

## EFFECTOS DE GRUPO DEBIDOS A VIENTO SOBRE LA INESTABILIDAD DE TANQUES METÁLICOS CON RIGIDIZADORES

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

<sup>a</sup>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

<sup>b</sup>Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, carlosburgoss@hotmail.com

<sup>c</sup>CONICET y FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina, lgodoy@com.uncor.edu

**Keywords:** cáscaras, efectos de grupo, pandeo, rigidizadores, tanques, viento.

**Abstract.** El efecto de grupo modifica la distribución de presiones debidas a viento sobre un tanque respecto a las correspondientes a un tanque aislado. Trabajos anteriores sobre tanques sin rigidizadores han demostrado que las cargas máximas resistidas se reducen por este efecto, principalmente para obstáculos en la dirección del viento a distancias variables entre 1 y 1.8 diámetros del mayor tanque involucrado. Debido a que hay escasa información disponible sobre este efecto de apantallamiento, si un tanque se diseña con las distribuciones de presiones que corresponden al tanque aislado se puede subestimar la acción del viento y su efecto sobre la inestabilidad del equilibrio. Como aspecto adicional, la presencia de anillos rigidizadores en sentido circunferencial modifica la respuesta estructural del tanque frente a cargas de viento, haciendo que las cargas máximas resistidas sean mayores. En este trabajo se propone analizar la eficiencia de anillos rigidizadores anulares, diseñados con las presiones de viento correspondientes a un tanque aislado sin rigidizar, para resistir las diferencias de presiones generadas por efectos de grupo. Los tanques se modelan usando elementos finitos de cáscara considerando la acción de viento para un tanque aislado y para el mismo tanque con obstrucción de otro ubicado a distancias variables de 1.0, 1.5 y 1.8 veces el diámetro, para vientos con dirección de incidencia variable con respecto al obstáculo. Se realizan análisis de bifurcación del equilibrio lineal (problema de autovalores) y análisis no lineal geométrico considerando imperfecciones geométricas. La respuesta obtenida con las diferentes configuraciones de posición entre los tanques y el diseño del anillo rigidizador, para una distribución de presiones de viento considerando el efecto de grupo, se compara con la obtenida para el tanque aislado. Los resultados permiten evaluar si la rigidización que aporta el anillo es suficiente para restituir la respuesta a condiciones similares a las del tanque aislado.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los tanques de almacenamiento de petróleo y derivados generalmente no se encuentran aislados sino que están dispuestos en baterías con arreglos de diferente tipo y con diferentes espaciamentos. Estos grupos de tanques se construyen próximos a los lugares de extracción, sirviendo de pulmón entre la producción y transporte de los productos del petróleo, o bien en zonas de refinерías. La implantación de nuevas baterías en las proximidades de las zonas de explotación de hidrocarburos o la ampliación de baterías existentes, resulta una actividad frecuente. En general, no hay suficiente información sobre la distribución de presiones de viento ni sobre su efecto en el comportamiento de pandeo.

Algunos trabajos anteriores de investigación sobre el efecto de agrupamiento se refieren a silos que tiene una relación de aspecto altura –diámetro mayor, como los de Macdonald *et. al* (1988, 1990), y que suelen estar dispuestos muy próximos unos de otros. Estos resultados sobre distribución de presiones no son extrapolables ya que los tanques de petróleo presentan un aspecto mas rebajado y suelen estar distribuidos a una mayor separación entre si. Portela y Godoy (2002, 2005, 2007) realizaron un estudio sistemático del efecto de grupo sobre la distribución de presiones en tanques y además, su influencia en la respuesta estructural. En estos trabajos realizaron mediciones de presiones en túnel de viento para grupos de tanques de altura igual y variable obteniendo mapas de presiones sobre el tanque medido, y con esas presiones posteriormente se realizaron estudio de inestabilidad del equilibrio para evaluar las cargas máximas resistidas para estas configuraciones diferentes al tanque aislado.

Si bien se cuenta con algunos estudios para determinado tipo de disposición de tanques, es necesario disponer de mayor información para las diferentes posibles configuraciones sobre presiones de viento, respuesta estructural y formas de reducir los efectos perjudiciales.

Una posible manera de mejorar la respuesta estructural de estas estructuras de pared delgada es mediante la inclusión de anillos rigidizadores. La norma API 650 (2010) establece requerimientos de rigidez mínimos que deben verificar los rigidizadores para tanques aislados.

Una propuesta de momentos de inercia mínimos para el área de los rigidizadores fue presentada por Ansourian (1992) a partir de estudios numéricos bajo presión externa uniforme, resultando valores menores que los recomendados por API 650. Greiner (1998) analizó la inclusión de anillos rigidizadores en silos altos considerando la teoría de semi-membrana y evaluando su efecto sobre los esfuerzos y en el comportamiento de pandeo. Schmidt *et al.* (1998) presentaron un análisis numérico y experimental sobre el comportamiento poscrítico de tanques abiertos con rigidizadores diseñados según diferentes recomendaciones, concluyendo que el comportamiento de pandeo global o local resulta dependiente de la rigidez mínima provista al anillo. Un trabajo de Resinger y Greiner (1982) brinda recomendaciones sobre requisitos de rigidez mínimos para los anillos con el objeto de modificar la respuesta estructural de las cáscaras frente a sollicitaciones de viento.

Este trabajo plantea analizar si la rigidez de los anillos diseñados en base a las características de un tanque aislado puede resultar apta para mejorar la respuesta de tanques en los que el efecto de grupo produce un aumento de presiones y una consecuente reducción de la carga máxima resistida.

En la Sección 2 se presentan resultados de ensayos realizados en túnel de viento y una descripción del túnel de viento para las diferentes configuraciones de tanques estudiadas y en la Sección 3 se dimensiona el anillo rigidizador en base a disposiciones reglamentarias. La Sección 4 muestra el análisis de bifurcación lineal y análisis no lineal geométrico considerando imperfecciones para el prototipo con las cargas de viento medidas, sin tener el anillo rigidizador y con el diseñado en la sección anterior. En la Sección 5 se realizan

comparaciones entre los resultados hallados, a los efectos de analizar la eficiencia del rigidizador considerado.

## 2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 2.1 Modelo de estudio

El tanque estudiado experimentalmente tiene dimensiones que se corresponden con las características medias de los tanques de almacenamiento de grandes dimensiones utilizados en la industria del petróleo, las relaciones de aspecto que vinculan la altura de la cáscara cilíndrica  $H$  con el diámetro  $D$  más usuales oscilan entre 0.4 y 0.7. La envolvente cilíndrica presenta un diámetro de 30.48m y una altura de 15.75m, cuyos espesores, mostrados en la Tabla 1, se calculan en base a la norma API 650 (2010). El tanque fue diseñado con un techo cónico de espesor 1/4" y de acero ASTM A-36.

Virola	Altura del cilindro (m)	Espesor	
		(m)	(")
1	1.50	0.0191	3/4
2	3.00	0.0159	5/8
3	4.50	0.0143	9/16
4	6.00	0.0127	1/2
5	7.50	0.0127	1/2
6	9.00	0.0095	3/8
7	10.50	0.0079	5/16
8	12.00	0.0063	1/4
9	13.50	0.0063	1/4
10	15.00	0.0063	1/4
11	15.75	0.0063	1/4

Tabla 1: Espesores de cáscara cilíndrica.

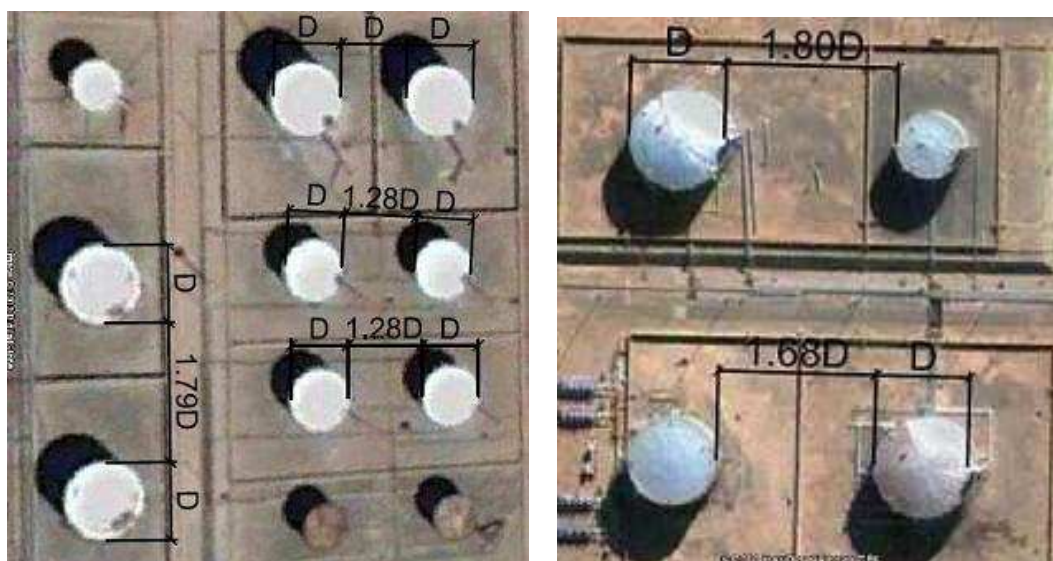


Figura 1: Batería de tanques en dos granjas de tanques localizadas en el Norte de la Patagonia.

