

## SIMPLIFICACIONES EN EL TRATAMIENTO COMPUTACIONAL DE CONDICIONES EN LA PARTE SUPERIOR DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS

Jean C. Batista-Abreu<sup>a</sup>, Carlos A. Burgos<sup>b</sup>, Horacio D. Calabró<sup>c</sup>, Rossana C. Jaca<sup>d</sup> y  
Luis A. Godoy<sup>e</sup>

<sup>a</sup>*Doctoral candidate, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, USA*

<sup>b</sup>*Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400,  
8300 Neuquén, Argentina, [carlosburgoss@hotmail.com](mailto:carlosburgoss@hotmail.com)*

<sup>c</sup>*Grupo de Métodos Numéricos y Experimental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del  
Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, [daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar](mailto:daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar)*

<sup>d</sup>*Grupo de Métodos Numéricos y Experimental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del  
Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, [rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar](mailto:rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar)*

<sup>e</sup>*CONICET y FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina,  
[lgodoy@com.uncor.edu](mailto:lgodoy@com.uncor.edu)*

**Palabras Clave:** Elementos Finitos, Cáscaras, Análisis Simplificado, Tanques, Carga térmica, Viento.

**Resumen.** Los tanques de almacenamiento de petróleo u otros líquidos combustibles son estructuras cilíndricas bajas, con o sin techo, cuya estabilidad debe asegurarse frente a acciones externas como presión uniforme, viento y otras que se consideren relevantes. En la práctica el análisis se sobresimplifica, en el sentido que algunos detalles de la estructura se omiten y se sustituyen por otros que no representan la realidad que se construye. Tal es el caso de techos cónicos que no son auto-soportados: tales techos consisten en una compleja estructura formada por anillos y vigas que se sostienen en columnas, dado que los techos resultan demasiado flexibles y sin este soporte adicional no podrían mantener su geometría. Sin embargo, en el análisis de estabilidad generalmente se considera un techo “equivalente” que es auto-soportado pero con un espesor mayor al que tiene en la realidad. La equivalencia no se justifica en consideraciones rigurosas sino que se estima tomando el doble o el triple del espesor más delgado de la lámina cilíndrica, estimándose que no habrá cambios significativos en los modos y cargas críticas. Otra simplificación frecuente se hace cuando el tanque está abierto en la parte superior y tiene un anillo rigidizador, que se sustituye en el análisis por una condición de borde que restringe los desplazamientos radiales. En este trabajo se estudian las condiciones de equivalencia a través de comparar las rigideces de la configuración original y la sustituta, con el fin de identificar las características de la simplificación que se hace. A continuación se considera el análisis de estabilidad por bifurcación (LBA) bajo tres condiciones: temperatura, viento y presión uniforme. Se desarrolla una metodología racional de trabajo empleando el programa para propósitos específicos ABAQUS, con el cual se identifican las propiedades equivalentes y se analiza el pandeo para validar la aproximación.

## 1 INTRODUCCION

Aunque los tanques de almacenamiento de fluidos tienen formas relativamente simples, algunas de sus características en la práctica les confieren configuraciones un tanto complejas. Los tanques cerrados en su parte superior pueden tener un techo fijo con forma de domo, techo plano o techo cónico; en los dos últimos casos generalmente no son techos auto-soportados, por lo que se les agrega una estructura formada por anillos y vigas (denominadas *rafters* en inglés, ver Figura 1) que se apoyan en columnas. Debido a que existen anillos, los *rafters* apoyan en ellos y su número depende del nivel de apoyo que se precise dar a la estructura. El caso de la Figura 1 el sistema que soporta el techo tiene tres anillos en sentido circunferencial, existiendo 16 *rafters* que atraviesan los tres anillos; otros 16 *rafters* que atraviesan el segundo y tercer nivel a partir del centro; y 32 *rafters* que solamente abarcan el tercer nivel de anillo. La Figura 1.c muestra la sección transversal de un *rafter*, tomada de un caso real de tanque en una planta localizada en Puerto Rico.

Pero esto agrega complejidad al modelo estructural y con frecuencia se emplean suposiciones que simplifican el modelo de la estructura, eliminando el sistema de *rafters*, vigas y columnas. Tales simplificaciones son suponer un techo auto-soportado pero con espesor equivalente a lo que sería un techo soportado estructuralmente, o con modificaciones en las condiciones de borde (Landucci et al., 2009, Liu, 2011, Zhao et al., 2013). Por ejemplo, Jørgensen (1983) modeló un tanque con techo domo auto-soportado bajo presión uniforme, pero en lugar de representar el domo puso condiciones de borde en el extremo del cilindro.

Los tanques abiertos en su parte superior en general tienen un anillo rigidizador (denominado *wind girder* en inglés) que da estabilidad a la parte superior de la cáscara; de otra forma la cáscara es demasiado flexible y pandea bajo cargas pequeñas. El efecto estabilizador del anillo superior ha sido considerado por Schmidt et al. (1998), Zhao y Lin (2014). Otros autores (Chen y Rotter, 2012) ignoran el efecto del anillo superior. Las simplificaciones en este caso consisten en eliminar el anillo rigidizador y sustituirlo por una condición de borde que impide los desplazamientos radiales. Estas simplificaciones han sido empleadas en los trabajos de Aghajari et al. (2006).

Sin embargo, hasta el presente no existe una evaluación del nivel de error que se produce al introducir estas aproximaciones. En este trabajo se tratan ambos problemas, techo fijo soportado y tanque abierto, por separado, para estados de carga que son carga térmica (debida a fuego), presión uniforme y presión debida a viento.

## 2 TANQUES CON TECHO CÓNICO

### 2.1 Equivalencia entre modelos con estructura rigidizadora versus auto-soportados

Para mostrar las características de las simplificaciones hechas al adoptar un espesor uniforme en reemplazo de los detalles de modelar el sistema de soporte del techo, se estudia un tanque en particular que se detalla a continuación. La Figura 1 muestra la geometría del tanque formado por una envolvente cilíndrica de diámetro  $D=30.38\text{m}$  y altura  $H=12.19\text{m}$  con un techo cónico que presenta una altura de  $2.86\text{m}$  con respecto a la parte superior del cilindro. En la Figura 1(a) se presentan los detalles de cada virola y del techo mientras que la Figura 1(b) muestra la estructura rigidizadora de vigas que sirven de soporte al techo cónico. El diseño de espesores del cilindro y vigas del techo está basado en el código API 650(2010). Esta estructura de soporte está formada por dos anillos igualmente espaciados entre el vértice del cono y el cilindro, además está compuesta por 16 vigas radiales largas entre la parte superior del cono y el cilindro, 16 vigas radiales intermedias entre el anillo superior y el

cilindro y 32 vigas radiales cortas entre el anillo inferior y la parte superior de la envoltente cilíndrica (Godoy y Batista Abreu, 2012). La sección transversal del anillo y las vigas rigidizadoras se muestra en la Figura 1(c). El material considerado es acero ASTM A36 con una densidad  $\gamma = 7,850\text{Kg/m}^3$ , no se considera fluido en el interior.

