

## EFFECTOS DE LA MODELACIÓN DE PRESIONES POR VIENTO EN ALTURA SOBRE LA ESTABILIDAD DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS

Carlos A. Burgos<sup>a</sup>, Rossana C. Jaca<sup>b</sup> y Luis A. Godoy<sup>c</sup>

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

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

**Palabras Clave:** Elementos Finitos, Pandeo, Tanques, Viento, Variación en altura.

**Resumen.** Estructuras laminares usadas en la industria petroquímica como contenedores de fluidos pueden presentar daños por cargas de viento. Estas cargas actuando sobre los tanques de almacenamiento son variables tanto circunferencialmente como en altura. Un efecto que al presente es un interrogante, es la consecuencia de usar modelos diferentes de distribución de presiones en altura sobre las cargas de pandeo de tanques. Este trabajo propone analizar la influencia de la variación de las cargas de viento en altura sobre las cargas de pandeo necesarias para el diseño de tanques metálicos de almacenamiento de fluidos. El estudio es abordado mediante una modelación por elementos finitos con un código de propósitos múltiples, planteando diferentes distribuciones de viento. Se estudia la respuesta estructural para viento uniforme en altura, con diferentes variaciones aproximando aquella estipulada en los reglamentos y con variaciones provenientes de ensayos en túnel de viento. La simulación del comportamiento de pandeo se realiza mediante análisis de bifurcación lineal y análisis no lineal geométrico con imperfecciones, considerando formas de imperfección asociadas a modos de pandeo. Los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones en altura advierten sobre la necesidad de incluir o no la variación vertical de las presiones de viento en los estudios de pandeo.

## 1 INTRODUCCIÓN

Problemas de efectos de cargas debidas a viento sobre estructuras cilíndricas son frecuentes, por ejemplo en el análisis de silos y tanques, centrales nucleares, componentes de refinerías de petróleo y de plantas de la industria química. Si bien los avances computacionales de la última década permitirían en la actualidad realizar un único análisis multifísico en el que se represente tanto el problema de mecánica de fluidos (acción de viento) y el de análisis estructural (respuesta de la estructura) como parte de un solo modelo, tal enfoque no es viable en el contexto de la práctica profesional. Por ello las presiones se obtienen en general de manera desacoplada del análisis estructural, o sea por una parte se evalúan las presiones actuantes sobre una estructura considerada rígida, y posteriormente se lleva a cabo un análisis estructural tomando los resultados del análisis anterior como input. El análisis de presiones de viento puede realizarse tanto de forma experimental (mediante ensayos de túnel de viento, como en los trabajos de [Portela y Godoy \(2005a y 2005b\)](#) como computacional (mediante Dinámica de Fluidos Computacional). El resultado de esa parte del estudio genera una serie de curvas de nivel con coeficientes de presión que se adoptan como cargas en el estudio de la estructura. Este enfoque se usa, por ejemplo, en códigos de diseño, pero también en la mayor parte de la investigación de avanzada. Estudios europeos de pandeo de cáscaras ([Rotter y Schmidt, 2008](#)) usan este enfoque y proponen curvas en sentido de la circunferencia del cilindro que representan la presión de viento, mientras que no especifican la variación a adoptarse en altura, o la suponen constante con el fin de simplificar el análisis de por sí trabajoso de pandeo. En muchas reuniones de especialistas se ha expresado preocupación por la variación de presiones que debe adoptarse, y en qué medida las simplificaciones actualmente en uso conducen a niveles de error adecuados para la práctica profesional.

[Flores y Godoy \(1998\)](#) estudiaron una configuración de tanque bajo diferentes modelos de presión de viento en altura, encontrando que no había diferencias significativas en términos de su incidencia sobre pandeo. En un estudio reciente de presiones sobre tanques abiertos bajo presiones de viento, [Zhao y Lin \(2014\)](#) demostraron que el problema de pandeo está gobernado por las presiones positivas actuantes en la zona de barlovento, mientras que el resto de presiones sobre la cáscara, de succión, no desempeñan ningún efecto sobre las cargas de pandeo.

En base a lo anterior surge el interés de considerar las consecuencias de usar modelos diferentes de viento sobre la inestabilidad de la cáscara.

Este trabajo plantea analizar la influencia de la variación en altura de la carga de viento sobre la carga de pandeo necesaria para el diseño de tanques metálicos de almacenamiento de fluidos. Se utiliza el coeficiente de presión definido en el reglamento [CIRSOC 102 \(2005\)](#) como estado base y luego se realizan distintas correcciones en altura para estudiar el comportamiento de la estructura frente a diversas modelaciones de la carga de viento, así mismo se realizan comparaciones fluido dinámicas y de estabilidad tomando como referencia el trabajo realizado por [Burgos et al. \(2014\)](#) sobre un tanque de similares características pero donde la carga de viento fue determinada experimentalmente en ensayos en túnel de viento.

En la Sección 2 se presenta una descripción del tanque en estudio y las normativas utilizadas en su diseño. La Sección 3 describe las cargas de vientos utilizadas para los modelos de variación en altura y su comparación con resultados experimentales. La Sección 4 detalla el modelo analizado y las características de la simulación. En la Sección 5 se muestran los resultados numéricos del estudio de estabilidad para las diferentes distribuciones en altura.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL TANQUE EN ESTUDIO

Se estudia un tanque de almacenamiento de techo cónico soportado por una estructura interna con una relación de aspecto altura-diámetro (H/D) igual a 0.52, el cual fue estudiado previamente por [Burgos et al. \(2014\)](#) realizando análisis de estabilidad estructural considerando cargas de viento medidas en túnel de viento (TV). El cuerpo cilíndrico del tanque presenta un diámetro (D) de 30.48m y una altura (H) de 15.75m y el techo cónico tiene una pendiente ( $\alpha$ ) de 10.62°. La [Figura 1](#) muestra que el cuerpo cilíndrico está formado por 11 virolas de espesor escalonado, y un techo cónico de espesor constante soportado por una estructura interna. La distribución de espesores en el cilindro del tanque, el espesor del techo y las secciones de la estructura interna, se determinaron según los requerimientos establecidos en la norma API 650 (2010) que es aplicable a tanques verticales soldados en el campo, aéreos, atmosféricos que operan a presiones menores a 3.5KPa. El acero utilizado en la cáscara del tanque y perfiles de la estructura interna es tipo F24. Las características mecánicas de chapas y perfiles utilizados en el diseño del tanque de almacenamiento son definidas en las normas IRAM-IAS U500-42 y IRAM-IAS U 500-509 respectivamente. Se caracteriza el acero F24 con módulo de Elasticidad de 206 MPa y coeficiente de Poisson de 0.3. La estructura interna del tanque se compone de perfiles UPN formando polígonos regulares de 5 lados con columnas cilíndricas como muestra la [Figura 1b](#).