Para la definición del distanciamiento entre los tanques en estudio se realizó un relevamiento en base a las imágenes satelitales de establecimientos en la zona norte de la

Patagonia. Se pudo observar que las separaciones entre tanques varían entre una vez el diámetro (1.0 D) a 1.8 veces el diámetro (1.8 D) y que en general los tanques están dispuestos de a pares, aunque en el conjunto existan más tanques, como se muestra en la Figura 1. De esta manera en los ensayos experimentales se modelan dos tanques donde uno de ellos es aquel sobre el que se realizan las mediciones y el otro solamente realiza el apantallamiento, estando ubicado a distancias de 1.0D, 1.5D y 1.8D.

## 2.2 Modelo experimental

Los ensayos en túnel de viento se realizaron en el Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (LaCLyFA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. El túnel de viento utilizado reproduce la Capa Límite Atmosférica, es de circuito cerrado y del tipo denominado de Capa Límite, con una sección de prueba de 7.50 m de largo, 1.40 m de ancho y 1.0 m de altura. El aire es impulsado por una hélice de seis palas accionada por un motor de corriente continua de 50 HP. Dicho motor posee un sistema de control de velocidad que permite variar la misma desde el reposo hasta un máximo de 20 m/s (medida al centro de la sección transversal). El túnel permite reproducir las distribuciones de velocidades medias con la altura correspondientes a las leyes de la potencia y logarítmica, según convenga, y cuenta con un conjunto de paralelepípedos dispuestos en el suelo del túnel con el propósito de simular la rugosidad de la realidad. El equipamiento del túnel está compuesto por un sistema NetScanner de sensores electrónicos de presiones de 128 canales en unidades de presión Psi, una computadora portable con *display* destinada a la adquisición y procesamiento de datos experimentales y un anemómetro de hilo caliente portátil con brazo telescópico para registrar la velocidad y temperatura del flujo de aire.

La característica geométrica relevante del túnel de viento es la dimensión de la sección de prueba, cuya área es de 1.4 m<sup>2</sup>. El porcentaje de bloqueo máximo adoptado en el túnel de viento es de 5%, valor recomendado por la norma ASCE 7 (1999). El modelo se realiza con un tubo de PVC de  $\phi 200$ , de esta manera la dimensión dominante del modelo es el diámetro del tanque. La relación entre el diámetro del tanque a estudiar (prototipo) y el modelo experimental determina el coeficiente de proporcionalidad lineal entre el modelo y el prototipo  $L_r = D_{\text{prototipo}}/D_{\text{modelo}} = 152.4$ . Este coeficiente permite hallar las restantes dimensiones del modelo como altura del cilindro ( $H'$ ) y altura del techo ( $h'$ ). En la Tabla 2 se muestran las dimensiones características del prototipo y del modelo. El porcentaje de bloqueo dado por la relación entre el área de los dos modelos y el área de la sección transversal del túnel es de 3.22 %, resultando menor que el porcentaje de bloqueo permitido.

Prototipo			Modelo		
Diámetro D (m)	Altura cilindro H(m)	Altura techo h (m)	Diámetro D'(cm)	Altura cilindro H'(cm)	Altura techo h'(cm)
30.48	15.75	2.86	20	10.33	1.88

Tabla 2: Dimensiones de prototipo y modelo.

Las características del fluido se pueden evaluar con el Número del Reynolds, dado por la Ecuación (1)

$$R_e = \frac{\rho V D'}{\mu} \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $V$  es la velocidad del fluido,  $D'$  es el diámetro del modelo y  $\mu$  es la viscosidad absoluta del aire. El túnel utilizado permite desarrollar velocidades de hasta

12.7 m/s arrojando  $Re = 1.7 \times 10^5$ , con buena correlación con otros investigadores (Portela y Godoy, 2005). Durante los ensayos se eligió como altura de referencia 14.46m (94,9 mm en el túnel), próxima al borde superior del cilindro del modelo, de manera similar a MacDonald *et al.* (1988, 1990), para determinar la velocidad de escurrimiento del fluido y hallar los coeficientes de presión correspondientes. El coeficiente de presión  $C_p$  se determina a través de la ecuación

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} \quad (2)$$

donde  $\rho_\infty$  es la densidad del flujo sin perturbar,  $V_\infty$  es la velocidad del flujo y  $(p - p_\infty)$  es la diferencia de presión entre la presión existente en el modelo y la que existe en el flujo sin perturbar. El sistema de medición utilizado registra directamente el término  $(p - p_\infty)$  en unidades de presión con una frecuencia de adquisición de datos de 3,5 Hz. La densidad del flujo sin perturbar aguas arriba del modelo es de  $1.22 \text{ kg/m}^3$ , correspondiente a la ciudad de La Plata donde se realizó el ensayo.

La Figura 2 muestra una vista interior del túnel de viento durante la realización del ensayo y un esquema de las posiciones relativas entre el modelo donde se tomaron las mediciones de presión y el modelo que representa el apantallamiento. Ambos tanques son de iguales dimensiones y en el modelo a ensayar se dispusieron un total de 97 tomas de presión igualmente espaciadas, cada  $22.5^\circ$ , distribuidas en tres niveles de tomas de presión en el cilindro, tres niveles de presión en el techo y una toma individual en la parte superior del techo cónico. Durante todo el ensayo se mantuvo el modelo en la misma posición, con el objeto de obtener mediciones de presión en toda la superficie del modelo, desplazando solamente el tanque de bloqueo. Se tomaron mediciones de presión para separaciones de 1.0D, 1.5D y 1.8D y dirección variable de la acción del viento, considerando cinco direcciones de incidencia para cada separación. Las direcciones de incidencia analizadas son los siguientes:

- Dirección  $D_1$ : Tanque de apantallamiento ubicado en la recta de acción del flujo de aire.
- Dirección  $D_2, D_3, D_4$  y  $D_5$ : Tanque de apantallamiento desplazado angularmente  $22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente, en sentido antihorario con respecto de la recta de acción del flujo de aire.

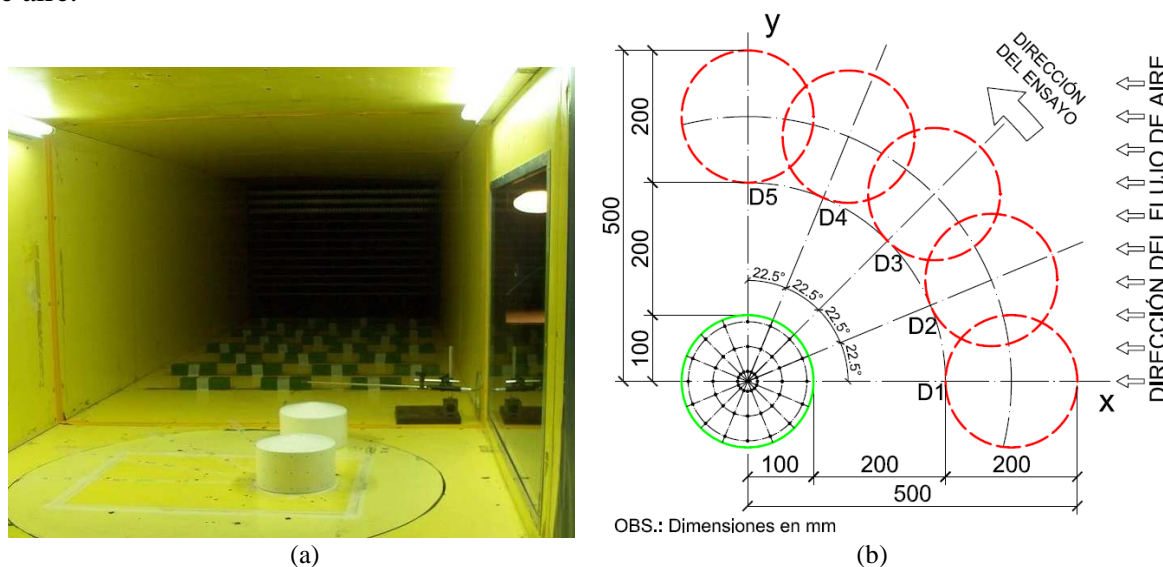


Figura 2: Ensayo de tanque con apantallamiento, (a) Vista interior del túnel de viento, (b) Esquema de diferentes direcciones de ensayo.

