a los primeros modos de pandeo se concentran en los extremos y en modos altos aparecen deformadas en el cuerpo cilíndrico, en el modo 17 para este tanque. La Figura 4 muestra las formas de modo correspondientes al primer modo y al modo 17, para el caso en que no haya fluido. En la Figura 5 muestran las formas del primer modo y del modo 13 para una altura de fluido de 2.4m y se puede observar que las deformaciones se desplazan a la parte superior del tanque aumentando la carga crítica.

Presión hidrostática		Carga Crítica	
h	p	λ^C	
[m]	[kPa]	[kPa]	kg/cm ²
0.00	0	68.82	0.68
0.50	4.90	68.92	0.68
1.00	9.80	69.77	0.69
1.50	14.70	71.09	0.70
2.00	19.60	74.04	0.73
2.40	23.52	77.84	0.77

Tabla 1: Cargas críticas para diferentes niveles de fluido interior (t=6.35mm).

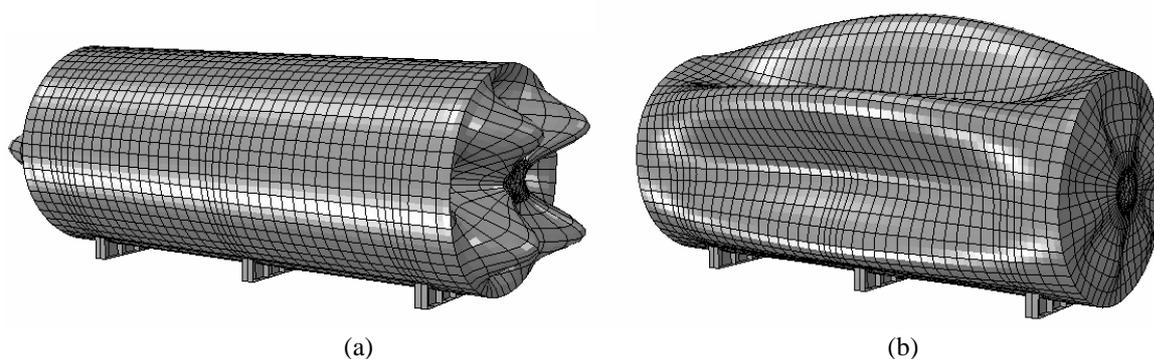


Figura 4: Formas de modo para vacío interior: (a) Primer modo, deformaciones concentradas en las tapas cónicas; (b) Modo 17, deformaciones en el cilindro.

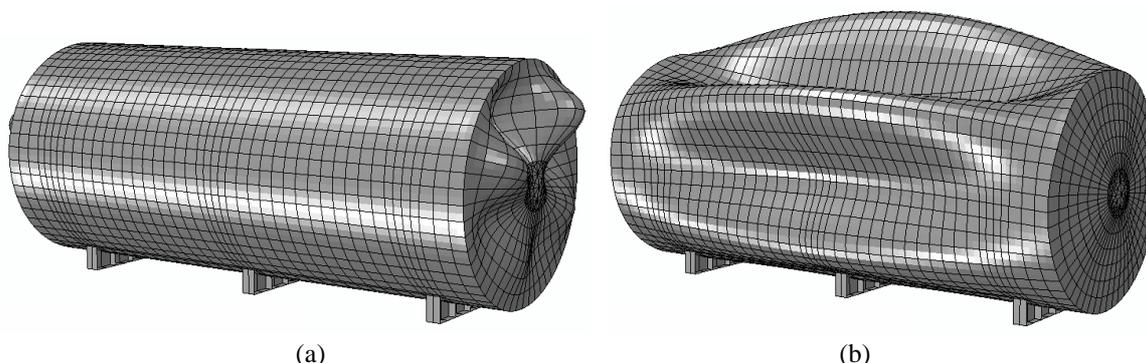


Figura 5: Formas de modo para vacío interior, con un nivel de fluido h=2.4m, (a) Primer modo ($\lambda^C = 77.84\text{kPa}$), (b) Modo 13 ($\lambda^C = 99.93\text{kPa}$)

Si el espesor del tanque es menor, las cargas críticas para los mismos estados de carga disminuyen considerablemente. La Tabla 2 muestra los valores obtenidos para los espesores de 3/16" y 1/8" y en la Figura 6 se muestra su variación en función de la relación radio-

espesor (r/t). Al reducir los espesores las formas de modo obtenidas presentan características similares a las observadas en las Figuras 4 y 5 donde los primeros modos tienen las deformaciones concentradas en los extremos cónicos y modos superiores con deformaciones en el casco del tanque.

Presión hidrostática		$t = 3/16'' (4.76\text{mm})$		$t = 1/8'' (3.17\text{mm})$	
h	p	λ^c		λ^c	
[m]	[kPa]	[kPa]	kg/cm^2	[kPa]	kg/cm^2
0.00	0.00	31.57	0.31	10.76	0.11
0.50	4.90	31.66	0.31	10.84	0.11
1.00	9.80	32.12	0.32	11.01	0.11
1.50	14.70	32.82	0.32	11.20	0.11
2.00	19.60	35.08	0.35	12.59	0.12
2.40	23.52	38.77	0.38	16.10	0.16

Tabla 2: Cargas críticas para diferentes niveles de fluido interior y espesores de cáscara.

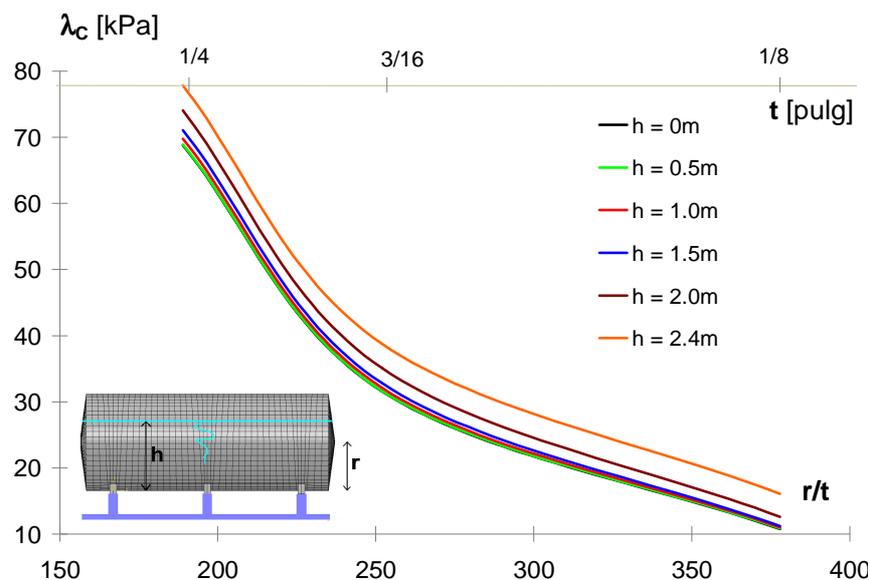


Figura 6: Variación de cargas críticas con la relación radio-espesor, para diferentes niveles de fluido.