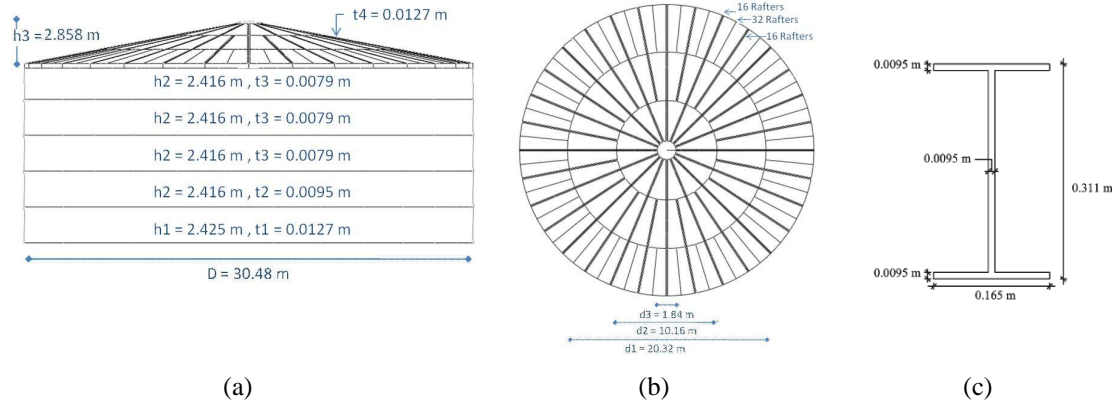


Figura 1: Geometría del tanque con estructura de soporte, (a) Vista frontal, (b) Vista en planta, (c) Vigas adoptadas para estructura de soporte.

La estructura se discretizó con elementos triangulares lineales S3R en el techo y parte superior del cilindro, y elementos cuadrangulares lineales S4R en el resto de la envoltente cilíndrica. Las condiciones de borde son establecidas por apoyos fijos en el borde inferior. Para la estructura completa, el momento de inercia del techo se calcula mediante ABAQUS (2006) resultando los siguientes valores  $I_{xx}=5,846,414\text{m}^4$ ,  $I_{yy}=11,869,274\text{m}^4$ ,  $I_{zz}=5,846,414\text{m}^4$ .

Con el objeto de modelar una estructura equivalente para el techo sin las vigas rigidizadoras pero manteniendo la rigidez estructural, con momentos de inercia similares, se proponen modelos con un espesor de techo incrementado pero manteniendo el peso del techo. Por esta razón a medida que aumenta el espesor se considera un material con una densidad modificada de manera de mantener el peso total del techo cónico más las vigas rigidizadoras. En la Tabla 1 se muestran el espesor del techo equivalente, momento de inercia correspondiente, el volumen y la densidad equivalente para los siete modelos estudiados, calculados en función del espesor de la virola del fondo del tanque.

Modelo	Espesor (m)	$I_{xx}(\text{m}^4)$	$I_{yy}(\text{m}^4)$	$I_{zz}(\text{m}^4)$	Volumen ( $\text{m}^3$ )	Densidad Equivalente ( $\text{Kg/m}^3$ )	
M 1	1.4 t	0.0178	5.84E+06	1.19E+07	5.84E+06	13.17	7671
M 2	2 t	0.0254	8.34E+06	1.69E+07	8.34E+06	18.86	5357
M 3	4 t	0.0508	1.67E+07	3.39E+07	1.67E+07	37.31	2708
M 4	8 t	0.1016	3.34E+07	6.77E+07	3.34E+07	74.82	1350
M 5	16 t	0.2032	6.67E+07	1.35E+08	6.67E+07	149.63	675
M 6	32 t	0.4064	1.33E+08	2.71E+08	1.33E+08	299.26	338
M 7	80 t	1.0160	3.34E+08	6.77E+08	3.34E+08	748.15	135

Tabla 1: Momentos de inercia y densidad equivalente para los modelos estudiados, M1 a M7.

Mediante un análisis de regresión se calculan los valores de momento de inercia en las coordenadas cartesianas en función del espesor de la cáscara, resultando

$$I_{xx} = I_{zz} = 328,450,223t, \quad I_{yy} = 666,183,160t, \quad (1)$$

donde t es el espesor en [m]. La densidad del material del techo se ajusta para tener el mismo peso del techo mientras se aumenta su espesor, la función aproximada de la densidad en función del espesor es

$$\rho_{equiv} = \frac{136.12}{t} \quad (2)$$

La equivalencia en cuanto a momentos de inercia se logra para un espesor de 1.4t resultando  $t_{equiv}=17.8mm$ .

## 2.2 Pandeo bajo cargas térmicas

Un análisis de bifurcación lineal (LBA) se realiza para el tanque en estudio bajo la acción de cargas térmicas, considerando el techo completo con la estructura de vigas rigidizadoras como se muestra en la Figura 1. En base a la propuesta de Liu (2011), la carga térmica se supone en este trabajo con una variación del tipo  $\cos^2\theta$  en coordenadas cilíndricas en sentido de la circunferencia, adoptando un ángulo  $\theta$ . El modelo tiene una variación térmica en sentido circunferencial pero se supone que la temperatura se mantiene constante verticalmente, aplicada en el cilindro y en el techo. La expresión analítica de la temperatura está dada por:

$$T(\theta) = \begin{cases} \cos^2\theta, & \text{si } -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \text{si } \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (3)$$

La temperatura crítica de pandeo se considera como la temperatura a la cual la estructura pandea según un análisis de autovalores y autovectores, planteado en la siguiente expresión

$$\left( K_0 + \lambda^C \cdot K_G \right) \cdot \Phi^C = 0 \quad (4)$$

donde  $K_0$  es la matriz de rigidez lineal del sistema,  $K_G$  la matriz de carga-geometría, que incluye la parte no lineal de las relaciones cinemáticas,  $\lambda^C$  es la carga crítica (el autovalor) y  $\Phi^C$  la forma de modo (el autovector). Este tipo de análisis de autovalores y autovectores se denomina Análisis de Bifurcación Lineal (LBA) y es usado en este trabajo para comparar resultados entre la estructura rigidizada y la estructura equivalente. La carga crítica  $\lambda^C$  es el parámetro multiplicador de la carga de referencia (térmica, presión uniforme o viento).

La Figura 2 muestra los modos críticos con su correspondiente temperatura crítica para diferentes modos que afectan para el tanque en estudio. El primer modo presenta desplazamientos localizados en el techo, para una temperatura crítica baja  $T^C=94^\circ C$ . El primer modo que muestra desplazamientos en el cilindro se produce a  $T^C=205^\circ C$  mientras que el primer modo con desplazamientos en el cilindro y en el techo aparece a  $T^C=208^\circ C$ .

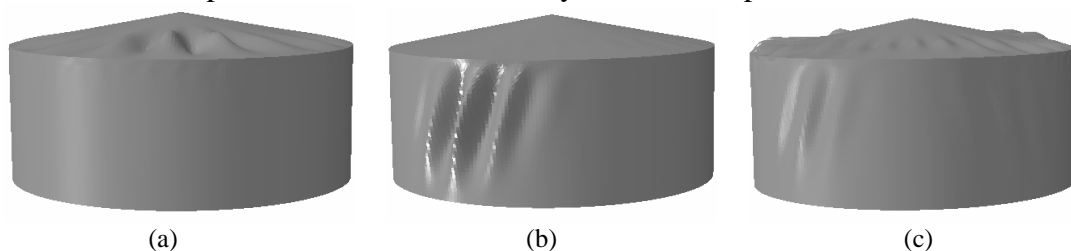


Figura 2: Modos críticos para el tanque en estudio, (a) Primer modo (en el techo),  $T^C=94^\circ C$ , (b) Primer modo en el cilindro,  $T^C=205^\circ C$ , (c) Primer modo combinado (techo y cilindro),  $T^C=208^\circ C$ .