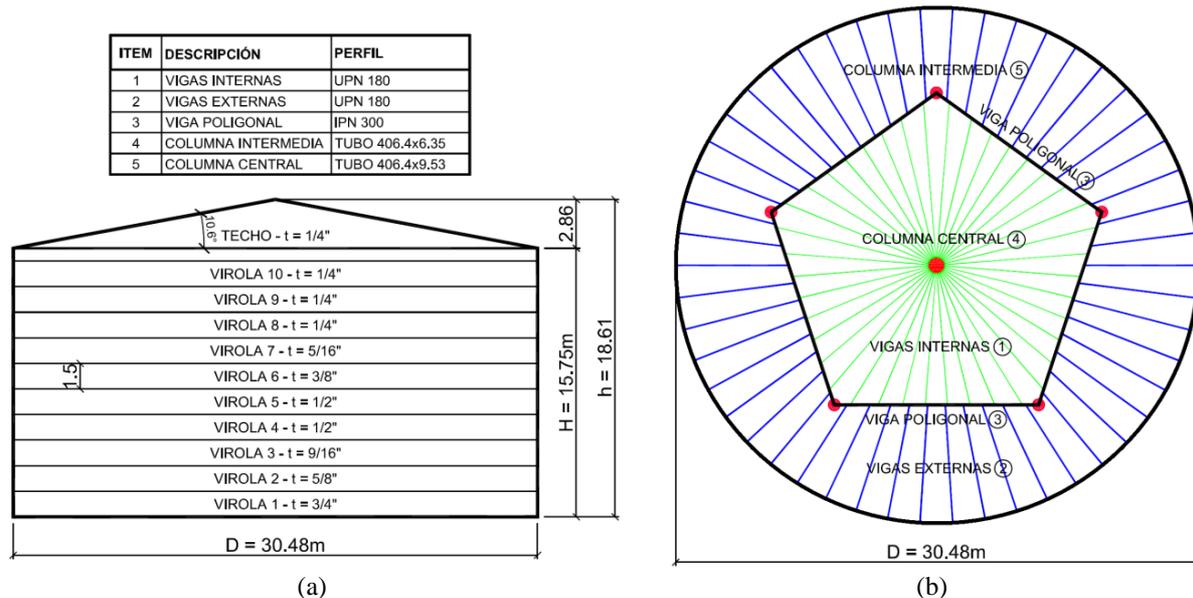


Figura 1. Geometría del tanque de almacenamiento: (a) Vista lateral con distribución de espesores, (b) Planta de estructura interna

La altura de las virolas (1.5m) responde a la dimensión comercial de las chapas en Argentina y el escalonamiento de espesores en el cuerpo cilíndrico varía desde 3/4" a 1/4", de acuerdo a requerimientos de la presión hidráulica ejercida por el fluido almacenado. El espesor del techo es uniforme y según lo establecido en la norma [API 650 \(2010\)](#) resulta de 1/4".

## 3 DISTRIBUCIONES DE VIENTO

La carga de viento base sobre la superficie del tanque de almacenamiento se determina mediante el reglamento [CIRSOC 102 \(2005\)](#) que es la norma Argentina para calcular la acción del viento sobre construcciones civiles e industriales. La norma de viento argentina, en

su última versión, permite estimar la acción del viento sobre un tanque de almacenamiento con techo cónico en base a estudios realizados en túnel de viento por Sabransky (1987) y Macdonald et al. (1988).

El reglamento determina la acción del viento sobre las estructuras en función de la localización de la estructura, de la rigidez o flexibilidad frente a acciones dinámicas, naturaleza de ocupación, nivel de riesgo para la vida humana en caso de falla, categorías de exposición en función de la dirección del viento, rugosidad superficial del terreno dados por la topografía natural y vegetación, así como de las construcciones existentes. Particularmente para el tanque la carga de viento se determinará en dos zonas como son: techo y cuerpo cilíndrico.

El tanque en estudio se comporta como una estructura rígida ya que su frecuencia natural es mayor a 1Hz. Los tanques de almacenamiento de petróleo o sus derivados se pueden clasificar en el marco de la Categoría III fijada por el reglamento para estructuras que representan un peligro para la vida humana en caso de falla, adicionalmente estos tanques se ubican en terrenos abiertos con obstrucciones dispersas por lo que se pueden clasificar en la categoría de exposición C. El reglamento estipula para el sistema principal resistente contra la fuerza de viento (SPRFV), que en nuestro caso es el cuerpo cilíndrico y el techo del tanque, un coeficiente de exposición frente a la carga dinámica ( $K_z$ ). Dicho coeficiente se determina mediante la expresión (1) y busca representar la variación en altura de la capa límite atmosférica.

$$\text{Si } z < 5m, K_z = 2.01(5/z_g)^{2/\alpha} \quad (1a)$$

$$\text{Si } 5m \leq z \leq z_g, K_z = 2.01(z/z_g)^{2/\alpha} \quad (1b)$$

donde los parámetros  $z_g$  y  $\alpha$  para la categoría de exposición C resultan 274m y 9.5 respectivamente. Se puede verificar que el reglamento considera que el coeficiente  $K_z$  es constante en los primeros 5m de altura tomando un valor igual a 0.87, es decir, que en los primeros 5m la distribución de la carga de viento en altura es uniforme, luego sí considera el aumento de la carga por efecto de la capa límite atmosférica.

La presión dinámica evaluada a la altura  $z$  ( $q_z$ ), se determina mediante la siguiente expresión:

$$\text{Si } q_z = 0.613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2 \cdot I \quad (2)$$

donde  $K_{zt}$  es el coeficiente topográfico,  $K_d$  es coeficiente de direccionalidad del viento,  $I$  es el factor de importancia y  $V$  es la velocidad básica del viento. Para el tanque de almacenamiento resultan:  $K_{zt}=1.0$ ,  $K_d=1.00$  y  $I=1.15$ . La velocidad básica del viento ( $V$ ) es un parámetro que se puede determinar de las cargas críticas ( $\lambda^c$ ) o máximas ( $\lambda^{\text{máx}}$ ) determinadas en el análisis de estabilidad del equilibrio.

### 3.1 Distribución circunferencial de presiones de viento en el cuerpo cilíndrico y techo

El reglamento CIRSOC 102 (2005) prevé para las paredes de tanques circulares apoyados en el suelo, un coeficiente de presión externa ( $C_p$ ) dado por la siguiente expresión:

$$C_p(\theta) = k_c \cdot C_{p1}(\theta) \quad (3)$$

donde  $\theta$  es el ángulo al centro del cilindro medido desde el meridiano a barlovento y  $C_{p1}(\theta)$  describe la variación circunferencial del coeficiente de presión.