## 2.3 Distribución de coeficientes de presión

Las Figuras 3, 4 y 5 presentan los resultados de los ensayos correspondientes a una separación de 1.0D entre los tanques para las direcciones de viento 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente, y también los valores medidos para el tanque aislado. Los coeficientes de presión positivos indican presión y los negativos indican succión.

La Figura 3 presenta la distribución de los coeficientes de presión en el desarrollo circunferencial correspondientes a la toma ubicada en el nivel 3 a una altura sobre el cilindro de 9.33cm, tanto para el tanque aislado como para todas las direcciones de incidencia medidas. La distribución de presiones en el techo es mostrada en la Figura 4, a lo largo de un corte por el meridiano de incidencia del viento, y en la Figura 5 se exhiben las mediciones en los meridianos de la cáscara cilíndrica ubicados a barlovento y en un plano perpendicular a la dirección de incidencia del viento, del lado donde se encuentra el tanque que obstaculiza el flujo y en dirección opuesta. Un mayor detalle de la distribución de presiones medidas se presenta en Burgos *et al.* (2012).

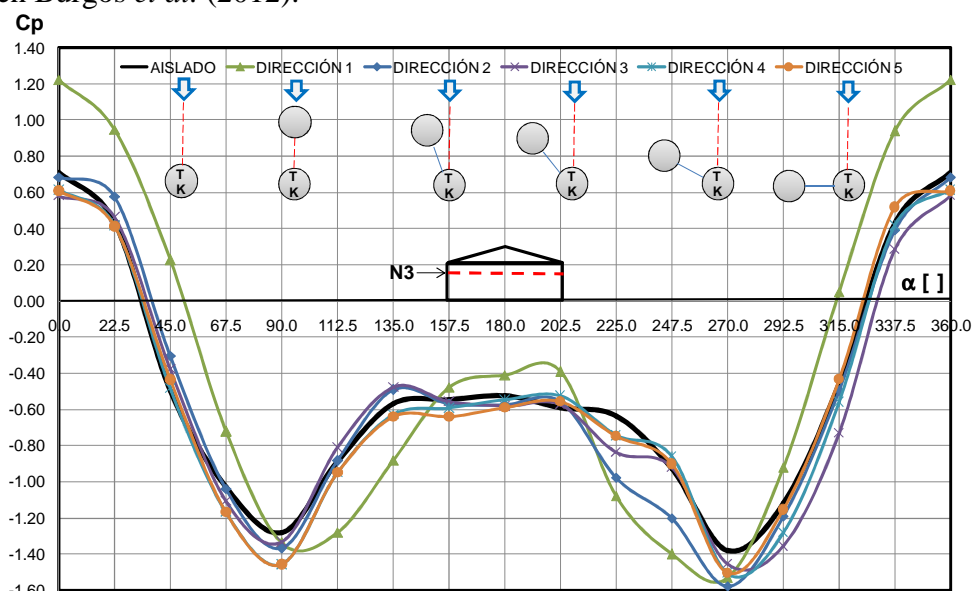


Figura 3: Coeficientes de presión sobre la envolvente cilíndrica, Nivel 3 ( $h=9.33\text{cm}$ ).

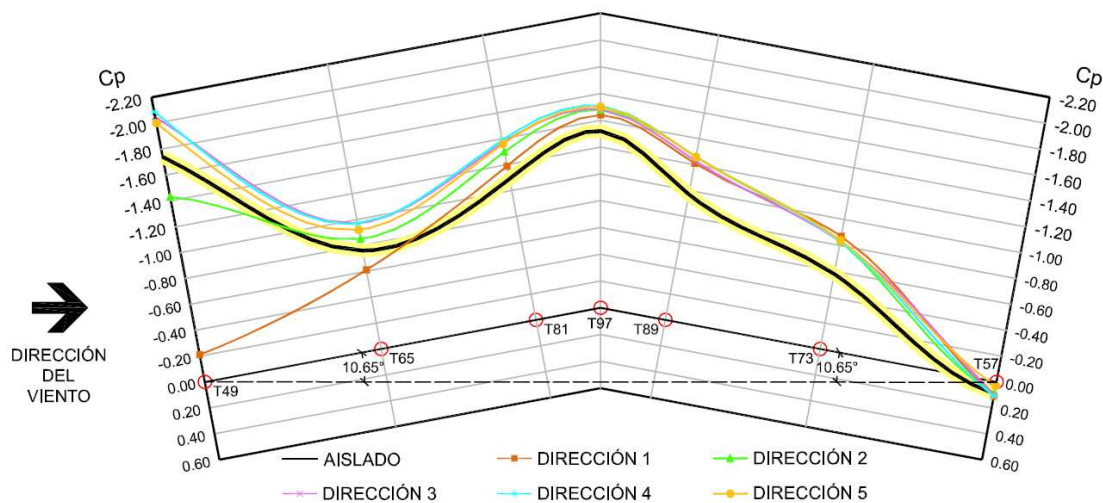


Figura 4: Coeficientes de presión en el techo.

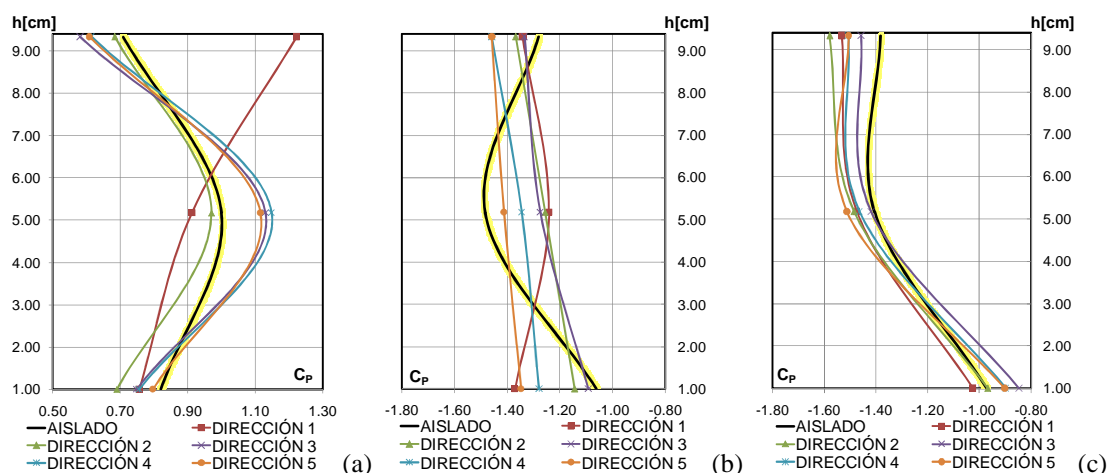


Figura 5: Coeficientes de presión en la altura del cilindro, (a) A barlovento, (b) Perpendicular al viento enfrentando al obstáculo, (c) Perpendicular al viento, lado libre.

Se puede observar que la distribución correspondiente a la dirección de incidencia 1, con el obstáculo en la misma dirección del viento, presenta los mayores cambios con respecto al tanque aislado, tanto en valores como en las formas de la distribución de presiones. Sobre el cilindro, las mayores presiones a barlovento se presentan en la zona más próxima a la unión entre el cilindro y el techo en la dirección 1 y tiende a ser similar al tanque aislado en las otras direcciones pero con mayores valores (Figura 3 para  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  y Figura 5(a)), desplazándose hacia la zona media del cilindro. En la zona a sotavento, los valores son similares al tanque aislado salvo para la dirección 1 donde las succiones son menores. En el techo se producen mayormente succiones, apareciendo compresiones de bajo valor en una zona muy reducida a sotavento, los mayores valores de succión se presentan en la zona de ingreso del fluido donde el flujo se eleva en la unión entre el cilindro y el cono del techo.