Para el modelo de espesor equivalente en el techo, un espesor de 1.4t (Modelo  $M_1$ ) es el único que muestra una forma de modo con pandeo en el techo. Este modelo tiene el menor espesor de todos los analizados y, por lo tanto, se presenta un autovalor con significativos desplazamientos en el techo. Para este caso, la rigidez del techo equivalente es similar al tanque con la estructura soporte siendo esperable que el pandeo ocurra en el techo. En los otros casos con mayor espesor del techo, los techos son mas rígidos comparados que el cilindro. De esta manera, las formas de modo muestran pandeo en la envolvente cilíndrica.

Los valores de temperaturas críticas en función del espesor son mostrados en la Figura 3

para los tres primeros modos, solamente se incluyen formas de modo que se desarrollan en el cilindro. Modelos con rigidez de techo hasta 5.71 veces la rigidez del techo con las vigas rigidizadoras tienen formas de modo similares. Las temperaturas críticas disminuyen no linealmente al aumentar el espesor del techo hasta un valor mínimo asociado a ocho veces el espesor de la virola inferior del cilindro, con una disminución del 32% de la carga crítica.

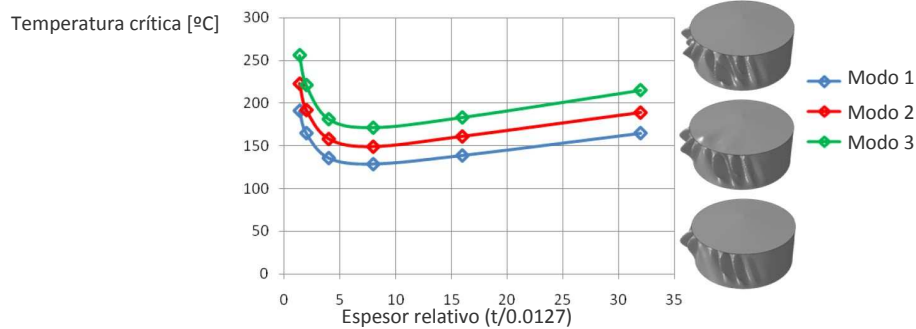


Figura 3: Temperaturas críticas en función del espesor relativo del techo, para espesores equivalentes.

Para los techos de mayor espesor, el techo es muy rígido y la temperatura crítica aumenta casi linealmente, las formas de modo permanecen con formas similares. El caso con mayor espesor de techo de todos los estudiados (Modelo M7) muestra deformadas considerablemente diferentes a los otros casos ya que el techo es muy rígido y restringe los desplazamientos en la parte superior del cilindro. El autovector obtenido es similar al caso con desplazamiento vertical impedido en el borde superior del cilindro. Por lo tanto se puede concluir que la configuración deformada que se obtiene con un techo muy rígido mediante un análisis LBA no resulta adecuada respecto al caso real de techo con estructura soporte.

Al reducir los espesores del techo, que es una práctica común en tanques, se observa que las temperaturas críticas disminuyen para techos que presentan rigideces altas con pandeo en el casco cilíndrico. Debido a las restricciones que impone el techo en estos casos, se desarrollan altas tensiones e importantes deformaciones concentradas en la zona más flexible de la estructura completa en la parte superior del cilindro. En todos los casos analizados el espesor del techo es mayor que el espesor en cualquier zona del cilindro.

El análisis de bifurcación con un techo equivalente sin considerar la acción de las columnas internas presenta una deformada similar a la obtenida con análisis no lineal, en la envoltura cilíndrica como se puede ver en la Figura 4. Se puede observar la formación de abolladuras próximas a la zona de mayor calentamiento. Las ondas se desarrollan en dirección vertical con una leve inclinación hacia la zona de mayor temperatura.

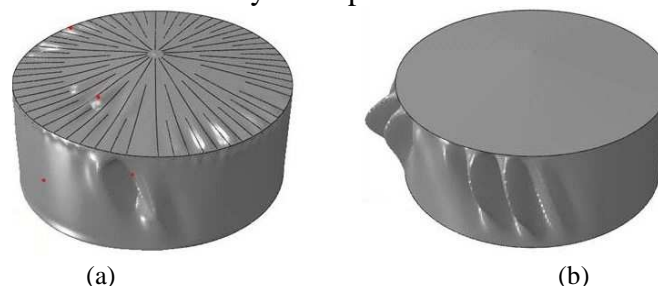


Figura 4: Deformadas obtenidas por: (a) Análisis no lineal para el tanque con techo rigidizado, (b) Análisis de bifurcación lineal con un techo equivalente autoportante.

### 2.3 Pandeo bajo presión uniforme

Para el tanque de la Figura 1, se plantea como otro estado carga a estudiar una presión uniforme en todo el interior representando una sollicitación de vacío interior. Nuevamente se

compara la respuesta del tanque con la estructura rigidizadora del techo con la obtenida considerando un techo cónico autoportante de espesor variable correspondiente a los modelos M1 a M7. En este caso también se considera una densidad equivalente de manera que al aumentar el espesor se mantenga en peso total del techo.

El modelo de elementos finitos se plantea mediante ABAQUS con elementos cuadrangulares de 8 nodos identificados como S8R5 en el cilindro y parte del techo y elementos triangulares de 6 nodos STRI65. Mediante análisis de bifurcación lineal (LBA) se obtiene la carga crítica de pandeo para este estado de carga. Como la carga y la estructura es axilsimétrica entonces la deformada resulta con esa misma característica. La carga crítica correspondiente al primer modo crítico es  $\lambda^C=2.53\text{kN/m}^2$  y la forma de modo se muestra en perspectiva en la Figura 5(a) y un corte con un plano horizontal en la Figura 5(b). Se puede observar que los mayores desplazamientos se registran en el casco cilíndrico con un desarrollo circunferencial de 23 ondas, como se observa en la vista superior de la Figura 5(c).

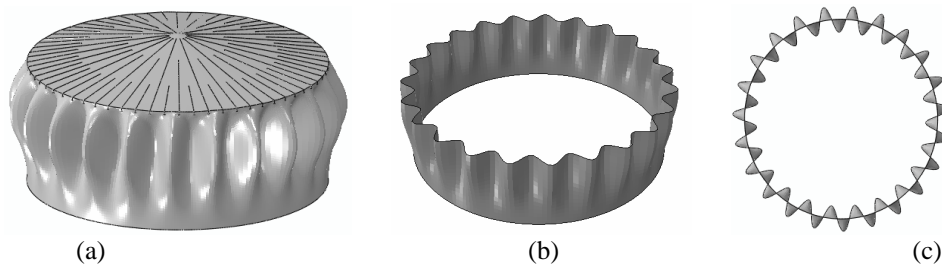


Figura 5: Primer modo crítico para el tanque en estudio ( $\lambda^C=2.53\text{kN/m}^2$ ), (a) Perspectiva, (b) Corte con plano horizontal en perspectiva, (c) Vista superior.

Con el objeto de reemplazar el techo rigidizado por uno autoportante de espesor constante se realiza un análisis similar al realizado con carga térmica, para los modelos simplificados con techo de espesor que varía entre 1.4t y 80t. Para esta sollicitación también se considera que el material constitutivo del techo autoportante tiene una densidad reducida a medida que aumenta el espesor del techo con el objeto que se mantenga el peso total del techo y la estructura soporte. La Tabla 2 muestra los valores de carga crítica obtenida con los modelos autoportantes y con material de densidad equivalente. Como otra posibilidad de simplificación no se considera el peso del techo en los modelos simplificados en lugar de modificar la densidad en el modelo simplificado. En la Figura 6 se muestra la variación de cargas críticas en función del espesor relativo, considerando en los modelos la densidad modifica para el techo y sin tener en cuenta el peso en el techo, junto con el valor correspondiente al tanque en estudio.