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

Además la variación circunferencial se debe afectar por  $k_c$  que es un parámetro que depende de la esbeltez (H/D) del tanque de almacenamiento.

$$k_c = 1.0 \text{ para } C_{p1} \geq -0.15 \quad (5a)$$

$$k_c = 1.0 - 0.55(C_{p1} + 0.15) \cdot \log_{10}(H/D) \text{ para } C_{p1} < -0.15 \quad (5b)$$

En el techo del tanque, el reglamento para ángulos  $\alpha > 10^\circ$  indica una distribución regular clasificada en dos zonas (A y B). En la zona directamente expuesta a barlovento en un rango de  $45^\circ$  respecto de la dirección de incidencia y la parte superior del techo para  $\alpha > 10^\circ$ , se debe incrementar la acción del viento mediante un factor de amplificación local (f) igual a 1.50. La Tabla 1 indica el coeficiente de presión ( $C_p$ ) indicado en la norma para la zonificación del techo.

	Zona <b>A</b>	Zona <b>B</b>	Zona <b>Amplificada</b>
$C_p$	-0.80	-0.50	-1.20

Tabla 1. Coeficiente de presión externa ( $C_p$ ) en el techo del tanque.

La Figura 2 muestra la variación del coeficiente de presión externo ( $C_p$ ) en el cilindro y techo del tanque. En el techo, las dimensiones de la zonificación de cargas dependen del diámetro (D) del tanque de almacenamiento.

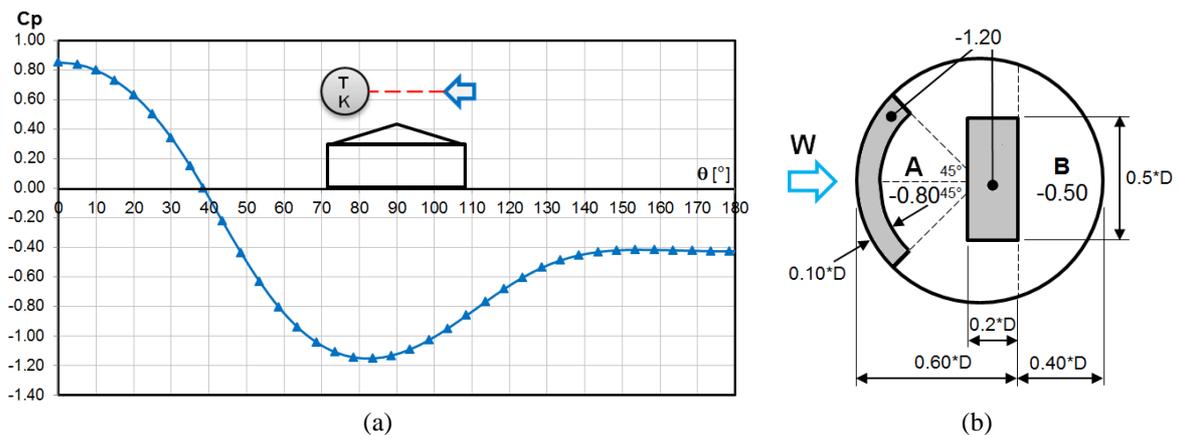


Figura 2. Variación del coeficiente de presión ( $C_p$ ) según CIRSOC 102 (2005): (a) Cilindro y (b) Techo.

La Figura 3 muestra los resultados experimentales obtenidos Burgos et al. (2014) en ensayos en túnel de viento. Se observan diferencias entre la distribución del coeficiente de presión previsto por la norma y los determinados experimentalmente. En el cilindro, en la zona de estancamiento del flujo ( $\theta = 0^\circ$ ) la norma indica un coeficiente  $C_p$  igual a 0.85, en cambio la curva obtenida experimentalmente indica que vale 1.00. Diferentes resultados experimentales y/o presentes en otras normativas muestran valores que oscilan próximos a un valor unitario en el meridiano a barlovento (Jaca, 2008). En las zonas a sotavento del cilindro también existen diferencias, pero no se analizan en este estudio ya que del punto de vista

estructural se ha comprobado por otros investigadores (Jaca et al., 2007) que no afectan la vida en servicio de la estructura, sólo las presiones positivas a barlovento son las que producen problemas de inestabilidad del equilibrio en los tanques de almacenamiento. En el techo, la norma da regularidad a la acción del viento planteando zonas geométricamente definidas por el diámetro del tanque, coincidiendo cualitativamente con los resultados experimentales dado que la carga de viento resulta de succión. En comparación con los resultados obtenidos en túnel de viento (TV), el reglamento CIRSOC 102 (2005) resulta exigente en la determinación de la carga en el techo pero conservador en el cuerpo cilindro del tanque.

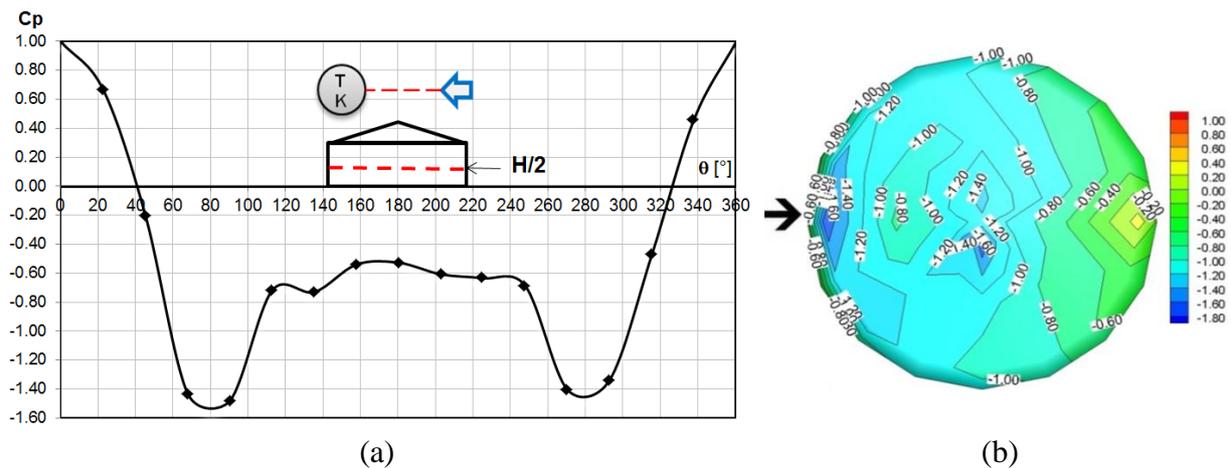


Figura 3. Coeficiente de presión según estudio en túnel de viento: (a) Variación circunferencial altura  $H/2$ , (b) Distribución en el techo.