4.2 Análisis de No Lineal Geométrico

Se realiza un análisis no lineal geométrico (GNLA) considerando imperfecciones geométricas según las formas de modo mediante el método de Riks. En una primera instancia se analiza la posibilidad que el vacío actúe sobre la estructura sin contenido de fluido y sin considerar imperfecciones geométricas. Además se incluyen imperfecciones con la forma de los modos hallados en el análisis de autovalores y autovectores, con amplitudes variables respecto al espesor de la cáscara $\xi = 0.2t$, $1.0t$ y $2.0t$. Como formas de modo se utilizaron las correspondientes al primer modo y al modo 17. La Figura 7 presenta el seguimiento de la trayectoria de un punto ubicado en la unión entre el cono y el cilindro sobre el plano vertical de simetría a lo largo de un meridiano, identificado como Nodo A en la Figura 8(a). En la Figura 8 se muestran las deformadas correspondientes a imperfecciones según las formas del primer modo (M1) y del modo 17 (M17) para diferentes amplitud de imperfección.

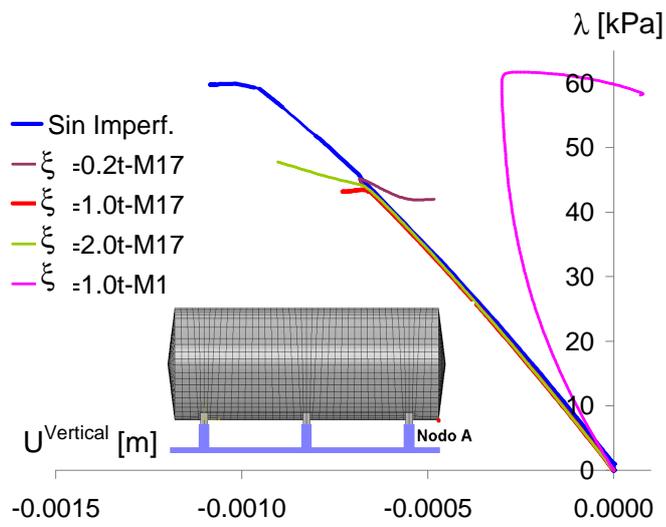


Figura 7: Trayectorias de equilibrio para vacío interior sin y con imperfecciones geométricas según formas de modo 1 (M1) y modo 17 (M17) con diferentes amplitudes (ξ).

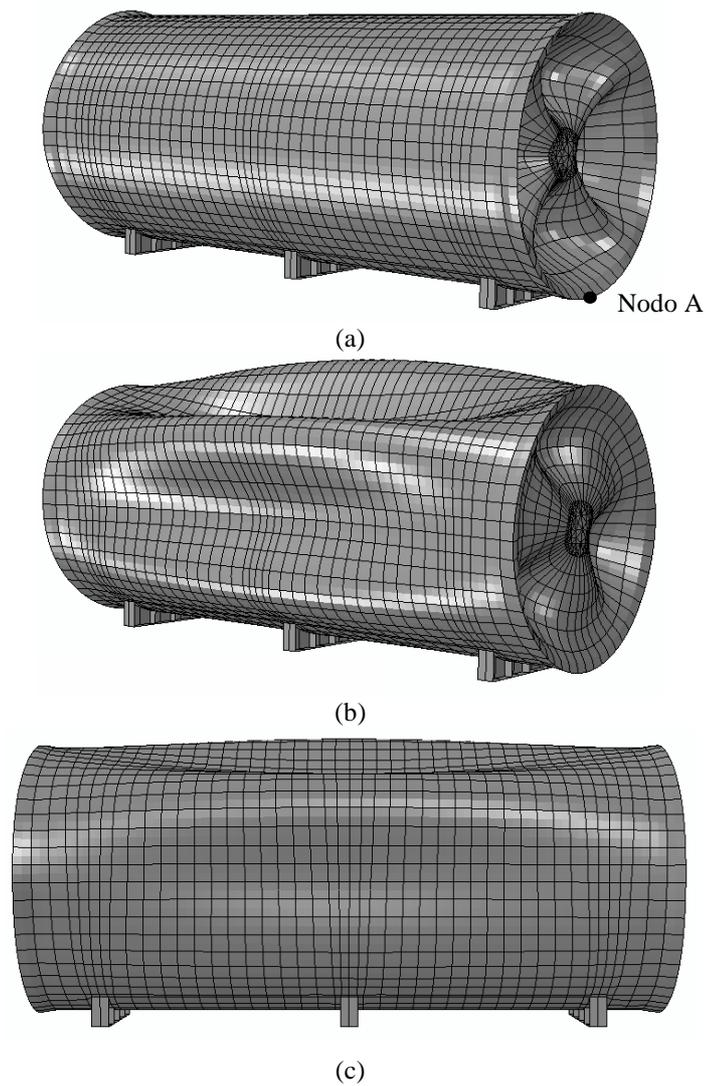


Figura 8: Deformadas globales con imperfecciones según, (a) Modo 1 ($\xi = 1.0t$), (b) Modo 17 ($\xi = 0.2t$), (c) Modo 17 ($\xi = 1.0t$).

Se puede observar que, dado que el primer modo impone deformaciones solamente en los extremos, la reducción de las cargas obtenida en ese caso es menor que para imperfecciones que afectan principalmente al cilindro al considerar el modo 17. Para una amplitud de imperfección $\xi = 1.0t$ la carga máxima hallada es $\lambda^{\max} = 43.5\text{kPa}$ con un factor de reducción respecto a la carga crítica $\eta = 0.63$. Ese valor se considera la carga máxima resistida por la estructura ya que imperfecciones de mayor amplitud ($\xi = 2.0t$) presentan una curva monótona creciente con un cambio en la respuesta de la estructura.

Al usar como imperfección geométrica la forma del primer modo, se obtienen deformaciones importantes en los extremos mientras que en el otro caso aparecen deformaciones también en el cilindro. Estas deformadas se aproximan a las mostradas en la Figura 9 que corresponden a colapsos por vacío para tanques del tipo, pero no tanto a lo observado en la Figura 3 para el tanque analizado. Las imágenes de los tanques colapsados correspondientes a la Figura 9 son obtenidas de videos de un tanque al cual se le provoca el colapso por vacío en forma intencional, la imagen mostrada en la Figura 9(a), y en la Figura 9(b) se presenta un tanque cuyo daño fue accidental por un vaciado sin las válvulas de venteo abiertas. En el primero de estos casos el tanque presenta desplazamientos hacia el interior en el cilindro, como se puede ver en la Figura 8(a) y (b), y en el otro se pueden ver las ondas que se forman en el cilindro en (c).



(a)



(b)

Figura 9: Tanques colapsados por aplicación de vacío.