Modelo	Densidad Equivalente		Sin peso en el techo	
	Esesor [m]	Carga crítica $\lambda^C$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Esesor [m]	Carga crítica $\lambda^C$ [kN/m <sup>2</sup> ]
M1	1.4t	0.018	0.018	
M2	2 t	0.025	0.025	2.217
M3	4 t	0.051	0.051	2.233
M4	8 t	0.102	0.102	2.271
M5	16 t	0.203	0.203	2.432
M8	20 t	0.254	0.254	2.504
M9	24 t	0.305	0.305	2.555
M6	32 t	0.406	0.406	2.615
M7	80 t	1.016	1.016	2.675

Tabla 2: Cargas críticas para los modelos simplificados bajo presión uniforme (M1 a M9).

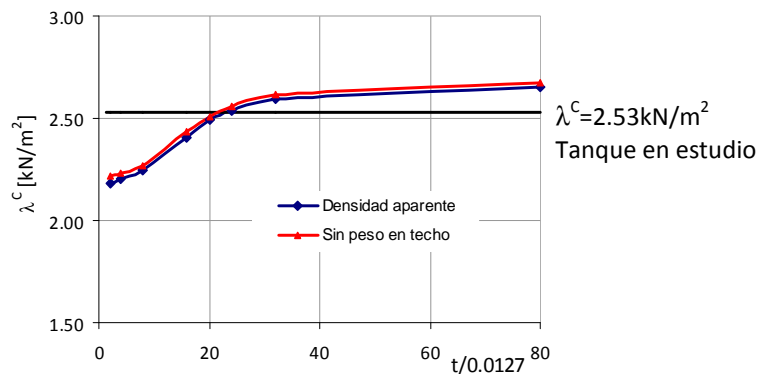


Figura 6: Cargas críticas para los modelos simplificados bajo presión uniforme en función del espesor relativo del techo.

Se puede observar una relación no lineal entre las cargas críticas y los espesores del modelo equivalente con valores menores al de referencia para espesores bajos y mayores para espesores mayores a  $20t$  aproximadamente. Para tener una mejor definición de las cargas críticas en función del espesor, se incorporan los modelos M8 y M9 con espesores  $20t$  y  $24t$  respectivamente.

Para el modelo de menor espesor analizado (M1), la carga crítica es mucho menor ( $\lambda^c = 0.81 \text{ kN/m}^2$ ) que la del modelo de referencia y la forma de modo es muy diferente con los mayores desplazamientos en el techo debido a que el espesor es muy bajo como para tener una adecuada equivalencia con el tanque estudiado, esta forma de modo se muestra en la Figura 7(a). Por esta razón este valor no está incluido en la Figura 6. En todos los restantes modelos se observa una forma de modo similar a la del tanque de referencia con cargas críticas crecientes a medida que aumenta el espesor del techo, la equivalencia en cuanto a cargas críticas con el modelo de referencia se logra para un espesor de 24 veces el mayor espesor de la envolvente cilíndrica. Para espesores menores, si bien la forma de modo es similar al modelo con techo rigidizado, en la mayoría de los modelos se desarrollan 22 ondas circunferenciales mientras que para  $t_{\text{equiv}} \geq 24t$  se generan 23 ondas en el perímetro del cilindro manteniendo una equivalencia entre las deformadas del modelo simplificado y el de referencia. Este comportamiento es similar considerando una densidad equivalente o sin considerar el peso del techo en el modelo simplificado. La Figura 7(b) y (c) muestra la forma de modo para un espesor de techo  $24t$  en perspectiva y con un corte con un plano horizontal, respectivamente.

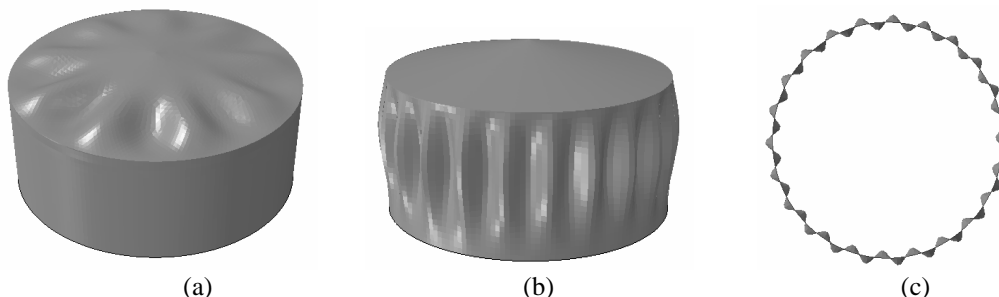


Figura 7: Primer modo crítico para modelos simplificados con techo autoportante, (a)  $1.4t$  ( $\lambda^c = 0.81 \text{ kN/m}^2$ ), (b)  $24t$  ( $\lambda^c = 2.55 \text{ kN/m}^2$ ), perspectiva, (c)  $24t$  (23 ondas circunferenciales), corte con plano horizontal.

## 2.4 Pandeo bajo viento

Para considerar la acción de viento sobre el tanque de la Figura 1, se calculan las cargas actuantes de acuerdo al Reglamento CIRSOC 102 (2005). La variación circunferencial sobre

el cilindro del coeficiente de presión externa ( $C_p$ ) está dada por la siguiente expresión:

$$C_p(\phi) = k_c C_{p1}(\phi), \tag{5}$$

$$C_{p1}(\phi) = -0.5 + 0.4 \cos \phi + 0.8 \cos 2\phi + 0.3 \cos 3\phi - 0.1 \cos 4\phi - 0.05 \cos 5\phi$$

donde  $\phi$  es el ángulo al centro del cilindro medido desde el meridiano a barlovento. Este coeficiente es afectado por el factor

$$k_c = 1.0 - 0.55(C_{p1} + 0.15) \log\left(\frac{H}{D}\right) \quad \text{para } C_{p1} < -0.15 \tag{6}$$

donde  $D$  es el diámetro del cilindro y  $H$  su altura, con una distribución constante en la altura del cilindro. Para las cargas actuantes sobre el techo cónico se considera la distribución planteada en CIRSOC 102 mostrada en la Figura 8, correspondiendo un coeficiente de presión  $C_p = -0.8$  para la zona A y  $C_p = -0.5$  para la zona B. En los casos los coeficientes negativos indican succión y presión los positivos.

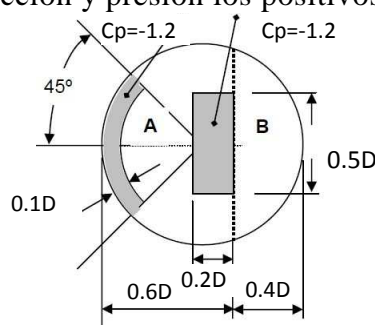


Figura 8: Distribución de coeficientes de presión en techo cónico (CIRSOC 102-2005).

Usando el mismo modelo de elementos finitos que para presión uniforme, el análisis de bifurcación lineal (LBA) aporta una carga crítica correspondiente al primer modo de valor  $\lambda^C = 3.36 \text{ kN/m}^2$ . La forma de modo correspondiente al tanque con la estructura soporte se muestra la Figura 9(a). Se observa que las mayores deformaciones se presentan en el cilindro en la zona a barlovento sin estar afectado prácticamente el techo ya que las vigas anulares y radiales y las columnas interiores le aportan elevada rigidez al techo cónico.