### 3.2 Variación en altura de la acción del viento

El reglamento CIRSOC 102 (2005) propone una variación en altura de la carga de viento mediante el coeficiente de exposición frente a la carga dinámica ( $K_z$ ) que se describe en la ecuación (1), esta distribución se considera como la primera variación en altura a estudiar y se denomina distribución en altura DH1. Se proponen cuatro variaciones adicionales (DH2 a DH5) para estudiar el efecto de la variación de viento en altura sobre la estabilidad de la cáscara del tanque. Estas variaciones en altura propuestas se identifican a través de un coeficiente de amplificación ( $C_m$ ) por el que se afecta los estados base definidos por la normativa para el cilindro y el techo del tanque.

La distribución DH2 considera una distribución uniforme hasta 5m de altura con el valor de  $K_z$  dado por el reglamento, luego para  $z > 5m$  se tiene en cuenta una carga uniforme considerando como  $C_{m,2}$  el valor dado para  $K_z$  (ecuación 1b) correspondiente a la altura media del cilindro entre 5m y la altura del cilindro (15.75m), resultando  $C_{m,2} = 1.01$ .

La tercera distribución (DH3) considera para  $C_m$  una variación parabólica dada por la siguiente ecuación:

$$C_{m,3} = \sqrt{4 \cdot p \cdot z} \quad (6)$$

donde  $p$  toma el valor de 0.0193, resultando un coeficiente de mayoración para la altura del casco (15.75m) igual al definido por la ecuación (1b), es decir  $C_{m,3} = 1.10$ .

La variación DH4 considera una distribución lineal desde  $z=0$  hasta  $z=5m$  dada por la ecuación (7) y luego uniforme con un coeficiente de amplificación de 1.01.

$$C_{m,4} = \frac{1.01 \cdot z}{5.00} \quad (7)$$

Finalmente, DH5 considera un coeficiente único en toda la altura del tanque que resulta de evaluar la ecuación (1b) a la altura de 15.75m (altura del cilindro), siendo  $C_{m,5}=1.10$ . La Figura 4 muestra las cinco variaciones de la carga de viento en altura y junto a los valores experimentales sirven de base para estudiar la estabilidad estructural del tanque de almacenamiento.

La distribución de viento en el techo indicada en la Figura 2b también se debe amplificar de acuerdo a la altura media de la cubierta (17.18m). Evaluando la ecuación (1b) para la altura media de la cubierta se obtiene un coeficiente de amplificación de 1.12. La Tabla 2 resume el coeficiente de presión en el techo del tanque, de acuerdo a la zonificación indicada en el reglamento y que será la misma en los cinco modelos de variación en altura.

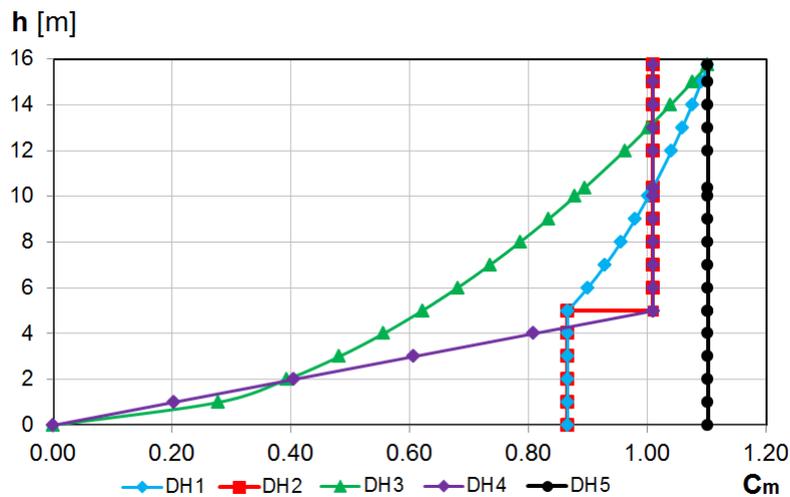


Figura 4. Distribuciones en altura de la carga de viento aplicada al cuerpo del tanque.

	Zona A	Zona B	Zona Amplificada
$C_p$	-0.90	-0.56	-1.35

Tabla 2. Coeficiente de presión externa ( $C_p$ ) en el techo del tanque para la altura media de la cubierta.

La distribución de viento determinada en túnel de viento por Burgos et al. (2014) se puede observar en la Figura 5a. En las Figuras 5b a 5f se pueden ver las cinco variaciones de viento propuestas (DH1 a DH5). En el cuerpo cilíndrico, la variación circunferencial determinada experimentalmente y las previstas por la norma, con las correcciones propuestas en este trabajo, tienen la misma forma con menores succiones en la zona a sotavento. En cambio, en el techo es donde se observan las mayores diferencias por la zonificación propuesta en el reglamento de viento. Considerando que los problemas de pandeo por acción del viento se deben a las presiones positivas sobre el cuerpo cilíndrico del tanque, en la próxima sección se evalúa cuál de todos estos modelos propuestos producen efectos similares sobre la estructura del tanque tomando como referencia los resultados numéricos obtenidos por Burgos et al. (2014) determinados mediante cargas experimentales.