Estos tanques funcionan con diferentes niveles de fluido generando una deformada del tipo a la mostrada en la Figura 10. Bajo la hipótesis que el vacío se produce en el tanque por una maniobra de vaciado sin funcionar adecuadamente la válvula de venteo, es necesario analizar

la posibilidad que el tanque sea sometido a vacío no controlado con una deformada correspondiente a peso propio y la presión hidrostática del fluido, produciéndose posteriormente el daño en el tanque.

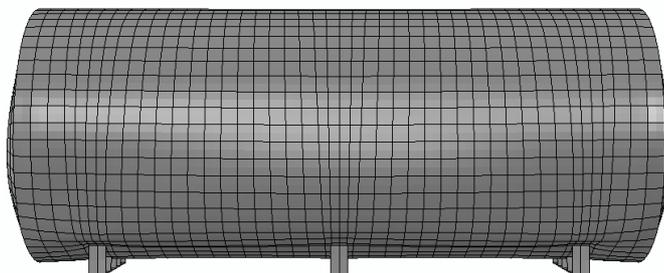


Figura 10: Deformada global para carga hidrostática máxima ($h=2.4\text{m}$).

Este análisis se puede implementar en ABAQUS mediante la definición de dos pasos: en el primero de ellos se define la acción del peso propio y un nivel del fluido determinado que ejerce presión hidrostática sobre la cáscara y un segundo paso en el que se define vacío incremental obteniendo la trayectoria de equilibrio a través del método de Riks. La carga incremental de vacío se aplica sobre la estructura previamente deformada por la acción gravitatoria y la presión del fluido, de esta manera el proceso de vaciado se inicia con una imperfección geométrica diferente a la impuesta anteriormente asociada a las formas de modo.

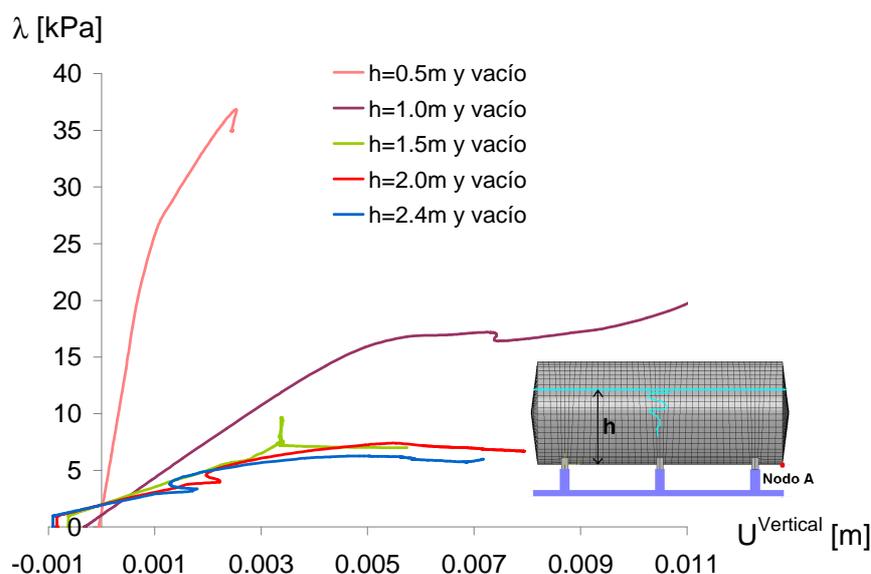


Figura 11: Trayectorias de equilibrio un estado inicial de cargas de peso propio y fluido con diferentes alturas más vacío interior variable.

Nivel fluido	U^{vertical} Nodo A	U_A^{vert}/t	Carga máxima
	[mm]		[kPa]
$h = 0.5 \text{ m}$	-0.052	-0.01	36.84
$h = 1.0 \text{ m}$	-0.318	-0.05	17.18
$h = 1.5 \text{ m}$	-0.623	-0.10	7.52
$h = 2.0 \text{ m}$	-0.840	-0.13	7.40
$h = 2.4 \text{ m}$	-0.911	-0.14	6.25

Tabla 3: Cargas máximas para diferentes niveles de fluido.

La Figura 11 muestra las trayectorias de equilibrio obtenidas por la aplicación de vacío en función del desplazamiento vertical del Nodo A. En la Tabla 3 se puede observar que a medida que aumenta el nivel de fluido las cargas máximas se reducen notablemente con respecto a las correspondientes a imperfecciones según la forma de modo. La amplitud de la forma de modo se puede asemejar al desplazamiento del Nodo A, que expresado en función del espesor representa amplitudes mucho menores que las implementadas para las formas de modo. Es decir que esta deformación inicial impuesta por la deformada de peso propio más fluido genera reducciones menores en las cargas resistidas que la forma de modo, a pesar que la amplitud de la imperfección es menor.

Al observar las deformadas correspondientes a estados poscríticos avanzados no se corresponden con la observada en el tanque estudiado, como se muestra en la Figura 12. Esta figura muestra que se deforman excesivamente los extremos y que en esa zona se desarrollan desplazamientos hacia arriba que son contrarios a lo observado en el tanque colapsado, a pesar que en el estado inicial de cargas la deformada por peso propio y fluido los extremos presentan desplazamientos hacia abajo como en un voladizo. Este comportamiento también se observa en las trayectorias de equilibrio de la Figura 11 que presentan desplazamientos iniciales negativos y posteriormente son positivos desplazándose hacia arriba.

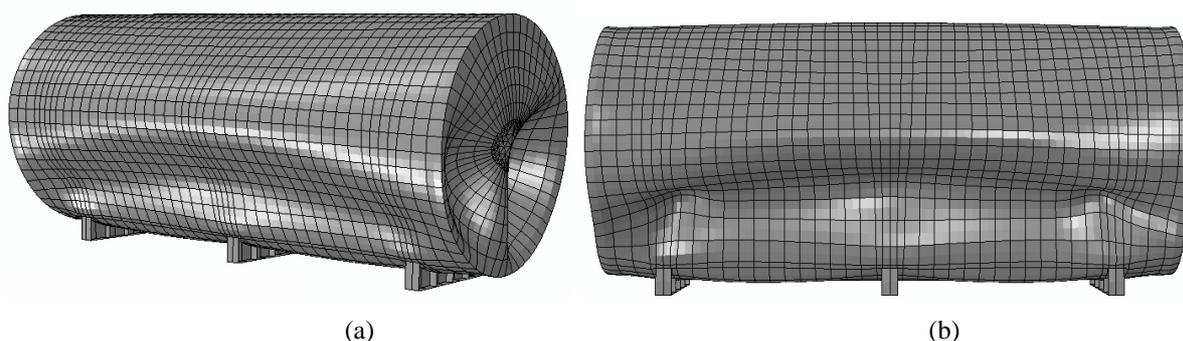


Figura 12: Deformada global bajo la acción de peso propio y fluido con diferentes alturas más vacío interior variable, (a) Perspectiva, (b) Vista frontal.