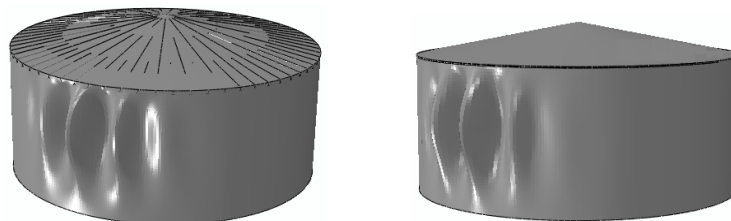


Figura 9: Primer modo crítico para el tanque, (a) con estructura soporte ( $\lambda^C = 3.36 \text{ kN/m}^2$ ), (b) Techo autoportante  $t_{equiv} = 32t$ , sin considerar peso del techo ( $\lambda^C = 3.33 \text{ kN/m}^2$ ).

Modelo	Densidad Equivalente		Sin peso en el techo	
	Espesor [m]	Carga crítica $\lambda^C$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Espesor [m]	Carga crítica $\lambda^C$ [kN/m <sup>2</sup> ]
M1	1.4t	0.018	0.018	2.973
M2	2 t	0.025	0.025	2.974
M3	4 t	0.051	0.051	2.984
M4	8 t	0.102	0.102	3.021
M5	16 t	0.203	0.203	3.158
M6	32 t	0.406	0.406	3.322
M7	80 t	1.016	1.016	3.281

Tabla 3: Cargas críticas para los modelos simplificados bajo viento (M1 a M7).



En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos con análisis de bifurcación lineal para los modelos simplificados considerando una densidad equivalente para el material del techo y sin considerar el peso del techo. Como para sollicitación de vacío, los valores obtenidos sin tener en cuenta el peso del techo son levemente superiores a los hallados con densidad equivalente, pero en este caso es necesario un mayor espesor en el techo autoportante para reproducir los valores de carga crítica del modelo de referencia, como se puede ver en la Figura 10. Para obtener una carga crítica similar entre el modelo simplificado y el modelo rigidizado, el espesor equivalente necesario es  $t_{equiv}=32t$  sin considerar el peso del techo en el modelo autoportante.

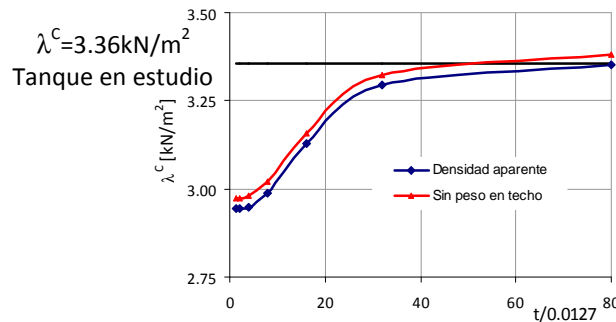


Figura 10: Cargas críticas para los modelos simplificados bajo viento en función del espesor relativo del techo.

Las formas de modo obtenidas en los modelos simplificados son similares al del tanque con techo con soporte, aun para espesores reducidos ( $1.4t$  a  $4t$ ) como se puede ver en la Figura 9(b) pero las cargas críticas son menores con factores de reducción del orden de 0.88 para esos espesores. Al ser valores menores resultan conservadores.

### 3 TANQUES CON TECHO FLOTANTE

#### 3.1 Equivalencia entre modelos con viga rigidizadora superior versus restricciones de desplazamiento

Se presenta el estudio de un tanque de almacenamiento de hidrocarburo con techo flotante, resultando abierto en la parte superior bajo una condición de no tener fluido en su interior y reforzado con un anillo rigidizador en la virola más alta. El tanque estudiado tiene un diámetro de 37.9m y una altura de 9.47m. Se considera un alto de virola de 1.5m, necesitando siete virolas para cubrir toda la altura del tanque. El espesor de las virolas se dimensiona según la norma API 650 (2010) obteniendo un espesor de 0.0127m para las dos virolas inferiores y 0.0095m para las virolas restantes. En la Figura 11(a) se muestran las características geométricas del tanque estudiado. Este modelo se denomina Modelo Con Anillo (MCA).

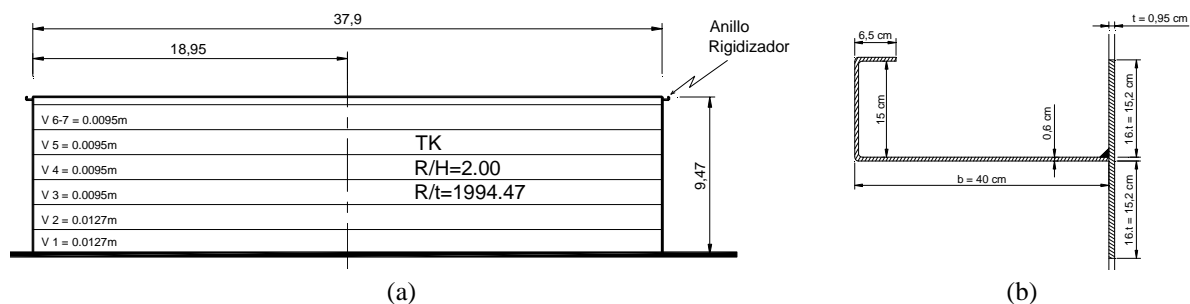


Figura 11: Tanque con techo flotante en estudio, (a) Geometría, (b) Detalle de Anillo Rigidizador

Estos tanques suelen presentar un anillo rigidizador en la parte superior que se dimensiona para resistir cargas de viento manteniendo la forma circular del extremo superior. Tanto la norma británica BS 2654 (1997) como API 650 (2010) establecen la misma expresión para calcular el módulo resistente mínimo ( $Z$ ) del rigidizador, en  $\text{cm}^3$ , basado en una expresión empírica y que puede ser fácilmente aplicada en el diseño, dada por la Ecuación (7)

$$Z = \frac{D^2 H_2}{17} \tag{7}$$

donde  $D$  es el diámetro del tanque y  $H_2$  la altura del tanque. Esta expresión corresponde a una velocidad de viento de 190 km/h, para velocidades diferentes se debe afectar por el factor  $(V/190)^2$ . En este caso se tomó una velocidad de 165 km/h correspondiente a velocidades de la zona patagónica norte, resultando un módulo resistente mínimo requerido de  $723\text{cm}^3$ . En la Figura 11(b) se detallan las características geométricas y dimensiones del anillo rigidizador, su forma es la recomendada por API en función de módulo resistente mínimo.

Se consideran dos modelos simplificados, en el primero se representa el efecto del anillo rigidizador mediante un apoyo que impide los desplazamientos en un plano horizontal en la parte superior de tanque, como lo muestra la Figura 12, llamado Modelo Sin Anillo (MSA).

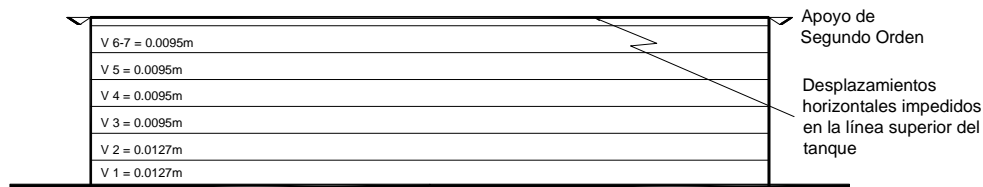


Figura 12: Modelo simplificado con restricción de desplazamientos horizontales en la arista superior del casco cilíndrico (MSA).