Los resultados para mayores separaciones entre tanques (1.5D y 1.8D) muestran formas de distribución de presiones sobre el cilindro y el techo similares a las halladas para la distancia 1.0D pero con menores valores de compresión y succión. En la Figura 6 se observa la distribución circunferencial de los coeficientes para el Nivel 3, próximo al techo, para la dirección de incidencia 1 en las distancias 1.5D y 1.8D entre los tanques analizados.

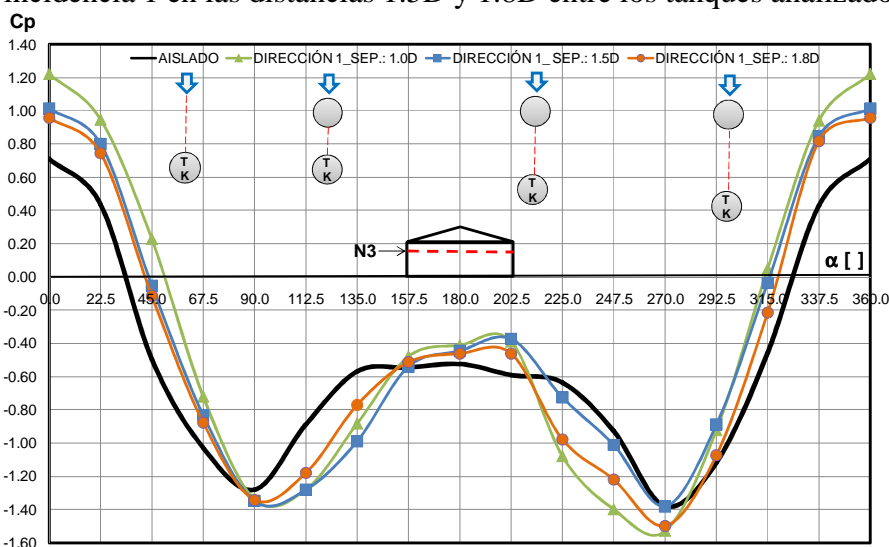


Figura 6: Coeficientes de presión sobre la envolvente cilíndrica, Nivel 3 (h=9.33cm).

En todos los casos estudiados se observa que las presiones son mayores que las correspondientes al tanque aislado, por lo menos un 25% mayor en succiones y más de un 15% en compresiones. Como en el caso de tanques separados una vez el diámetro, en la zona a barlovento, las mayores compresiones se obtienen próximas al techo asociado con una elevación del flujo por la presencia del tanque que produce apantallamiento. El sector angular donde se presentan compresiones sufre un incremento, con viento incidiendo en todas las direcciones y para las diferentes separaciones. También se manifiesta un aumento de las máximas succiones en la dirección perpendicular el flujo y succiones en la zona a sotavento algo menores a lo medido en el tanque aislado.

### 3 CÁLCULO DE ANILLO RIGIDIZADOR

Se incluyen anillos rigidizadores en tanques de almacenamiento para mantener la forma cilíndrica próxima a la estructura perfecta, evitando la ovalización o abolladuras por la acción de viento. En general se disponen en la parte superior de la envolvente, preferentemente en el exterior del tanque. En los códigos de diseño hay pocas reglas para el dimensionamiento de los anillos. 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 (3)

$$Z = \frac{D^2 H_2}{17} \quad (3)$$

donde  $D$  es el diámetro del tanque y  $H_2$  la distancia entre el anillo rigidizador y el borde superior del cilindro. 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 162 km/h correspondiente a la localidad de Rincón de los Sauces ubicada en el Norte de la Patagonia.

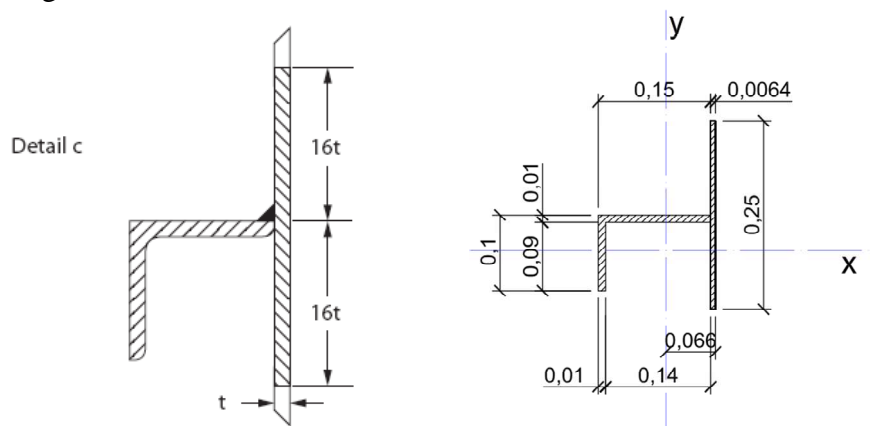


Figura 7: Anillo rigidizador, (a) Detalle c indicado en API 650, (b) Anillo para tanque en estudio, en [m].

Estas vigas rigidizadoras se construyen soldando secciones en ángulo formadas por chapas de espesor mínimo de 6mm. API 650 sugiere un conjunto de secciones posibles y a través de una tabla provee dimensiones para cumplir con el modulo resistente mínimo obtenido con la Ecuación (3). Para el tanque en estudio se decidió colocar el anillo rigidizador a una altura de tres cuartos de la altura total de la envolvente cilíndrica desde el fondo del tanque. Esto se corresponde con la zona de mayores presiones de viento y deformaciones observadas en las formas de modo y deformadas en el comportamiento poscrítico. De esta manera  $H_2$  resulta



3.94m y  $Z = 156.43\text{cm}^3$ , la norma incorpora en la evaluación del módulo resistente una longitud de 16t hacia arriba y abajo del rigidizador. En la Figura 7 se observa el detalle del rigidizador indicado en la norma y las dimensiones definitivas consideradas en este caso.

#### 4 ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE PANDEO

Se modela el tanque prototipo con las características geométricas indicadas en la Sección 2 usando el código de elementos finitos de propósitos generales ABAQUS (2006), con elementos de cáscara cuadráticos rectangulares de 8 nodos (S8R5) y triangulares de 6 nodos (STRI65), con cinco grados de libertad por nodo. El tanque se considera empotrado en la base y con techo cónico para el cual se considera un espesor mayor ( $t = 19\text{mm}$ ) para representar la estructura interior de vigas rigidizadoras. El material usado es acero, cuyas propiedades mecánicas son módulo de elasticidad  $E = 2.11 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$  y módulo de Poisson  $\mu = 0.3$ . Se consideran las cargas de viento medidas en túnel de viento discretizadas en altura tomando el valor de cada nivel. Sobre el modelo se consideraron presiones evaluadas en base a las características del norte de la Patagonia (en particular, la ciudad de Rincón de los Sauces), ya que el relevamiento de separaciones a considerar en el estudio se realizó entre locaciones de esa región. Por esta razón los parámetros de carga obtenidos en el análisis de pandeo son relativos a esas presiones y expresados en  $\text{kN/m}^2$ . La correlación entre los valores de los parámetros de carga y presiones sobre el tanque se logra afectándolos con un factor de 0.84, correspondiente al valor del coeficiente de presión unitario de las mediciones en túnel de viento para tanque aislado. El estudio comprende la evaluación de cargas críticas y formas de modo asociadas mediante bifurcación lineal 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 por el método de Riks (1972, 1979) para obtener una mejor evaluación de la respuesta de la estructura, exhibiendo el comportamiento poscrítico.

##### 4.1 Tanque sin rigidizador

La Tabla 3 muestra las cargas críticas para el primer autovalor para tanque aislado, tanques separados 1.0D con las cinco direcciones de viento estudiadas y las correspondientes a la dirección 1 con separaciones 1.5D y 1.8D, que son las que producen cambios más significativos en las cargas. La Figura 8 presenta el primer modo crítico para tanques separados 1.0D en la dirección 1, el patrón de deformaciones es similar al del tanque aislado con la diferencia que el punto con mayor deformación se presenta a una mayor altura. Esto es consistente con lo observado en el análisis fluido-dinámico que determinó un aumento de la carga y un desplazamiento hacia la zona próxima al techo.

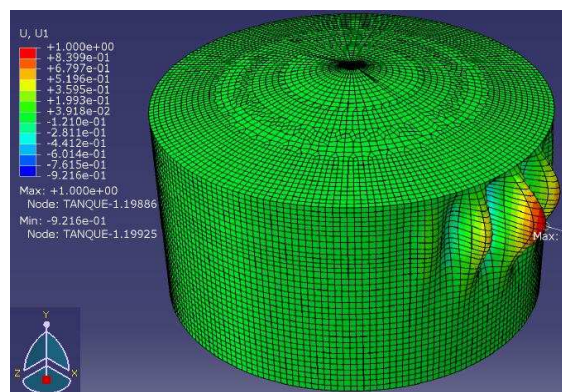


Figura 8: Bifurcación lineal, primer modo 1.0D-Dirección D1.