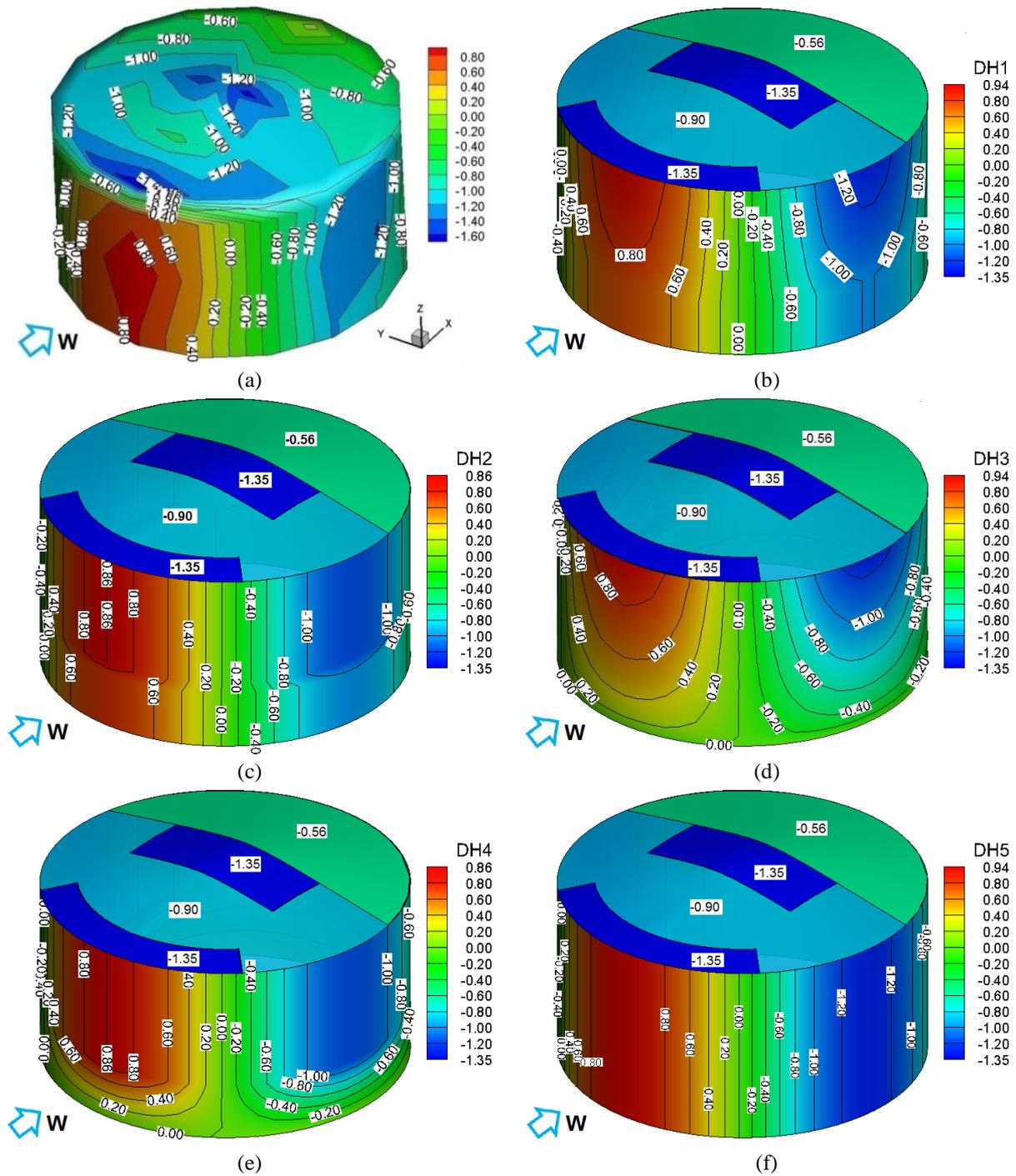


Figura 5. Mapas de la acción del viento: (a) Túnel de viento, (b) DH1, (c) DH2, (d) DH3, (e) DH4, (f) DH5.

#### 4 SIMULACIÓN NUMÉRICA

Un tanque de almacenamiento por su geometría, condiciones de borde o cargas es un sistema estructural complejo que requiere el uso de métodos numéricos para realizar un análisis de estabilidad. En este estudio se realiza el análisis de estabilidad estructural mediante el método de elementos finitos (MEF), utilizando el código de propósitos generales ABAQUS (2006). Los tanques por sus relaciones de aspecto radio/espesor ( $r/t$ ) son considerados como estructuras tipo cáscara de pared delgada. El modelo numérico generado mediante ABAQUS

representa el comportamiento de cáscara por lo que la discretización se realiza con elementos finitos tipo cáscara (Shell). En el cuerpo cilíndrico se asignan elementos tipo S8R5 y en el extremo superior del techo se utilizan elementos triangulares STRI65, ambos elementos son: de orden geométrico cuadrático, de integración reducida y permiten evaluar esfuerzos y deformaciones. Se define el control de mallado utilizando las opciones de técnica de mallado libre y elementos de forma cuadrangular en el cilindro y parte del techo, sobre el extremo superior del techo cónico se asignan elementos triangulares. El modelo considera que la vinculación que existe entre la virola inferior del tanque y la fundación del mismo es completamente rígida y no admite ningún tipo de desplazamiento o giro. Es por ello, que todos los nodos que se ubican en el borde inferior de la primera virola se les asigna la condición de encastre ( $U_x=U_y=U_z=U_{R_x}=U_{R_y}=U_{R_z}=0$ ). El material utilizado en la estructura del tanque es acero tipo F24. Se considera que el mismo tiene un comportamiento elástico lineal e isotrópico, es decir que el material admite solo pequeñas deformaciones elásticas (normalmente menores al 5%) y que dicha característica es válida en cualquier dirección de análisis.

Los parámetros necesarios para caracterizar el material son el módulo de elasticidad ( $E$ ) y el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ), que se suponen con valores de 206MPa y 0.3 respectivamente. Para asignar el peso propio de la cáscara se deben definir la densidad del material ( $7850\text{kg/m}^3$ ), aceleración de la gravedad ( $9.8\text{m/s}^2$ ) y dirección de aplicación de la misma ( $U_y$ ).

La asignación de las diferentes distribuciones de carga se realiza mediante la herramienta que dispone ABAQUS denominada Analytical Field que permite definir una expresión y asignarla a las superficies de carga de interés. En el cuerpo cilíndrico del tanque se aplica la variación circunferencial de la carga dada en la ecuación (3) con las variaciones en altura ( $z$ ) dadas por el coeficiente  $C_m$  según se trate de las distribuciones DH1 a DH5. En el techo se consideran superficies de cargas de acuerdo a la zonificación presentada en la Figura 2b y los valores indicados en la Tabla 2.

El modelo numérico del tanque de almacenamiento sólo considera la cáscara del cuerpo del cilindro y techo, para suplir la estructura interna se asigna al techo del tanque un sobreespesor ( $10t$ ) y se modifica la densidad del material en esta zona para no incrementar el peso propio de la estructura. Para el techo del tanque la densidad del acero es inversamente proporcional al incremento de espesor, por lo que  $\delta = 785.0\text{kg/m}^3$ . El tamaño de la malla fue ajustado a través de un análisis de convergencia sobre el autovalor asociado al primer modo de pandeo. Se observa que con un tamaño dominante del mallado de  $0.452\text{m}$  los autovalores convergen a un valor próximo a  $2.11\text{kN/m}^2$  para la distribución DH1. La Figura 6 muestra el modelo numérico utilizado donde se indican las principales características.