Una modelación más aproximada a la realidad sería simular posteriormente a la acción de una carga hidrostática, el proceso de vaciado simultáneamente con la acción de vacío producido por una bomba. Esta extracción de fluido se prolonga hasta que no haya fluido en el interior y a continuación actúa vacío solamente. Esto se implementa en ABAQUS a través de tres pasos: el primero de ellos corresponde a la acción de peso propio y fluido, en el segundo se incorpora simultáneamente vacío y una carga contraria a la hidrostática limitando el paso con un parámetro de carga $\lambda=1$ para que se anule la acción del fluido al final del paso; y un tercer paso con la acción de vacío solamente. La Figura 13(a) muestra la etapa inicial del proceso de descarga de fluido desde un nivel de fluido $h = 2.4\text{m}$ (Step1-2) y la continuidad de la acción de vacío (Step 3). En la misma figura se muestra la simulación planteada anteriormente en la que la carga hidrostática se mantiene fija en su nivel 2.4m y se aplica vacío hasta llevar al colapso. Se puede observar el cambio en la respuesta entre considerar que la carga hidrostática continúa actuando o simular el proceso de descarga.

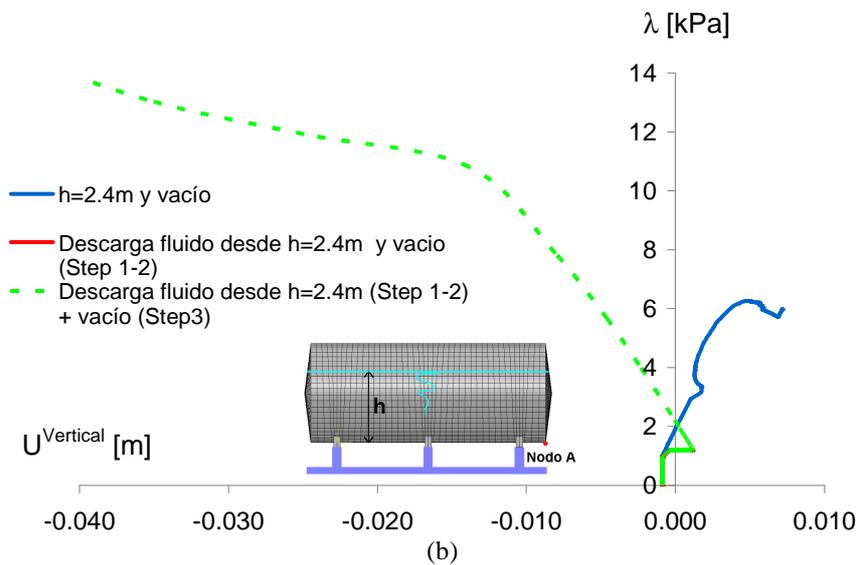
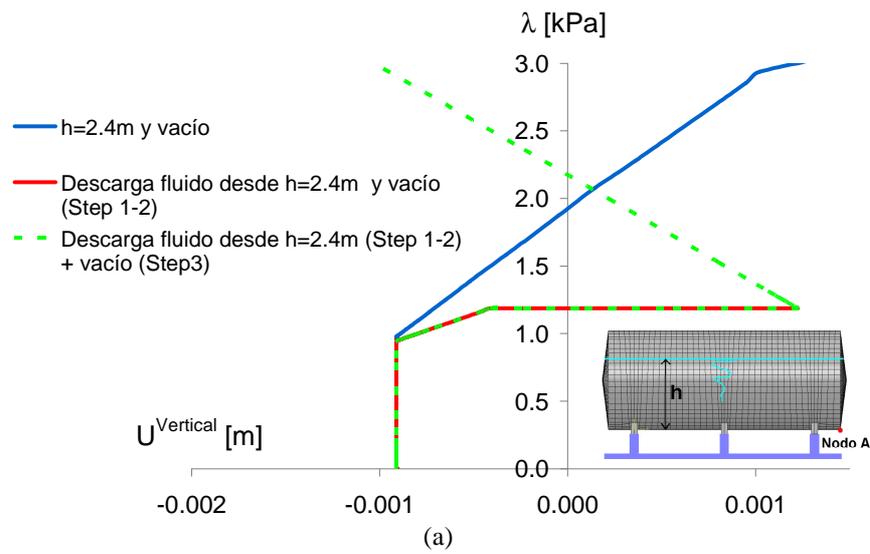


Figura 13: Trayectorias de equilibrio para un estado inicial de cargas de peso propio y fluido ($h = 2.4\text{m}$), descarga de fluido y vacío interior variable (a) Etapa inicial, (b) Estados poscríticos avanzados.

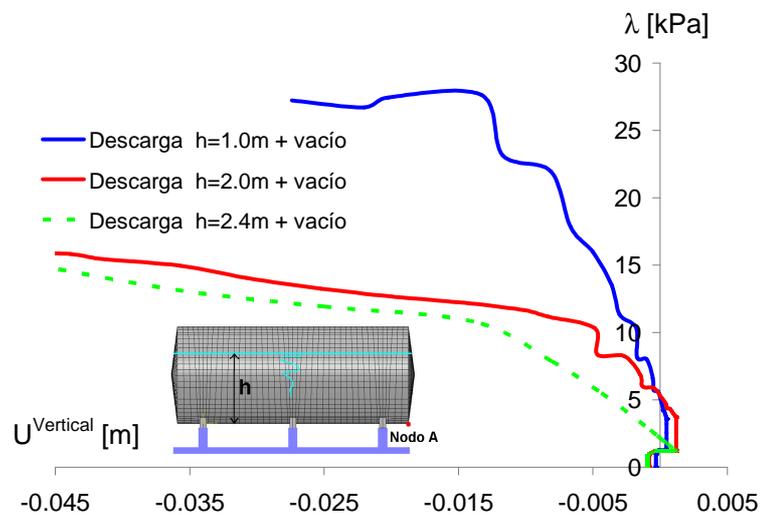


Figura 14: Trayectorias de equilibrio considerando descarga de fluido a diferentes niveles y vacío interior variable.

La Figura 13(b) muestra el desarrollo extendido de la aplicación de vacío obteniéndose una trayectoria monótona creciente sin alcanzarse un valor máximo de carga, con desplazamientos de mayor magnitud que en las simulaciones anteriores y hacia abajo de los extremos del tanque, que son compatibles con lo observado en la Figura 3. En la Figura 14 se muestran en forma conjunta las simulaciones correspondientes a niveles de fluido inicial $h = 1.0\text{m}$, 2.0m y 2.4m . Se puede observar que para un nivel de fluido inicial de 2.0m el comportamiento es similar al anterior y que para $h = 1.0\text{m}$ la curva de respuesta presenta un máximo $\lambda^{\text{max}} = 27.65\text{kPa}$ con un comportamiento posterior inestable.