Las deformaciones asociadas a la condición de tanque apantallado a distancia 1.0D y dirección de incidencia 2 a 5 o para separaciones 1.5D y 1.8D son semejantes también, variando solamente el nodo que manifiesta la máxima deformación relativa en la zona a barlovento. En todos los casos, las cargas críticas son menores a la de tanque aislado ( $\lambda^c = 2.82 \text{ kN/m}^2$ ) y la mayor reducción se presenta para la dirección de incidencia 1 y a una distancia de 1.0D con  $\lambda^c = 1.95 \text{ kN/m}^2$  con un factor de reducción de 0.68.

	Aislado	Tanques a distancia 1.0D					Distanci a 1.5D	Distancia 1.8D
		D1	D2	D3	D4	D5	D1	D1
$\lambda^c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	2.82	1.95	2.72	2.72	2.65	2.7	2.24	2.29
$\lambda^{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1.76	1.20	1.61	1.81	1.81	1.70	1.43	1.48
$\lambda^{\max} / \lambda^c$	0.62	0.61	0.59	0.66	0.68	0.63	0.64	0.65
$\lambda^{\max} / \lambda^{\max}_{\text{aislado}}$		<b>0.68</b>	0.91	1.03	1.03	0.96	<b>0.81</b>	<b>0.84</b>

Tabla 3. Cargas críticas y máximas y factores de reducción. Tanque no rigidizado.

Mediante un análisis no lineal por el método de Riks considerando imperfecciones (identificado como GNIA en Rotter y Schmidt 2008) en la geometría perfecta con la forma del primer modo crítico, se obtiene la trayectoria de equilibrio considerando una magnitud de imperfección proporcional al espesor de la última virola del tanque,  $\xi = 0.5t$ ,  $\xi = 0.75t$  y  $\xi = 1.0t$ , en cada uno de los casos analizados.

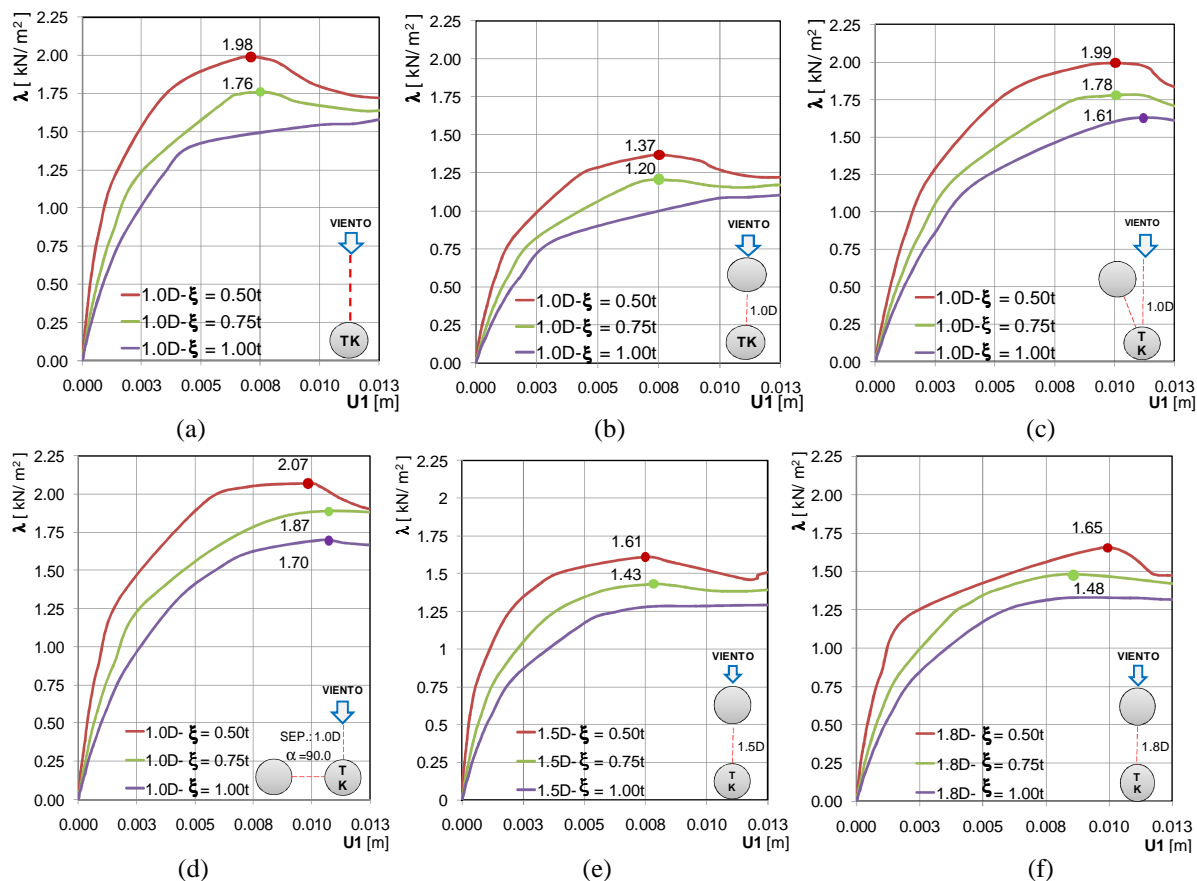


Figura 9: Trayectorias de equilibrio (GNIA), Tanque sin rigidizador, (a) Aislado, (b) Separación 1.0D y D1, (c) Separación 1.0D y D2, (d) Separación 1.0D y D5, (e) Separación 1.5D y D1, (f) Separación 1.8D y D1.

En la Figura 9 se observan las trayectorias de equilibrio obtenidas para los casos analizados tomando como referencia el nodo con mayor desplazamiento en el modo crítico. Las curvas obtenidas para la estructura perturbada muestran un comportamiento poscrítico no lineal inestable con disminuciones de la carga máxima con respecto a la carga crítica del análisis lineal, la respuesta es similar en todos los casos siendo los más desfavorables aquellos en los que el bloqueo del tanque se presenta en la dirección de incidencia del viento. La curva que resulta creciente es considerada como límite en la reducción de la carga, en la cual la respuesta es diferente debido a una configuración geométrica modificada en exceso por la imperfección. La Figura 10 muestra que la configuración correspondiente a la dirección de incidencia D1 es más sensible a imperfecciones que cualquiera de las otras, que tienen una respuesta similar a la del tanque aislado

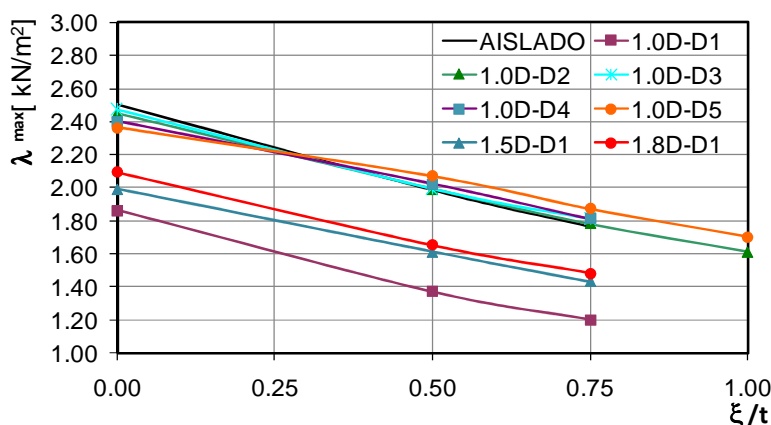


Figura 10: Sensibilidad ante imperfecciones en la geometría. Tanque sin rigidizador.

La Tabla 3 también muestra los valores de cargas máximas para las diferentes alternativas estudiadas. Se analiza la influencia de las imperfecciones en la disminución de las cargas resistidas para la distribución de presiones medidas en los ensayos mediante la evaluación del factor de reducción a través de la relación entre la carga máxima y la carga crítica. Al vincular la carga máxima para cada configuración con respecto a la hallada para el tanque aislado, se obtiene la reducción adicional en la capacidad de carga correspondiente a no tener en cuenta la influencia del apantallamiento producido por el tanque de bloqueo. Nuevamente se observa que la configuración para viento de incidencia D1 es la más desfavorable.