En el otro modelo simplificado, denominado Modelo con Sección Equivalente (MSE), se determina un área equivalente rectangular aumentando la sección de la virola en la zona del anillo rigidizador intentando representar el mismo efecto. La Figura 13(a) muestra el esquema representativo de este modelo. Para el cálculo se considera una altura correspondiente a la zona indicada por la norma API 650 para el anillo rigidizador y se determina el espesor de manera que satisfaga el módulo resistente mínimo requerido de  $723\text{cm}^3$ . En la Figura 13(b) se muestra un detalle de la última virola y el área equivalente usada para el análisis simplificado.

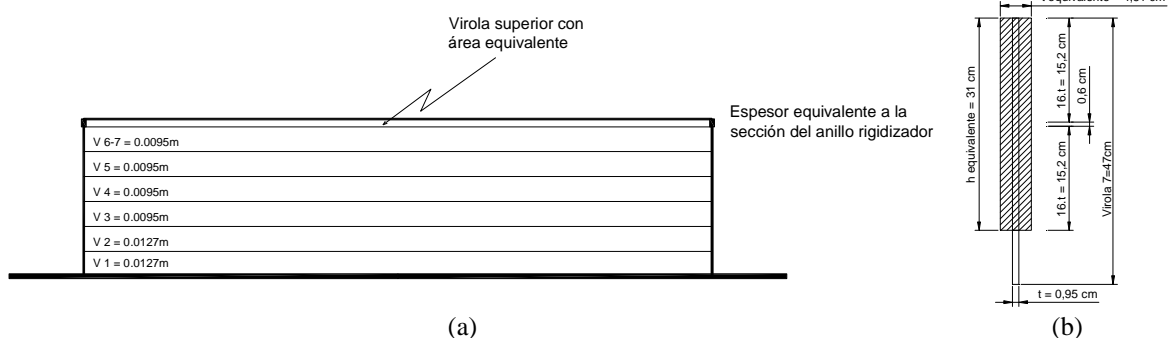


Figura 13: Modelo simplificado con área equivalente al anillo rigidizador en la virola superior del casco cilíndrico (MSE), (a) Vista general, (b) Área equivalente.

El tipo de elementos que se utiliza para el malla de elementos finitos son cuadrangulares parabólicos de 8 nodos (S8R5) que permiten una mejor aproximación respecto de los lineales. Se impone como condición de contorno en el borde inferior del tanque en cada uno de los modelos, una restricción de desplazamientos en las tres direcciones, simulando el apoyo con el suelo. El material considerado es un acero A36 con un módulo de elasticidad de 209.85

GPa y un módulo de Poisson de 0.3.

### 3.2 Pandeo bajo carga térmica

Como sollicitación se considera una distribución de carga térmica que simula el efecto de un tanque vecino incendiado, como la indicada en la Ecuación (3). Bajo esta condición el tanque mantiene su forma hasta una cierta temperatura, superada esa temperatura puede seguir soportando carga térmica pero con un modo de deformación diferente al original. La temperatura límite que la estructura soporta previo al cambio de forma es la temperatura crítica y su deformada es el modo asociado.

En primera instancia se realiza un análisis de convergencia para cada uno de los modelos geométricos, ya que la respuesta resulta muy sensible al tamaño de los elementos. Para el tanque con el anillo rigidizador se consideran distintos tamaños de elementos por virola afinando el análisis disminuyendo los tamaños de los elementos hasta llegar a un valor donde la temperatura crítica no varía significativamente (error admisible 2.5%). El error relativo se estima según la Ecuación 8.

$$Error(i)\% = \frac{Iter(i-1) - Iter(i)}{Iter(i-1)} * 100 \quad (8)$$

Cada iteración representa un mallado diferente para un mismo modelo estructural. En la Tabla 4 se muestra la sensibilidad al refinamiento de la malla del tanque con el anillo rigidizador. Este modelo se denomina Modelo Con Anillo (MCA).

LBA ITERACION	CILINDRO [m]					ANILLO RIGIDIZADOR [m]			MCA	
	V1-2	V3	V4-5	V6	V7	L1	L2	L3	T <sup>C</sup> [°C]	ERROR
1	1		0.7		0.5	0.2	0.075	0.0325	<b>363.7</b>	-
2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	0.2	0.075	0.0325	<b>350.4</b>	3.8
3	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.2	0.075	0.0325	<b>347.1</b>	0.9
4	0.8		0.5		0.2	0.1	0.05	0.021	<b>346.9</b>	0.0
5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.1	0.05	0.02	<b>308.0</b>	12.6
6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.1	0.05	0.02	<b>282.6</b>	9.0
7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	<b>273.1</b>	3.5
8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.05	0.02	<b>266.9</b>	2.3

Tabla 4: Tanque sin techo, con anillo rigidizador (MCA).

Según este análisis para un tamaño de elemento de 0.2m en el casco cilíndrico y 0.1m en la última virola, la temperatura crítica de 266.9°C. En la Figura 14(a) se muestra el modo asociado, para el tanque con rigidizador en la parte superior del cilindro y en Figura 14(b) un detalle de la deformación en una vista superior y en planta.

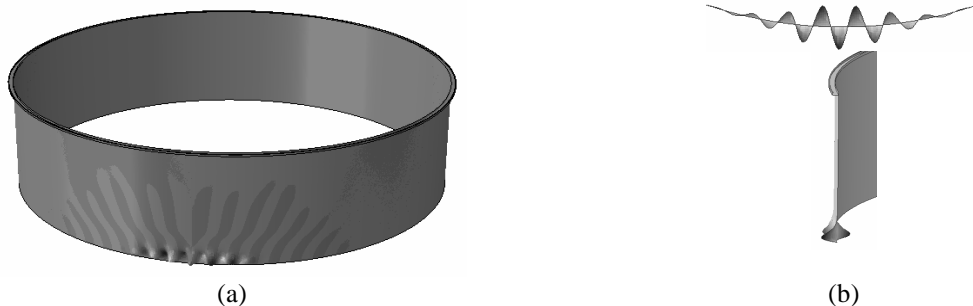


Figura 14: Primer modo crítico para tanque abierto con anillo rigidizador ( $T^C=266.9^\circ\text{C}$ ). (a) Perspectiva, (b) Detalles en vista superior y corte lateral de deformación en borde inferior.

Nuevamente se realiza un análisis de convergencia para los modelos simplificados, que está resumido en la Tabla 5, donde cada iteración representa un tamaño de elemento uniforme

en todo el casco cilíndrico, tanto para el modelo con el borde superior con el desplazamiento impedido (MSA) como para el de sección equivalente (MSE).

LBA ITERACION	MSA			MSE		
	ELEMENTOS V1-7 [m]	T <sup>C</sup> [°C]	ERROR	ELEMENTOS V1-7 [m]	T <sup>C</sup> [°C]	ERROR
1	0.8	75.5	-	0.7	351.5	-
2	0.6	74.3	1.6	0.5	308.1	14.1
3	0.5	73.9	0.5	0.4	282.7	9.0
4	-	-	-	0.3	273.1	3.5
5	-	-	-	0.2	266.9	2.3

Tabla 5: Tanque sin techo, con apoyo superior (MSA) y área equivalente (MSE).

Las curvas de convergencia se muestran en la Figura 15, donde se representan los valores obtenidos para tanque con anillo rigidizador y la simplificación considerando el área equivalente, que da la mejor aproximación. La simplificación del apoyo en la virola superior converge a temperaturas mucho mas bajas que la correspondiente al tanque con anillo rigidizador.