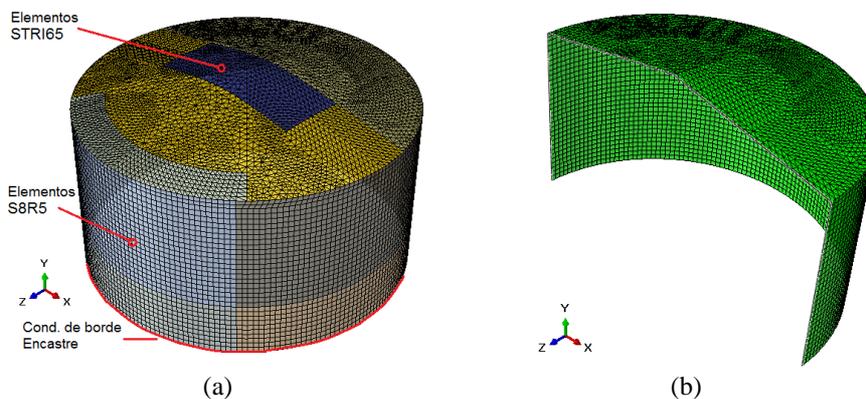


Figura 6. Modelo numérico: (a) Vista 3D, (b) Sección.

### 4.1 Análisis de bifurcación lineal (LBA)

Los tanques de almacenamiento de petróleo son estructuras consideradas como estructuras de pared delgada susceptibles a fallar por pandeo frente acciones exteriores críticas. En este estudio se evalúa la acción de la carga de viento sobre el tanque con propuestas diferentes de variación en altura. El análisis de bifurcación lineal (LBA) mediante la determinación de autovalores y autovectores permite realizar una primera aproximación a las cargas que pueden producir problemas de inestabilidad del equilibrio. Mediante la utilización del programa de elementos finitos (ABAQUS) se calculan los autovalores que representan en nuestro caso las cargas críticas ( $\lambda^c$ ) que producen el pandeo sobre el tanque. En este tipo de estructuras industriales es de importancia conocer la carga que hace fallar la estructura, ya que la pérdida de forma genera inconveniente en la operación de los tanques, sobre todo aquellos que cuentan con techos flotantes interiores.

La Figura 7 presenta formas de modo del tanque de almacenamiento resultante del análisis de bifurcación lineal (LBA), representándose sólo la dirección de mayores desplazamientos (z) coincidentes con la dirección de aplicación de la carga de viento. La Figura 7a muestra la deformada asociada al primer modo de pandeo (M1) para el estado de carga determinado en túnel de viento (TV). En la Figura 7b se grafica la forma de modo (M1) obtenida de la variación de carga (DH1). En ambas figuras, el patrón de deformación es similar y se concentra en la zona directamente expuesta a barlovento y en la zona del casco con menores espesores. El patrón de deformación en la zona directamente expuesta a la acción del viento se mantiene también en modos altos, sólo que la amplitud de la zona afectada aumenta, en la Figura 7c se muestra el modo 5 (M5). En el techo cónico del tanque, no se observan desplazamientos significativos, indicando que las succiones en la cubierta no tienen influencia en la estabilidad del equilibrio del tanque de almacenamiento.

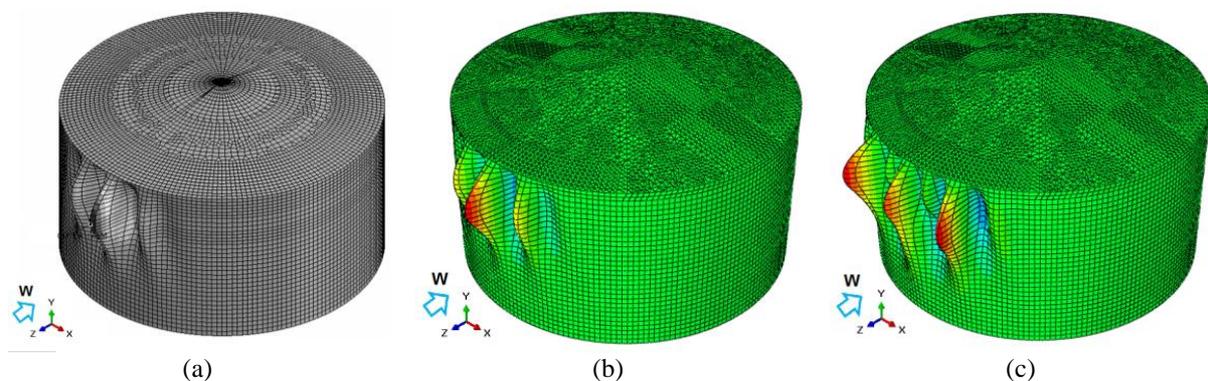


Figura 7. Formas de modo (LBA): (a) TV-M1  $\lambda^c=2.38\text{kN/m}^2$ , (b) DH1-M1  $\lambda^c=2.11\text{kN/m}^2$ , (c) DH1-M5  $\lambda=2.99\text{kN/m}^2$ .

El primer modo de pandeo para las distribuciones DH2 a DH5 resulta similar al presentado en la Figura 7b. La Tabla 3 muestra las cargas críticas ( $\lambda^c$ ) asociadas al primer modo de deformación para las todas las distribuciones analizadas. Todas las cargas críticas obtenidas son próximas a las presentadas por Jaca (2008) para un tanque de igual diámetro pero con una relación de aspecto algo mayor ( $H/D=0.56$ ).

	TV	DH1	DH2	DH3	DH4	DH5
$\lambda^c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	2.38	2.11	2.16	2.30	2.17	1.98
$\lambda^{cDH} / \lambda^{cTV}$		0.87	0.91	0.97	0.91	0.83

Tabla 3. Cargas críticas correspondientes a túnel de viento (TV) y las diferentes variaciones en altura (DH).

Las cargas críticas ( $\lambda^c$ ) obtenidas a partir de las cinco distribuciones de viento resultan conservadoras frente a las cargas críticas obtenidas mediante un estado de carga experimental (TV). Adicionalmente, la distribución de viento cuya carga crítica se aproxima a la carga crítica de referencia ( $2.38\text{kN/m}^2$ ) es la obtenida a partir de DH3 ( $2.30\text{kN/m}^2$ ) que responde a una variación parabólica dada por la ecuación (6). La distribución DH5 es la variación más simple de aplicar en un modelo computacional, pero puede resultar muy conservadora frente al valor de referencia ( $2.38\text{kN/m}^2$ ) ya que plantea una reducción de la resistencia del tanque frente a pandeo del orden del 17%.

#### 4.2 Análisis de no lineal geométrico (GNLA)

Se realiza un análisis no lineal geométrico (GNLA) considerando imperfecciones geométricas en la geometría perfecta con la forma del primer modo crítico. En esta estrategia se evalúa la trayectoria de equilibrio del sistema mediante el algoritmo de avance de Riks (1979). Bushnell (1985) presentó un marco general de análisis para este tipo de estudio.