## 4.2 Tanque con rigidizador

En el mismo tanque estudiado en la Sección 4.1 se incorpora del anillo rigidizador calculado en la Sección 3 en base a la norma API 650, ubicado a una distancia de un cuarto de la altura total de la envolvente cilíndrica desde el borde superior del casco del tanque. Para la simulación numérica fue necesario redefinir la malla de elementos finitos debido a las reducidas dimensiones del rigidizador con respecto al resto de las dimensiones del tanque. La Figura 11 muestra un detalle del modelo del tanque con la incorporación del rigidizador. Se observa una gran cantidad de elementos en la zona del rigidizador y la transición hacia la malla más regular presente en el resto del modelo.

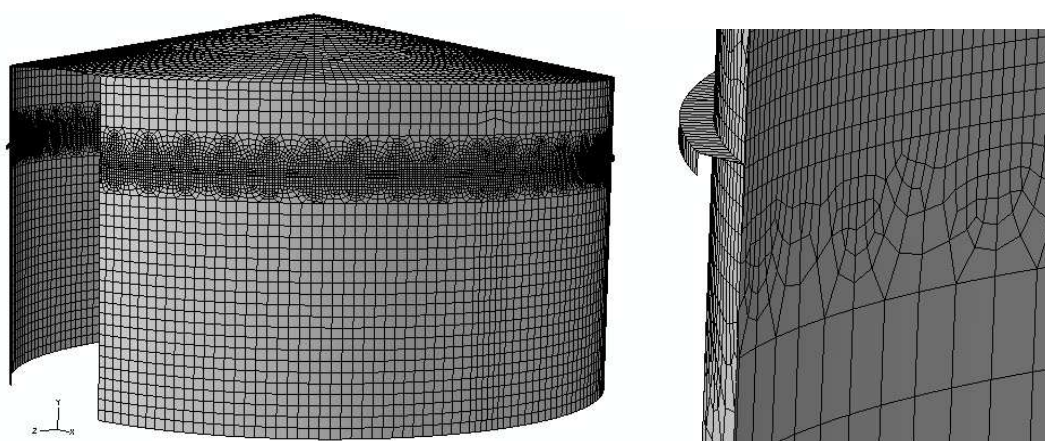


Figura 11: Tanque con rigidizador.

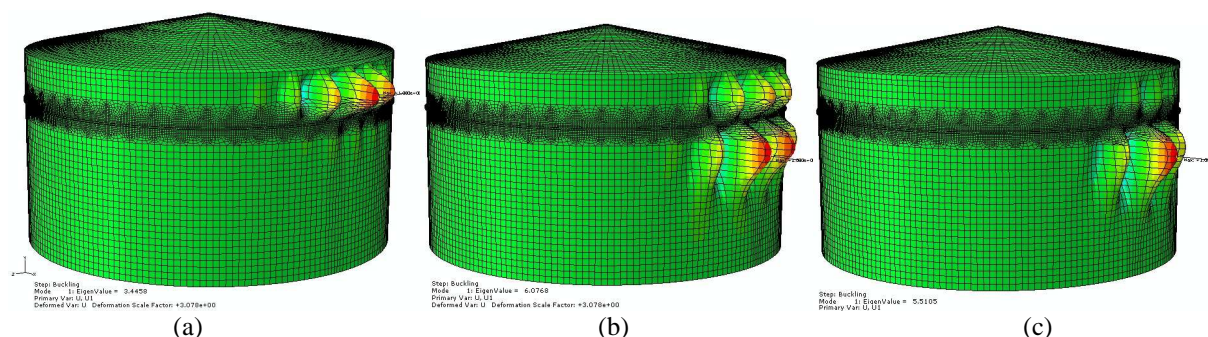


Figura 12: Forma de primer modo crítico para tanque rigidizado, Distancia entre tanques 1.0D: (a) D1,  $\lambda^C = 3.44 \text{ kN/m}^2$ , (b) D2,  $\lambda^C = 6.08 \text{ kN/m}^2$ , (c) D5,  $\lambda^C = 5.51 \text{ kN/m}^2$ .

La Figura 12 muestra las formas de modo obtenidas para una separación entre los tanques de 1.0 D y direcciones D1, D2 y D5. Para distancias mayores entre los tanques (1.5D y 1.8D) en la dirección 1, las formas de modo son similares a la obtenida para separación 1D (Figura 12-a) mientras que para las direcciones D3 y D4 las deformadas son del tipo de la obtenida para D5 (Figura 12-c). Se puede observar que las formas de modo se modifican con respecto a la obtenida para el tanque sin rigidizador (Figura 8) y que las deformaciones, de bajo valor en la zona del rigidizador, presentan sus mayores valores en las zonas asociadas a las mayores presiones de viento. Es decir, próximas al techo en la dirección D1, y se desplazan hacia abajo para las otras direcciones D2 a D5, como se puede ver en la distribución de presiones a barlovento en la Figura 5(a). Las cargas de viento usadas son las correspondientes a los ensayos en túnel de viento, iguales a los reportadas y usadas en la sección anterior.

	Aislado	Tanques a distancia 1.0D					Distancia 1.5D	Distancia 1.8D
		D1	D2	D3	D4	D5		
$\lambda^C$ [kN/m <sup>2</sup> ] Sin rigidizador	2.82	1.95	2.72	2.72	2.65	2.7	2.24	2.29
$\lambda^C$ [kN/m <sup>2</sup> ] Con rigidizador	6.09	3.44	6.08	5.45	5.3	5.51	4.13	4.35

Tabla 4: Cargas críticas correspondientes al primer modo para tanque sin y con rigidizador.

La Tabla 4 presenta las cargas críticas obtenidas para el tanque con rigidizador y se agregan las del tanque sin rigidizador a los efectos de su comparación. Se puede observar un

importante aumento de las cargas críticas por la presencia del anillo.

Los resultados del análisis no lineal geométrico con imperfecciones (GNIA) se muestran en la Figura 13, para los tanques separados un diámetro y en la Figura 14 para las separaciones de 1.5D y 1.8D para dirección de incidencia 1. Las imperfecciones iniciales tienen la forma del primer modo crítico con amplitudes variables entre  $\xi = 0.1t$  y  $\xi = 0.5t$ , según el caso analizado.