La Figura 15 muestra las deformadas globales del tanque para una altura inicial de fluido $h = 2.0\text{m}$ con un desplazamiento vertical en Nodo A de 50mm para $\lambda = 16.45\text{kPa}$. Para un nivel de fluido inicial $h = 1.0\text{m}$ el desplazamiento vertical en Nodo A de 13mm para $\lambda^{\text{max}} = 27.65\text{kPa}$ y $U_A^{\text{vert}} = 53\text{mm}$ para $\lambda = 34.74\text{kPa}$, en estados poscríticos avanzados. Las deformadas obtenidas en todas estas simulaciones son similares a la mostrada en la Figura 3 y muy parecidas a la del tanque colapsado. El tanque colapsado tiene una deformada no simétrica respecto a un plano vertical central pero eso puede ser producida por alguna imperfección no simétrica adicional y correspondiente a un estado de tensión-deformación avanzado. Observando la Figura 9, las deformadas tampoco son exactamente simétricas a pesar que la sollicitación que las produjera sea vacío.

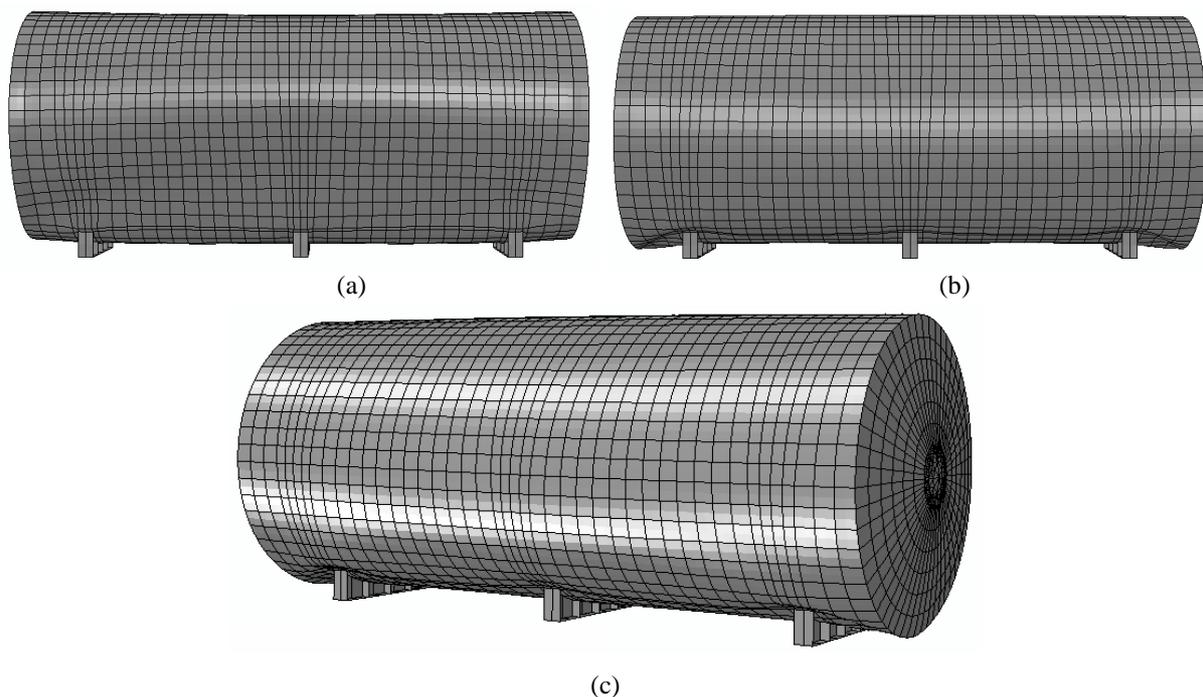


Figura 15: Deformada global considerando descarga de fluido con nivel $h = 2.0\text{m}$ y vacío interior variable,
 (a) Final de etapa de descarga, (b) Vista frontal para $\lambda = 16.45\text{kPa}$,
 (c) Perspectiva para $\lambda = 16.45\text{kPa}$.

Para estudiar el comportamiento de las tensiones en el tanque se usa el criterio de fluencia de von Mises considerando una tensión de fluencia de $2.156 \times 10^8\text{Pa}$. Para el caso de un nivel inicial de fluido de 2.0m , la Figura 16 muestra la distribución de tensiones de von Mises y se observa que para cargas menores a $\lambda = 2.58\text{kPa}$ toda la estructura trabaja en régimen elástico con tensiones menores a las de fluencia. Para cargas incrementales a partir de ese valor se produce plastificación en las zonas próximas a los apoyos donde se observan los mayores

desplazamientos, manteniéndose el resto del tanque por debajo de la tensión de fluencia.

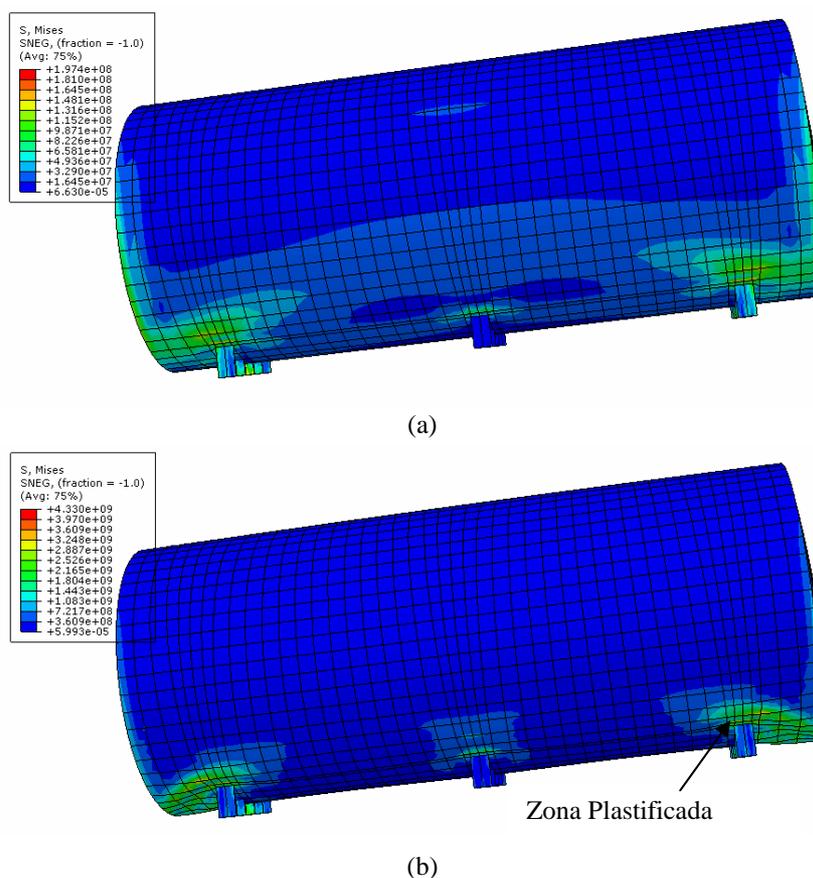


Figura 16: Distribución de tensiones de Von Mises (a) Sin zonas plastificadas para $\lambda = 2.58 \text{ kPa}$, (b) Plastificación en zonas de apoyos para $\lambda = 11.65 \text{ kPa}$.