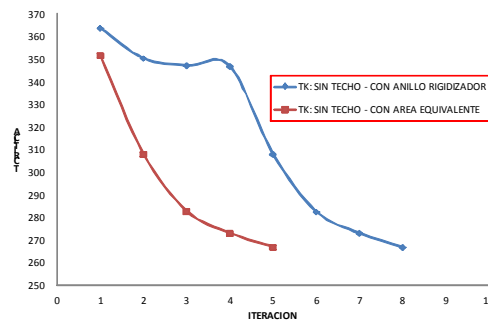


Figura 15: Curvas de convergencia para modelos MSA y MSE.

De acuerdo al análisis de convergencia el tamaño adoptado de elemento es de 0.8m para el modelo con apoyo superior donde la temperatura crítica obtenida es de 73.9°C y de 0.2m para el modelo de sección equivalente con una temperatura crítica 266.9°C. En la Figura 16 se muestra el modo crítico asociado a cada uno de los modelos.

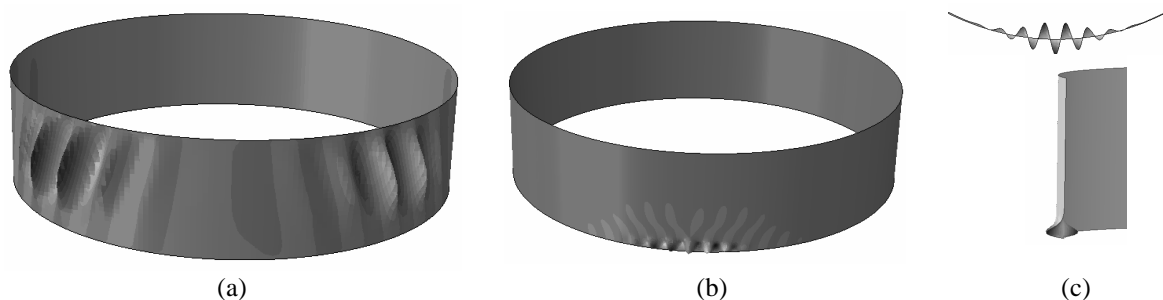


Figura 16: Primer modo crítico para los modelo simplificados, (a) Con apoyo en borde superior (T<sup>C</sup>=73.9°C), (b) Con sección equivalente al anillo rigidizador (T<sup>C</sup>=266.9°C), (c) Detalles en vista superior y corte lateral de deformación en borde inferior del modelo MSE

Los resultados muestran que la mejor simplificación al tanque real, para el caso de estar solicitado a carga térmica, es con el área equivalente al anillo rigidizador, descartando la hipótesis del apoyo que restringe el desplazamiento en el plano horizontal en la parte superior del tanque. Se puede observar que la restricción de desplazamiento en el borde superior no sólo aproxima de manera errónea las temperaturas críticas sino también los desplazamientos asociados al modo crítico. La forma de modo correspondiente al modelo con sección equivalente es similar a la obtenida para el tanque con rigidizador.

Las temperaturas críticas y sus modos de deformación asociados son muy distintas cuando se restringen los desplazamientos en el plano horizontal en el borde superior de la cáscara comparado con el caso de utilizar el anillo rigidizador o la simplificación del área equivalente. Para el anillo rigidizador los desplazamientos del modo se concentran en la base, mientras que para la condición de borde de desplazamiento horizontal impedido los desplazamientos afectan la parte central del cilindro, con lóbulos simétricos con respecto a la dirección de incidencia del fuego.

Los modelos con anillo rigidizador y con la simplificación del área equivalente rectangular dan temperaturas críticas y modos asociados muy parecidos. Las temperaturas críticas resultan del orden de 270°C, mientras que la versión simplificada con desplazamientos impedidos en dirección horizontal da resultados mucho menores (del orden de 74°C) porque se introduce una restricción mayor en los desplazamientos.

### 3.3 Pandeo bajo presión uniforme

El tanque flotante con rigidizador correspondiente a la Figura 11 se somete a una presión uniforme hacia el interior resultando una carga crítica de valor  $\lambda^C=3.14\text{kN/m}^2$  con una forma de modo axilsimétrica como para el tanque con techo, presentando en este caso 28 ondas circunferenciales. La Figura 17 muestra la forma del primer modo, en perspectiva y vista superior.

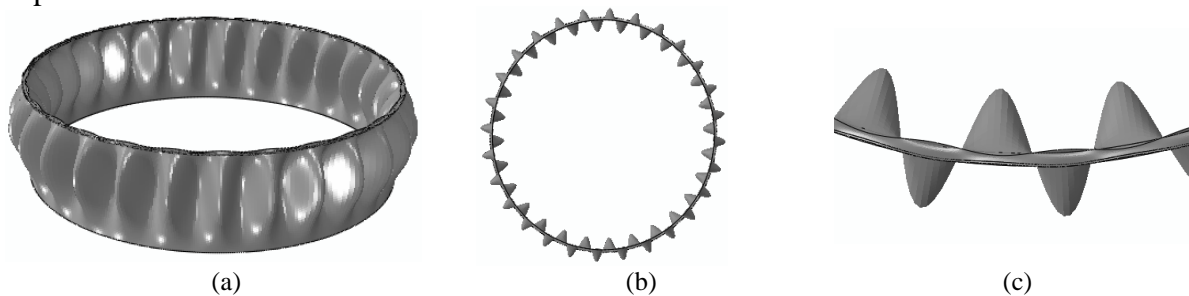


Figure 17: Primer forma de modo para tanque abierto con rigidizador bajo presión uniforme ( $\lambda^C=3.14\text{kN/m}^2$ ), (a) Perspectiva, (b) Vista superior, (c) Detalle de deformación en borde superior.

Para los modelos simplificados las formas de modo obtenidas son similares al modelo de referencia, tanto para el modelo con restricción de desplazamiento en el borde superior (MSA) como para el de sección equivalente en la zona del rigidizador (MSE) se obtienen 28 ondas circunferenciales y semejantes deformadas en el meridiano como se muestra en la Figura 18. En un detalle del borde superior del tanque, Figura 17(c) y Figura 18(c), se observan desplazamientos en el tanque con rigidizador y en el modelo simplificado de sección equivalente mientras que esos desplazamientos están impedidos en el modelo con apoyo en borde superior.

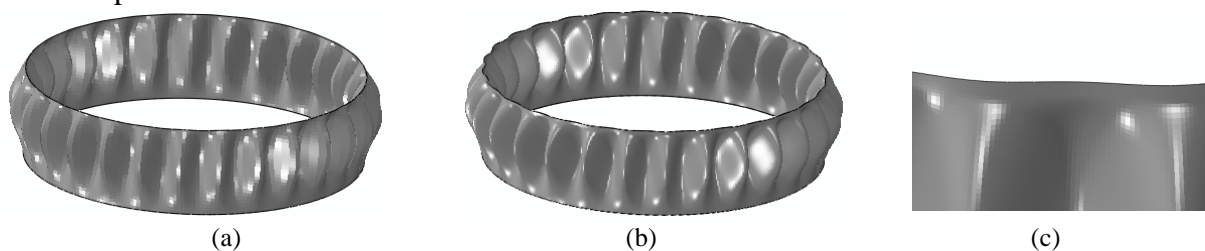


Figure 18: Primer forma de modo para modelos simplificados bajo presión uniforme, (a) Apoyo superior MSA ( $\lambda^C=3.06\text{kN/m}^2$ ), (b) Sección equivalente MSE ( $\lambda^C=3.25\text{kN/m}^2$ ), (c) Detalle de deformación en borde superior, MSE.