Como se indica en Burgos et al. (2014), el primer modo crítico incorporado como forma de imperfección genera la mayor reducción de las cargas críticas compatible con las observaciones realizadas en estructuras que han presentado colapso por acción del viento. Mediante GNLA se obtienen trayectorias de equilibrio considerando imperfecciones geométricas con un factor de amplificación ( $\xi$ ) proporcional al menor espesor del casco cilíndrico ( $t=0.00635\text{m}$ ). Se plantearon análisis con imperfecciones proporcionales a 0.25t, 0.50t y 0.75t, para tamaños superiores de imperfección la metodología de análisis entrega una respuesta estructural que no permite identificar la máxima carga resistida por la estructura, por lo tanto se considera como límite de la reducción de la carga por una configuración modificada en exceso por la imperfección.

En la Figura 8 se observan las trayectorias de equilibrio para el estado de carga DH1 para los tres niveles de imperfección. Las curvas representan desplazamientos de nodos localizados en la zona afectada por pandeo, identificados como nodos 16240 y 18701, y representan deformaciones entrantes y salientes a la geometría perfecta del tanque. Todas las curvas obtenidas para la estructura perturbada muestran un comportamiento post-crítico no lineal inestable con disminuciones de la carga máxima con respecto a la carga crítica del análisis lineal. La respuesta es similar para las otras cuatro variaciones en altura.

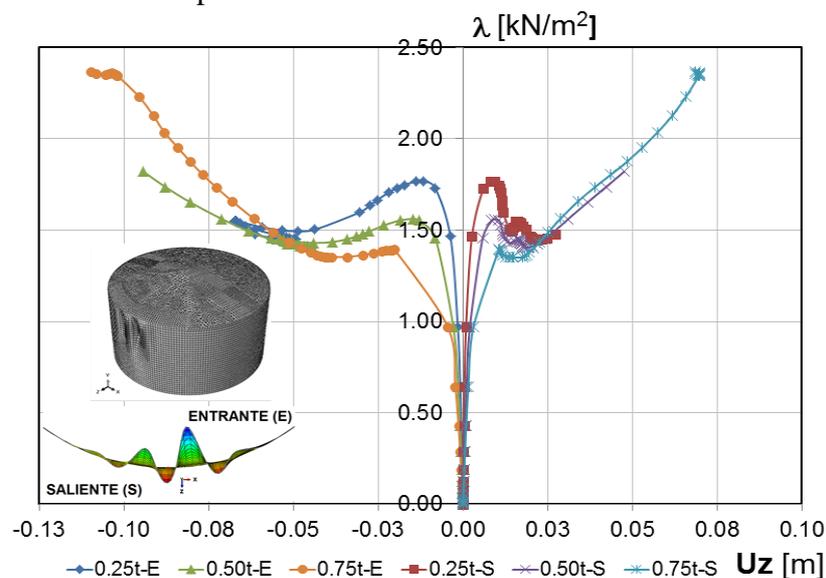


Figura 8. Trayectorias de equilibrio con imperfecciones geométricas para el estado de carga DH1.

La Tabla 4 resume los resultados del análisis no lineal geométrico para los cinco estados de cargas analizados. La máxima reducción de cargas se produce para un tamaño de imperfección de 0.75t, siendo nuevamente la distribución DH5 la más conservadora en la estimación de la máxima carga resistida por la estructura.

	$\xi$	DH1	DH2	DH3	DH4	DH5
$\lambda$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.25t	1.77	1.82	1.92	1.82	1.66
$\lambda$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.50t	1.56	1.59	1.70	1.61	1.47
$\lambda^{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.75t	1.40	1.44	1.52	1.40	1.32

Tabla 4. Cargas máximas correspondientes a las diferentes variaciones en altura (DH).

La Figura 9 muestra la deformación de la estructura del tanque de almacenamiento para el estado de carga DH1 considerando una imperfección de 0.75t. La carga máxima para este estado de deformación es 1.40kN/m<sup>2</sup> y el máximo desplazamiento entrante respecto la geometría perfecta es 0.02m. La Figura 9a muestra una sección circunferencial del tanque donde se observa la magnitud de la zona afectada por la acción del viento.

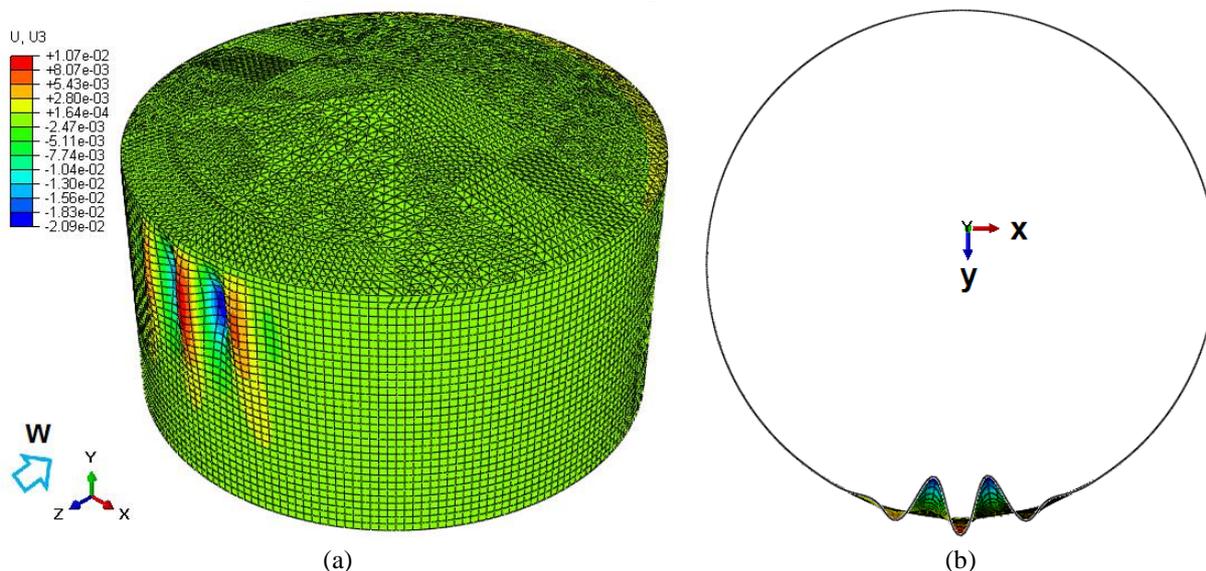


Figura 9. Deformación para el estado de carga DH1: (a) Vista 3D, (b) Sección XZ.

La Figura 10 muestra las trayectorias de equilibrio con imperfecciones proporcionales a 0.75t, es decir correspondientes a las cargas máximas ( $\lambda^{\max}$ ) resistidas por la estructura frente a las cinco variaciones en altura. La magnitud de los desplazamientos es similar para todas las cargas analizadas. En el estudio realizado con cargas experimentales se reporta una carga máxima de 1.49kN/m<sup>2</sup>. En la Tabla 5 se plantea una comparación entre cargas críticas ( $\lambda^c$ ) y máximas ( $\lambda^{\max}$ ) para los resultados de referencia (TV) y las variaciones en altura (DH).