Con esta simulación que pretende representar el proceso de descarga del fluido y posterior continuación de aplicación de vacío, se logra representar mejor las deformadas observadas en la estructura colapsada.

4.3 Evaluación de la influencia de los espesores de la cáscara

En la modelación anterior se considera un espesor de cáscara de $\frac{1}{4}$ " ya que ese valor es el espesor mínimo indicado por las normas aplicables, pero no se tiene un conocimiento preciso de que sea el espesor con el que está construido el tanque. Por este motivo se analiza la respuesta del tanque estudiado con chapas de menores espesores comerciales, se consideran espesores de $\frac{3}{16}$ " y $\frac{1}{8}$ ". La Tabla 2 y la Figura 6 muestran los resultados obtenidos al realizar un análisis de autovalores y autovectores (LBA) para los espesores propuestos bajo la acción de vacío solamente o vacío actuando simultáneamente con una carga hidrostática con diferentes niveles de fluido. La evaluación mediante análisis no lineal geométrico (GNLA) bajo vacío es mostrado en la Figura 17(a) alcanzándose cargas máximas que disminuyen al reducirse los espesores. Las deformadas obtenidas son semejantes a las halladas para un espesor de $\frac{1}{4}$ ", con desplazamientos mayores pero que no reflejan la forma de la estructura con daño. Lo mismo ocurre al realizar un análisis considerando un nivel determinado de fluido más la acción variable de vacío. Al considerar la reducción de la acción de la presión hidrostática actuando en conjunto con vacío y a continuación la succión generada por el vacío

solamente, se obtienen deformadas compatibles y cargas máximas que disminuyen con la reducción del espesor. La Figura 17(b) muestra la respuesta hallada para un nivel de fluido inicial de 1.0m y la descarga por acción de una bomba. Las curvas muestran una trayectoria creciente con desplazamientos de los extremos del tanque hacia abajo hasta llegar a una carga máxima y posteriormente se transforma en inestable con desplazamientos que continúan aumentando. Cuanto más reducido es el espesor se acentúa ese comportamiento siendo menores las cargas resistidas. Además, se puede observar que la presencia de agua en el interior del tanque previo a la acción del vacío reduce notablemente la carga de vacío máximo resistido. Para un espesor de chapa de 1/4" y un nivel de agua de 1.0m, el factor de reducción de la carga de vacío es de $\eta = 0.46$ con respecto a la condición de tanque sin fluido.

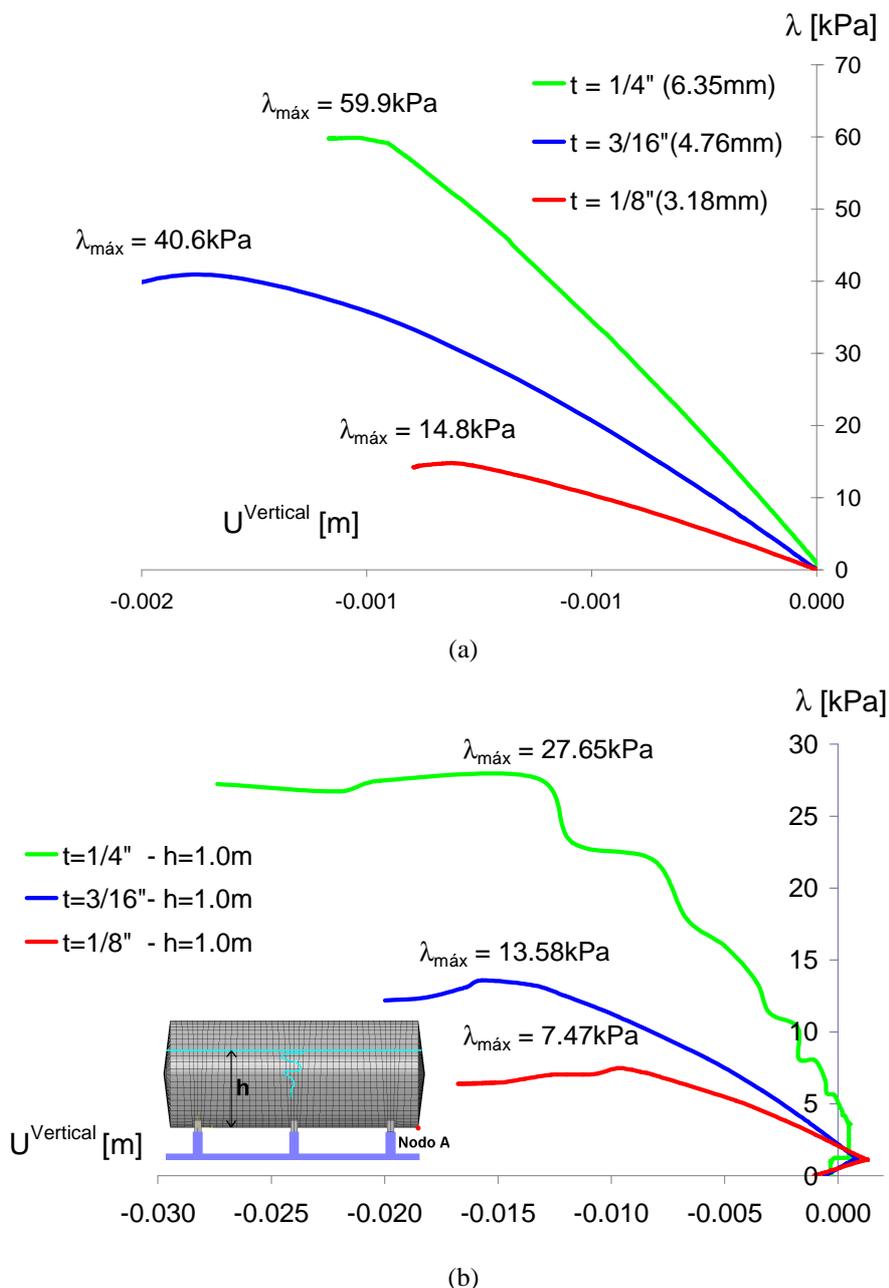


Figura 17: Trayectorias de equilibrio para diferentes espesores de cáscara, (a) Vacío, (b) Descarga de fluido desde $h = 1.0\text{m}$ más vacío.