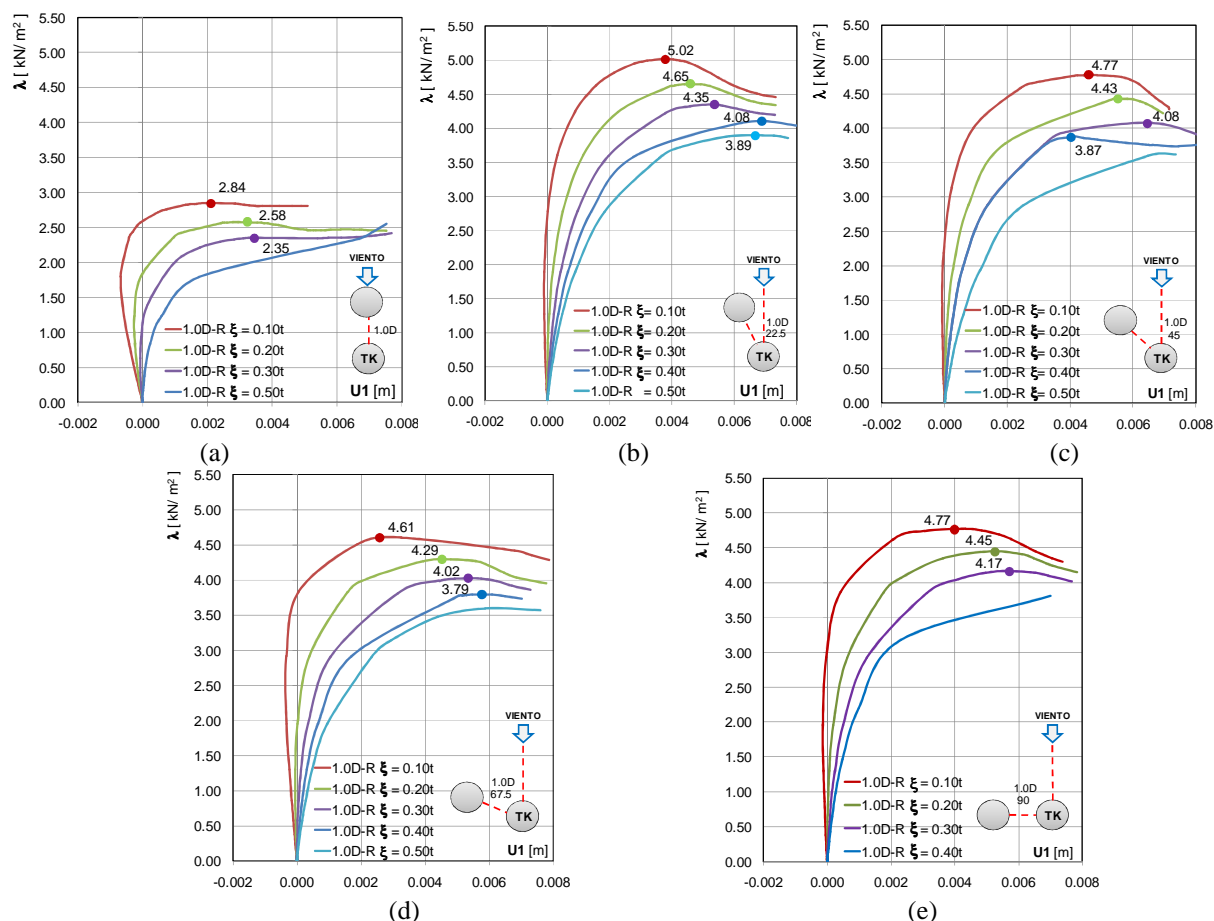


Figura 13: Trayectorias de equilibrio para el tanque con rigidizador (GNIA), Separación 1.0D: (a) Dirección D1, (b) Dirección D2, (c) Dirección D3, (d) Dirección D4, (e) Dirección D5.

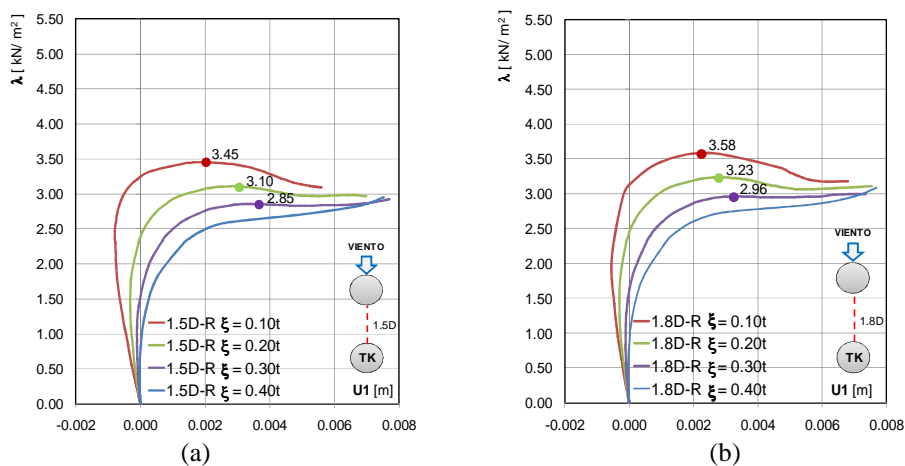


Figura 14: Trayectorias de equilibrio para el tanque con rigidizador (GNIA), Dirección D1: (a) Separación 1.5D, (b) Separación 1.8D.

Se puede observar que la magnitud de las imperfecciones necesaria para modificar la respuesta de la estructura es menor que en el caso del tanque que no posee rigidizador. En todos los casos el comportamiento es similar con reducciones del orden del 13% a 36%, siendo la dirección D2 la que mayor reducción experimenta con respecto a su carga crítica.

	Tanques a distancia 1.0D					Distancia 1.5D	Distancia 1.8D
	D1	D2	D3	D4	D5	D1	D1
$\lambda^c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3.44	6.08	5.45	5.3	5.51	4.13	4.35
$\lambda^{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	2.35	3.89	3.87	3.79	4.17	2.85	2.96
$\lambda^{\max} / \lambda^c$	0.68	0.64	0.71	0.71	0.76	0.68	0.68

Tabla 5: Cargas críticas y máximas y factores de reducción. Tanque rigidizado.

En la Tabla 5 se presentan las cargas máximas que resiste la estructura rigidizada para las diferentes configuraciones analizadas. La existencia del obstáculo alineado con la dirección de incidencia del viento genera un comportamiento similar de la estructura con las mayores reducciones de la carga a la que se presenta una respuesta inestable, siendo menor la carga resistida para la posición relativa entre los tanques más cercana (1.0D-D1). La Figura 15 muestra el análisis de sensibilidad ante imperfecciones relacionado con la respuesta no lineal de la estructura. Se puede observar que la estructura rigidizada tiene alta sensibilidad a las imperfecciones ya que con muy bajas amplitudes de imperfección se presenta el cambio de comportamiento que permite definir la carga máxima resistida por la estructura.

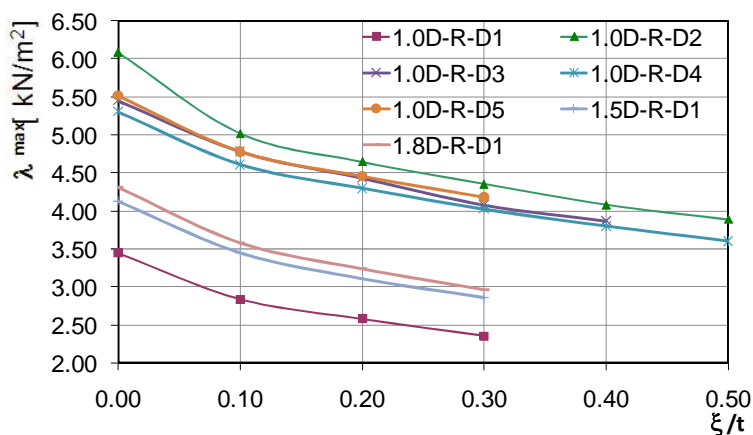


Figura 15: Sensibilidad ante imperfecciones en la geometría para tanque rigidizado.

## 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A los efectos de evaluar la respuesta del tanque al cual se le incorpora el anillo rigidizador, en la Tabla 6 se muestran las cargas máximas resistidas por el tanque en ambas situaciones, con y sin rigidizador, para todas las configuraciones estudiadas. Como era esperado se produce un aumento de las cargas máximas asociado al rigidizador, siendo en todos los casos del orden del doble o más. Al efectuar la comparación con respecto al tanque aislado calculado con presiones de viento que no tiene en cuenta las sobrepresiones por efecto de grupo ( $\lambda^{\max}_{\text{aislado}} = 1.76$  kN/m<sup>2</sup>), también se observa un incremento de 40% a 60% en los casos de menor aumento, para apantallamiento en la dirección de incidencia del viento, y más del doble para las otras direcciones.

		Tanques a distancia 1.0D					Distancia 1.5D	Distancia a 1.8D
		D1	D2	D3	D4	D5	D1	D1
$\lambda^{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Tanque sin rigidizar	1.20	1.61	1.81	1.81	1.70	1.43	1.48
	Tanque rigidizado	2.35	3.89	3.87	3.79	4.17	2.85	2.96
$\lambda^{\max}_{\text{rigid.}} / \lambda^{\max}_{\text{sin rigid}}$		1.95	2.41	2.13	2.09	2.45	1.99	2.0
$\lambda^{\max}_{\text{rigid.}} / \lambda^{\max}_{\text{aislado}}$		<b>1.42</b>	2.21	2.20	2.15	3.39	<b>1.62</b>	<b>1.68</b>

Tabla 6: Cargas máximas para el tanque con y sin rigidizador y factores de reducción.

También interesa considerar los niveles de desplazamientos, tanto para las formas de modo crítico como para las obtenidas con carga máxima. La Figura 16 muestra las deformadas superpuestas para la configuración más desfavorable (dirección D1 y separación 1.0D): en la Figura 16(a), que presenta las formas del primer modo crítico, se puede observar el cambio en la forma global por la presencia del rigidizador. Resinger y Greiner (1982) plantearon que el anillo debe tener una rigidez adecuada para modificar cualitativamente la forma de pandeo, de manera similar a lo mostrado en dicha figura. En dicho trabajo las cargas de viento son representadas por presión externa uniforme equivalente y se plantea que la inercia del rigidizador debe ser tal que permita pasar de una forma simétrica en el meridiano a una antimétrica con un cambio de curvatura como el observado en este caso. La Figura 16(b) muestra la diferente magnitud de desplazamientos registrada entre el tanque rigidizado y sin la presencia del anillo, sometidos a su mayor capacidad de carga. Se puede apreciar que los desplazamientos son menores a la mitad de los hallados para el tanque sin rigidizar para ese caso estudiado. En la Tabla 7 se extrajeron los desplazamientos coincidentes con la máxima carga correspondiente a las trayectorias mostradas en las Figuras 9 y 13. En todas las configuraciones de posición relativa entre los tanques los desplazamientos se reducen notablemente.