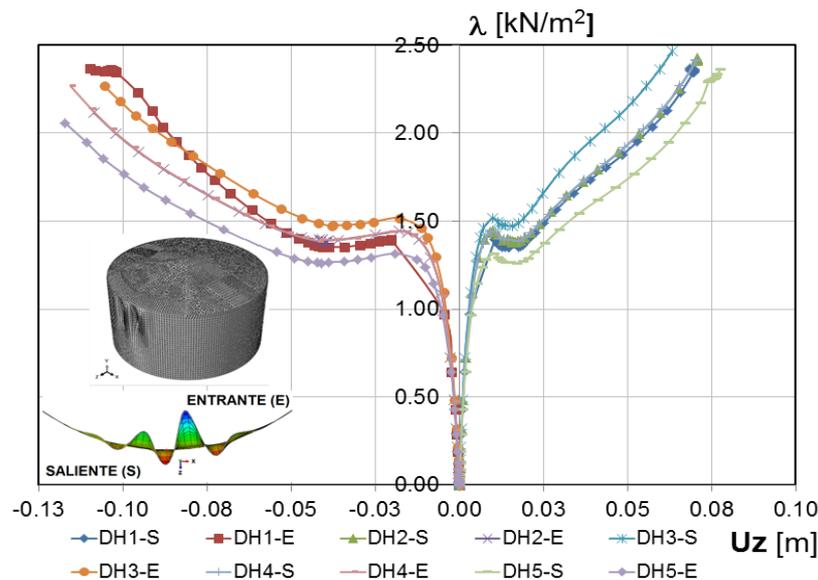


Figura 10. Trayectorias de equilibrio con imperfecciones geométricas para el estado de carga DH1 a DH5.

La reducción de cargas producto del análisis no lineal para las distribuciones DH son del orden del 34% similar a los resultados obtenidos con la distribución del túnel de viento. En cambio, si se toma como parámetro de comparación la carga crítica del análisis experimental ( $\lambda^{cTV}$ ), la reducción alcanza en el caso de DH5 un 45% del valor de referencia. Es decir, que los resultados obtenidos con las distribuciones planteadas por el reglamento CIRCOC 102 (2005) para las cinco variaciones en altura resultan muy conservadoras. Si bien aseguran al diseñador que tome de referencia a esta norma un adecuado comportamiento en servicio del tanque de almacenamiento, no representan una buena estimación del comportamiento real de la estructura.

	TV	DH1	DH2	DH3	DH4	DH5
$\lambda^{m\acute{a}x}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1.49	1.40	1.44	1.52	1.40	1.32
$\lambda^c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	2.38	2.11	2.16	2.30	2.17	1.98
$\lambda^{m\acute{a}x} / \lambda^c$	0.62	0.66	0.67	0.66	0.65	0.67
$\lambda^{m\acute{a}x} / \lambda^{cTV}$		0.59	0.61	0.64	0.59	0.55

Tabla 5. Resultados de análisis LBA-GNLA, correspondientes a túnel de viento (TV) y las diferentes variaciones en altura (DH).

### 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la respuesta estructural de un tanque de almacenamiento de petróleo considerando diferentes variaciones en altura de la carga de viento. Se considera como base del análisis las cargas de viento previstas en el reglamento CIRCOC 102 (2005). Para validar los resultados obtenidos se toma como referencia un estudio similar pero con cargas de viento determinadas en ensayos en túnel de viento. La respuesta estructural se realiza en base a simulaciones numéricas sobre el tanque con cinco variaciones en altura de la carga de viento. Las principales conclusiones del trabajo son:

- Todas las variaciones propuestas en este trabajo muestran resultados conservadores frente a los resultados obtenidos mediante estudios realizados con cargas de viento modeladas experimentalmente.

- Considerar una variación uniforme en altura de la carga de viento resulta fácil de incorporar en un modelo numérico pero puede generar una respuesta muy inferior de cargas de pandeo.
- Las cargas de viento propuestas por el reglamento **CIRSOC 102 (2005)** aseguran al diseñador de un tanque de almacenamiento un buen comportamiento en servicio del tanque de almacenamiento. La variación propuesta en el reglamento (DH1) es una de las menos conservadoras de las evaluadas en este estudio, por lo que para esta relación de esbeltez del tanque (0.52) resulta la más indicada para el diseñador en su práctica profesional.
- Resulta importante modelar la variación en altura de la carga de viento sobre las cargas de pandeo, ya que su simplificación actualmente en uso puede conducir a niveles de error inadecuados para la práctica profesional.

**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 650, *Welded steel tanks for oil storage*, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2010.
- Burgos, C.A., Jaca, R.C., Lassig, J., Godoy, L.A., Wind buckling of tanks with conical roof considering shielding by another tank, *Thin-Walled Structures*, 84: 226–240, 2014.
- Bushnell, D., *Computerized Buckling Analysis of Shells*, Martins Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1985.
- CIRSOC 102, *Acción del viento sobre las construcciones*, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires, 2005.
- Flores F. G., Godoy L. A. Buckling of short tanks due to hurricanes, *Engineering Structures*, 20(8): 752-760, 1998.
- Jaca R. C., *Límites inferiores en inestabilidad del equilibrio de láminas de tanques de pared delgada*, Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, 2008.
- Jaca, R.C., Godoy, L.A., Flores F. G., Croll J.G.A., A reduced stiffness approach for the buckling of open cylindrical tanks under wind loads, *Thin-Walled Structures*, 45: 727-736, 2007.
- MacDonald, P.A., Kwok, K.C.S. & Holmes J.H., Wind loads on circular storage bins, silos and tanks. Point pressure measurements on isolated structures, *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31: 165-188, 1988.
- Portela, G., Godoy, L.A., Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with conical roof, *J. Construction Steel Research*, 61(6): 786-807, 2005a.
- Portela, G., Godoy, L.A., Wind pressures and buckling of aboveground steel tanks with dome roof, *J. Construction Steel Research*, 61(6): 808-824, 2005b.
- Riks E., An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. *International Journal of Solids and Structures*, 15: 529-551, 1979.
- Rotter, J.M., Schmidt, H., *Buckling of Steel Shells: European Design Recommendations*. 5th Ed., European Convention for Const. Steelwork, Mem Martins, Portugal, 2008.
- Sabransky I. J., Melbourne W. H. Design Pressure Distribution on Circular Silos with Conical Roofs, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 26: 65-68, 1987.
- Zhao Y., Lin Y. Buckling of cylindrical open-topped steel tanks under wind load, *Thin-Walled Structures*, 79: 83-94, 2014.