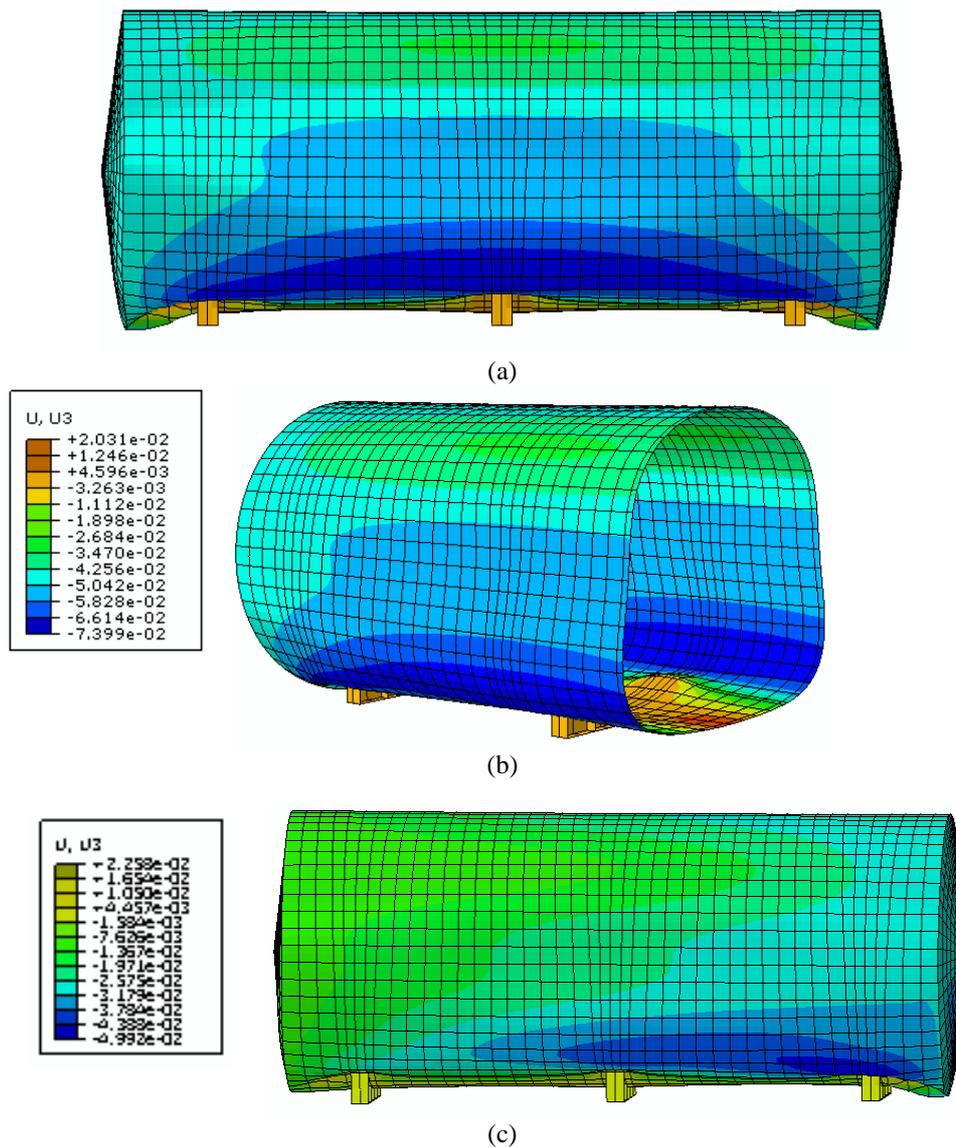


Figura 18: Desplazamientos verticales para descarga de fluido con nivel $h=1.0\text{m}$ y vacío interior variable, (a) Vista frontal para $t = 3/16''$ ($\lambda^{\max} = 13.58\text{kPa}$), (b) Perspectiva para $t = 3/16''$ ($\lambda^{\max} = 13.58\text{kPa}$), (c) Vista frontal para $t = 1/8''$ ($\lambda^{\max} = 7.47\text{kPa}$).

La Figura 18 muestra las deformadas correspondientes a la carga máxima obtenida para los espesores de $3/16''$ y $1/8''$, que resultan similares a los mostrados en la Figura 15 para un espesor de $1/4''$. Se representan los desplazamientos verticales (U3) por zonas sobre la superficie del tanque indicando la escala correspondiente. La Figura 18(a) y (b) corresponde al espesor de $3/16''$ y se observa una deformada simétrica con desplazamientos globales similares a los de la estructura colapsada, mientras que en la Figura 18(c) se puede ver una leve inclinación global hacia uno de los apoyos con una forma global mas parecida a la del tanque dañado. Esto muestra que la reducción de los espesores tiene una influencia importante sobre la deformada.

5 DESCENSO DE APOYOS

Debido a la asimetría de la deformada es posible que la causa del daño haya sido un descenso de apoyo generado por pérdida de la capacidad resistente del suelo. Se considera la

posibilidad que el asentamiento se produzca sin fluido en el interior y también con la máxima altura de fluido posible, para asentamientos de 5mm y 10mm. La Tabla 4 muestra los desplazamientos verticales obtenidos en el Nudo A para ambos valores de descenso. La Figura 18(a) muestra la deformada global obtenida para un descenso de 10mm y en Figura 18(b) se puede ver la distribución los desplazamientos verticales de todo el tanque. Allí se observa que el extremo derecho del tanque desciende conjuntamente con el apoyo pero que los desplazamientos relativos entre esos puntos y el apoyo no son importantes, como también se expresa en la Tabla 4.

Descenso de apoyo [mm]	$U^{vertical}$ Nudo A		$U^{relativo}$ Nudo A	
	Sin fluido	h = 2.4m	Sin fluido	h = 2.4m
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
5	-5.9	-6.9	0.1	1.1
10	-11.9	-12.7	1.9	2.7

Tabla 4: Desplazamiento del Nudo A para diferentes magnitudes de desplazamiento de apoyo.

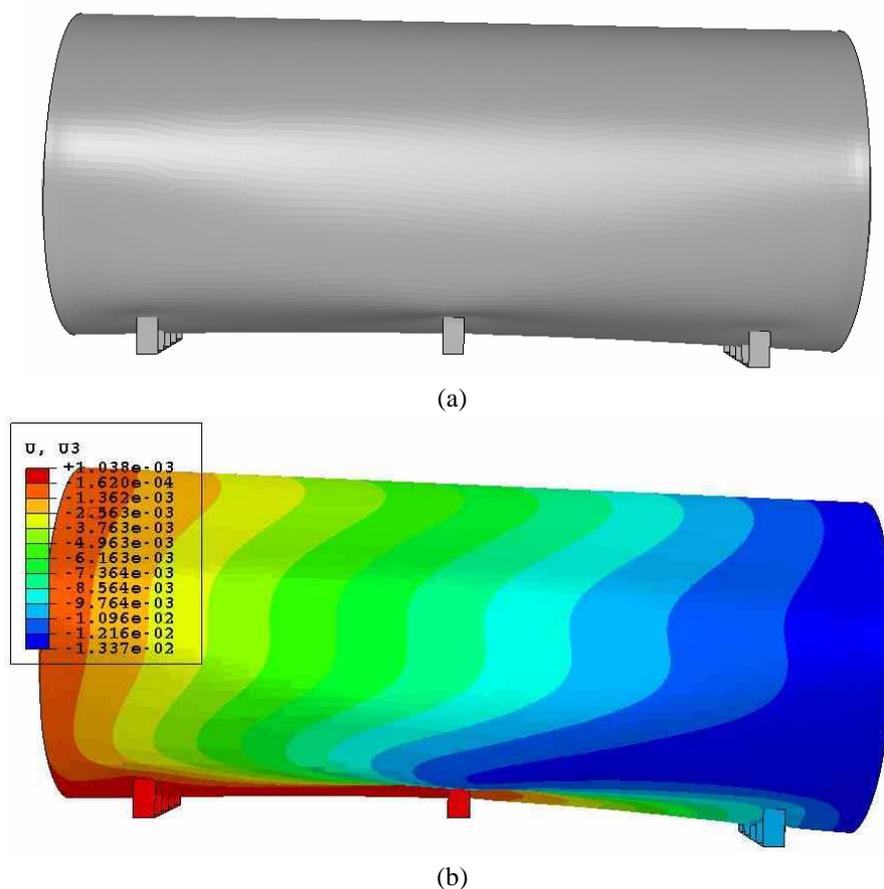


Figura 19: Descenso de apoyo de 10mm, (a) Deformada global, (b) Distribución de desplazamientos verticales.