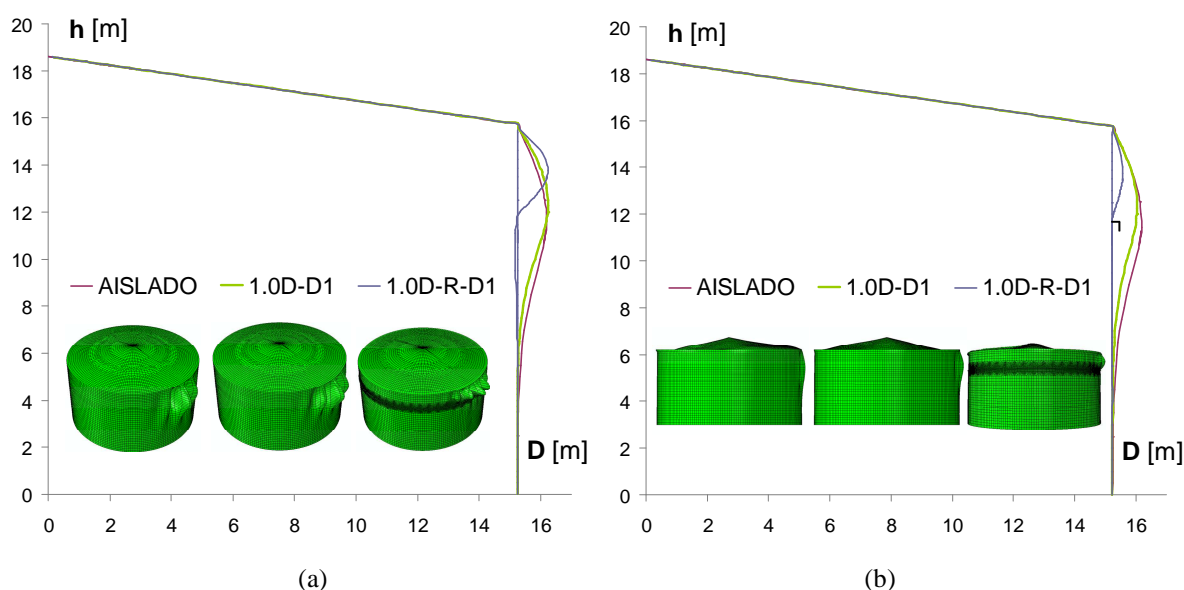


Figura 16: Deformadas para tanque aislado y dirección D1, separación 1.0D con (1.0D-R-D1) y sin rigidizador, (a) Formas de primer modo crítico, (b) Deformadas para cargas máximas (GNIA).

	Desplazamiento para carga máxima de Análisis No Lineal [mm]						
	Tanques a distancia 1.0D					Distancia 1.5D	Distancia 1.8D
	D1	D2	D3	D4	D5	D1	D1
Tanque sin rigidizar	8.0	10.2	9.8	10.2	10.3	8.5	8.4
Tanque rigidizado	3.34	6.2	4.9	6.1	5.6	3.4	3.5

Tabla 7: Desplazamientos correspondientes a la carga máxima de análisis no lineal (GNIA) para tanque sin y con rigidizador.

Ambos aspectos son sumamente favorables ya que por un lado las cargas a las que aparecen los problemas de pandeo son mayores, y eso está vinculado a mayores velocidades de viento, y además la deformada asociada presenta menores desplazamientos. Dado que el incremento de las cargas para algunos casos es elevado podría emplearse un anillo con menor rigidez.

## 6 CONCLUSIONES

Este trabajo plantea un análisis vinculado a las sobrepresiones generadas por el efecto de grupo, la respuesta estructural de los tanques dentro del conjunto según su posición relativa respecto a la dirección de incidencia del viento y un estudio sobre el refuerzo posible a implementar. Los ensayos en túnel de viento permitieron obtener la distribución de presiones correspondiente a las diferentes posiciones relativas entre los tanques y la dirección de incidencia del viento. Se analizaron tanques separados 1.0, 1.5 y 1.8 veces el diámetro del tanque estudiado ya que esas separaciones se corresponden con lo hallado en plantas en el Norte de la Patagonia. La respuesta estructural se realizó en base a simulaciones numéricas sobre el tanque sin rigidizador e incluyendo un anillo diseñado en base a las normativas correspondientes. Las principales conclusiones del trabajo son:

- La distribución de presiones sobre el cilindro y el techo del tanque ensayado con apantallamiento tiene modificaciones respecto a las del tanque aislado.
- En el caso de analizar un tanque no rigidizado, las cargas máximas resistidas por el tanque dentro del grupo son menores que las del tanque aislado, sobre todo para viento incidiendo en la dirección del obstáculo. El efecto es más perjudicial para la menor distancia estudiada, de una vez el diámetro.
- La existencia de un anillo rigidizador modifica considerablemente la respuesta de los tanques aumentando las cargas máximas resistidas al doble o más de su valor sin rigidizar, para un anillo con la rigidez mínima establecida en las normativas.
- El patrón de desplazamientos obtenido con el anillo rigidizador cambia con respecto al tanque aislado y al tanque dentro de un grupo pero sin rigidizador, disminuyendo los valores máximos hallados a la mitad o algo más.

Dentro de ese contexto y como conclusión general del trabajo se puede decir que el anillo rigidizador incluido en el tanque resulta eficiente para absorber las sobrepresiones generadas por la proximidad entre las estructuras.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a Dr. Sebastián Delnero, Dr. Jorge Colman Lerner, Dr. Julio Marañón Di Leo e Ing. Mariano García del Lab. de Capa Límite y Fluidodinámica (Univ. Nac. La Plata). LAG agradece el apoyo de SECYT-UNC y RCJ de SECYT-UNCo en



esta investigación.

## REFERENCIAS

- ABAQUS, *User's Manuals, Version 6.3*, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. Rhode Island, 2006.
- Ansourian, P., On the buckling analysis and design of silos and tanks, *J. Constructional Steel Research*, 23: 273-284, 1992.
- API Standard 650, *Welded steel tanks for oil storage*, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2010.
- ASCE 7 Standard, *Minimum design loads for building and other structures*. American Society of Civil Engineering, Reston, USA, 1999.
- Burgos, C., Jaca, R.C., Lassig, J. y Godoy, L.A., Wind tunnel and computational simulation of group effects in petroleum tanks, XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, Rio de Janeiro, en etapa de publicación, Septiembre 2012.
- Greiner, R., Cylindrical shells: wind loading, Chapter 17 in *Silos*, Ed.C.J. Brown&L.Nielsen, EFN Spon, 378-398, 1998.
- MacDonald, P.A., Holmes, J.D. y Kwok, K.C., Wind Loads on circular storage bins, silos and tanks II. Effect of grouping. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 34: 77-95, 1990.
- MacDonald, P.A., Kwok, K.C. y Colmes, J.H., Wind Loads on circular storage bins, silos and tanks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31: 165-188, 1988.
- Portela, G. and Godoy, L.A., Shielding effects and buckling of steel tanks in tandem arrays under wind pressures, *Wind and Struct.: An International Journal*, 8(5): 325-342, 2005.
- Portela, G. y Godoy, L.A., Wind pressures and buckling in grouped steel tanks. *Wind and Structures: An International Journal*, 10(1): 1-22, 2007.
- Portela, G., Godoy, L.A., y Zapata, R., Distribución de Presiones de Vientos Huracanados sobre Tanques Cortos mediante Estudios en Túnel de Viento. *RINAIC*, 2(2): 63-82, 2002.
- Resinger, F., y Greiner, R., Buckling of wind loaded cylindrical shells: Application to unstiffened and ring stiffened tanks, *Buckling of Shells*, E Ramm (Ed.), Springer, Berlin., 305-331, 1982.
- 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.
- Rotter J.M. y Schmidt H., *Buckling of Steel Shells: European Design Recommendations*, 5th Edition, European Convention for Constructional Steelwork, Mem Martins, Portugal, 2008.
- Schmidt, H., Binder, B., y Lange, H., Postbuckling strength design of open thin-walled cylindrical tanks under wind load, *Thin-Walled Structures*, 31: 203-220, 1998.