La Tabla 6 muestra las cargas críticas para el tanque de referencia y los modelos

simplificados, también se presentan los errores obtenidos con dichas simplificaciones en el valor de las cargas críticas. Se observa que en ambos casos el error relativo es bajo, menor o igual al 3.5%. La opción de impedir el desplazamiento en el borde superior es conservadora frente al valor del tanque de referencia y además más sencilla de modelar.

Modelo	$\lambda^C$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Error relativo[%]
Tanque con anillo rigidizador	3.14	
Con apoyo superior (MSA)	3.06	2.5
Con sección equivalente(MSE)	3.25	3.5

Tabla 6: Cargas críticas para tanque sin techo, bajo presión uniforme.

### 3.4 Pandeo bajo viento

Nuevamente las cargas de viento son evaluadas mediante CIRSOC 102 (2005), con una variación circunferencial dada por la Ecuación (5) y una distribución constante en altura. Según el reglamento se debe considerar coeficientes de presión interna que dependen de una clasificación del tipo de cerramiento. Esa clasificación se hace en función de la cantidad de aberturas de la construcción relacionando el área total de aberturas de la envolvente (incluyendo paredes y techo), el área total de aberturas de la pared con presión externa positiva y el área total de la construcción. En base a ella los tanques se clasifican como cerrados ya que no cumplen con las condiciones necesarias para edificio abierto o parcialmente abierto, y le corresponde un coeficiente de presión interna de  $\pm 0.18$ . La carga crítica obtenida para el tanque con anillo rigidizador es  $\lambda^C=3.38\text{kN/m}^2$ , cuya forma de modo se muestra en la Figura 19(a). Las formas de modo para los modelos simplificados son similares a la del tanque con rigidizador, en la Figura 19(b) se muestra el modelo con sección equivalente y en Figura 19(c) un detalle del borde superior. Tanto en el modelo de referencia como en aquel con sección equivalente se observan desplazamientos en el borde superior. La deformada para el modelo con el apoyo en el borde superior es similar, sin presentar esas leves ondulaciones en el extremo del tanque.

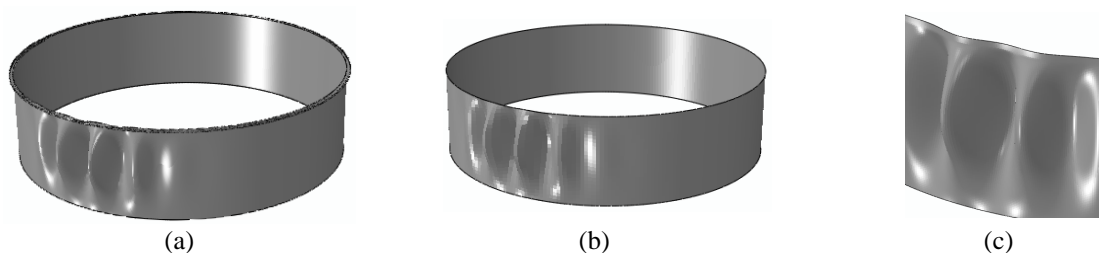


Figura 19: Primer forma de modo bajo viento, (a) Tanque con rigidizador ( $\lambda^C=3.38\text{kN/m}^2$ ), (b) Sección equivalente, MSE ( $\lambda^C=3.47\text{kN/m}^2$ ), (c) Detalle de deformación en borde superior, MSE.

En la Tabla 7 se presentan las cargas críticas obtenidas para el modelo de referencia y los modelos simplificados, junto con el error relativo por la simplificación. El error obtenido con la simplificación es bajo, menor o igual al 3.1%, y la carga crítica al considerar impedido el desplazamiento en el borde superior es conservadora frente al valor para el tanque de referencia.

Modelo	$\lambda^C$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Error relativo[%]
Tanque con anillo rigidizador	3.38	
Con apoyo superior (MSA)	3.28	3.1
Con sección equivalente (MSE)	3.47	2.7

Tabla 7: Cargas críticas para tanque sin techo, bajo viento.

## 4 CONCLUSIONES

En este trabajo se analizan diferentes formas de simplificar la rigidez del extremo superior de tanques de almacenamiento, ya sea en tanques con techo cónico o techo flotante. Para evaluar la rigidez del techo cónico con la estructura de vigas y columnas que le sirven de soporte se estudia la respuesta de techos autoportantes con diferentes espesores, parametrizados en función del mayor espesor de chapa de la envolvente cilíndrica. Para los tanques con techo flotante que presentan viga rigidizadora de borde, se analiza como posible simplificación considerar que el extremo superior tiene impedido los desplazamientos en el plano horizontal y como otra alternativa una sección de rigidez equivalente al viga rigidizadora de borde. Estos esquemas son analizados bajo solicitaciones de carga térmica, presión uniforme y viento.

Se puede concluir que:

- Las simplificaciones recomendadas no son iguales para todas las solicitaciones analizadas. En el tanque abierto para cargas térmicas se recomienda considerar en el borde superior una sección de inercia equivalente al rigidizador, mientras que para presión uniforme o viento es posible usar como simplificación una restricción de desplazamiento en el plano horizontal superior.
- Para simplificar la estructura soporte en un techo cónico como el evaluado en este tanque es necesario considerar importantes espesores en el cono y sus valores dependen de las solicitaciones. Para vacío interior el espesor necesario es menor que para viento, pero en ambos casos deben ser superiores a 24 veces el mayor espesor de la envolvente cilíndrica, descartando el peso del techo en el modelo equivalente. Para cargas térmicas se obtienen respuestas similares para espesores reducidos de techo autoportante, siendo suficiente que sean semejantes la inercia global del techo rigidizado y del autoportante.

**Agradecimientos:** L.A. Godoy agradece el apoyo de SECYT-UNC y de CONICET y R.C. Jaca de SECYT-UNCo en esta investigación.

## REFERENCIAS

- ABAQUS, *User's Manuals, Version 6.3*, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. Rhode Island, 2006.
- Aghajari, S., Abedi, K., Showkati, H., Buckling and post-buckling behavior of thin walled cylindrical steel shells with varying thickness subjected to uniform external pressure, *TWS*, 44: 904–909, 2006.
- API Standard 650, *Welded steel tanks for oil storage*, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2010.
- Chen L., Rotter J. M., Buckling of anchored cylindrical shells of uniform thickness under wind load, *Engineering Structures*, 41: 199–208, 2012.
- Godoy, L.A. and Batista Abreu, J.C., Buckling of fixed-roof aboveground oil storage tanks under heat induced by an external fire, *Thin-Walled Structures*, 52: 90–101, 2012.
- Jørgensen F., Buckling behavior of a liquid storage tank, *Thin-Walled Structures*, 1: 309-323, 1983.
- Landucci G., Gubinellia G., Antonioni G., Cozzani V., The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Anal. and Prev.*; 41: 1206–1215, 2009.
- Liu Y. Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire, PhD Thesis, University of Edinburgh, Scotland, 2011.
- Schmidt H., Binder B., Lange H. Postbuckling strength design of open thin-walled cylindrical tanks under wind load, *Thin-Walled Structures*, 31: 203-220, 1998.
- Zhao, Y. and Lin, Y., Buckling of cylindrical open-topped steel tanks under wind load. *Thin-Walled Structures*, 79: 83-94, 2014.
- Zhao Y., Cao Q. S., Su L., Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure, *Thin-Walled Structures*, 73: 337–349, 2013.