La Figura 20 muestra la distribución de tensiones de von Mises en el tanque donde se puede observar que las mayores sollicitaciones se presentan en la cercanía del apoyo central que no desciende. Es decir, que este tipo de sollicitación no sería tan representativa de la falla observada ya que si bien todo el extremo desciende junto con el apoyo estos valores no son

muy importantes y las mayores solicitaciones y deformaciones se presentan en la zona del apoyo inmediato siguiente sin desplazamiento de apoyo.

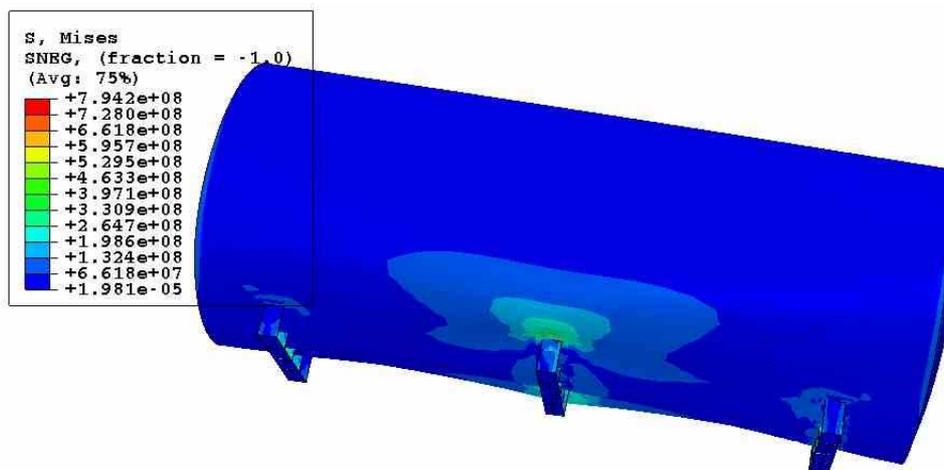


Figura 20: Distribución de tensiones de von Mises para un descenso de apoyo de 10mm.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia la respuesta de tanques horizontales destinados al almacenamiento de fluidos usados principalmente en la industria petroquímica. El análisis pretende identificar posibles mecanismos de colapso frente a solicitaciones generadas por la combinación de la acción de la presión hidrostática con presiones negativas provenientes de una maniobra inadecuada en el proceso de descarga del fluido o bien por un asentamiento diferencial de sus apoyos. En particular se estudia un tanque con evidencia de daño, analizando modelos computacionales que representan el problema planteado.

En la simulación se realiza análisis de bifurcación lineal (LBA) y además análisis no lineal geométrico (GNLA) con el objetivo de representar el colapso que se observa en el tanque estudiado. Los resultados conducen a las siguientes conclusiones:

- La acción de vacío induce a la estructura a un modo de falla global con deformaciones en el cuerpo del tanque hacia el interior del mismo.
- La presencia de fluido en el interior del tanque ejerce un efecto estabilizante frente a la acción de vacío que se refleja en cargas de pandeo mayores con respecto a la acción de vacío solamente.
- Las deformadas obtenidas considerando simultáneamente la carga hidrostática del fluido y las presiones hacia el interior por vacío no son compatibles con lo observado en el tanque colapsado.
- El descenso diferencial de los apoyos conduce a deformadas que generan deformaciones localizadas en la zona del apoyo que no presenta desplazamiento.
- Una representación adecuada de la forma de colapso se obtiene considerando el proceso de descarga del fluido y la continuidad de la acción de vacío.

Estos resultados muestran la necesidad de una modelación más detallada del proceso de descarga y la posible validación mediante ensayos.

7 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo para esta investigación de SECYT-UNCo. LAG agradece el apoyo de SECYT-UNC y de CONICET.

REFERENCIAS

- ABAQUS, *User's Manuals, Version 6.3*, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. Rhode Island, 2006.
- API Standard 12D, *Specification for field welded tanks for storage of production liquids*, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 1994.
- API Standard 12F, *Specification for shop welded tanks for storage of production liquids*, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 1994.
- API Standard 650, *Welded steel tanks for oil storage*, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2010.
- British Standard BS-2594, *Specification for carbon steel welded horizontal cylindrical storage tanks*. British Standard Institution, 1975.
- Chan, G.C.M., Tooth, A.S. and Spence, J., A study of the buckling behaviour of horizontal saddle supported tanks. *Thin-Walled Structures*, 30(1-4):3-22, 1998.
- Fernández, S., Jaca, R.C. y Godoy, L.A., Descenso de apoyos en el revestimiento lateral de naves industriales. *Mecánica Computacional*, 30: 857-874, 2011.
- Godoy, L.A. and Sosa, E.M., Localized support settlements of thin-walled storage tanks. *Thin-Walled Structures*, 41:941-955, 2003.
- Hornung, U., and Saal, H., Buckling loads of tank shells with imperfections. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 37: 605-621, 2002.
- Jaca, R.C. y Godoy, L. A., Validación de la metodología de rigidez reducida para inestabilidad de tanques. *Mecánica Computacional*, 27:1111-1130, 2008.
- Jasion, P. and Magnucki, M., Elastic buckling of barrelled shell under external pressure. *Thin-Walled Structures*, 45:393-399, 2007.
- Jasion, P., Stability analysis of a liquid filled barrelled horizontal tank. *Proc. Appl. Math. Mech.*, 8:10291-10292, 2008.
- Magnucki, M. and Stasiewicz, Critical sizes of ground and underground horizontal cylindrical tanks. *Thin-Walled Structures*, 41:317-327, 2003.
- Paor, C., Kelliber, D., Cronin, K., Wright, W.M.D. and McSweeney, S.G., Prediction of vacuum-induced buckling pressures of thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*, 55:1-10, 2012.
- Riks, E., An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, *International Journal of Solids and Structures*, 15: 529-551, 1979.
- Riks, E., The application of Newton's method to the problem of elastic stability, *Journal of Applied Mechanics*, 39: 1060-1065, 1972.
- Standard UL-142, *Steel aboveground tanks for flammable and combustible liquids*. Underwriters Laboratories Inc (UL), Northbrook, Illinois, 1998.