

# UTILIZACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO COMO HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE TANQUES DE PETRÓLEO EN LA NORPATAGONIA.

**Jorge L. Lassig<sup>a</sup>, Rossana C. Jaca<sup>a</sup>, Carlos Burgos<sup>a</sup>, José Esteban Cicerone<sup>a</sup> y  
Luis A. Godoy<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén,  
Argentina, jorge.lassig@fain.uncoma.edu.ar*

<sup>b</sup>*FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, e Investigador Principal, CONICET.*

**Palabras Clave:** túnel de viento, tanques, viento, colapso.

**Resumen.** En este trabajo se presentan una serie de ensayos realizados en túnel de viento, sobre distintos modelos de tanques correspondientes a dimensiones que se emplean con frecuencia en la industria del petróleo en las provincias de Río Negro y Neuquén, unos para analizar los colapsos ocurridos en tanques aislados y en fase de construcción, otros sobre tanques agrupados en baterías para cuantificar las sobrecargas que se generan por interferencia entre los mismos. Los modelos ensayados correspondientes a tanques en etapa constructiva tienen la condición de abierto en la parte superior, ya que el techo aun no estaba montado, mientras que los modelos para evaluar el efecto de grupo tienen techo cónico, considerándose diferentes separaciones entre ambos y direcciones de incidencia de viento variables. Los ensayos arrojaron patrones de flujos que produjeron cargas adicionales que no se tienen en cuenta en las actuales normas de diseño. Los coeficientes de presión medidos permiten realizar modelaciones numéricas para analizar la estabilidad de los tanques.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las cargas de viento y el comportamiento aerodinámico de estructuras cilíndricas circulares, tales como tanques de almacenamiento de petróleo y silos, ha sido estudiado ampliamente en el pasado (ver, por ejemplo, Holroyd, 1983; MacDonald et al. 1988, 1990; Uematsu and Yamada, 1994). En particular los tanques de pared delgada de acero son estructuras frecuentemente utilizadas en la industria del petróleo para almacenamiento de fluidos. En la región del Comahue (Patagonia, Argentina) es posible encontrar numerosas instalaciones de este tipo de estructura.

El proceso de fabricación de estos tanques consiste en armarlos desde el piso hacia el techo, por lo que gran parte del tiempo que demanda su construcción, los mismos están sin cubierta. Como en la Patagonia son frecuentes los vientos intensos, es muy probable que durante su construcción, estas estructuras deban soportar tormentas de viento. En general, la acción de viento en esta etapa constructiva no es tenida en cuenta en las evaluaciones y no se toman suficientes precauciones para evitar fallas. Casos de colapso durante la construcción han sido estudiados por Jaca y Godoy (2003, 2008, 2010) mediante análisis de estabilidad del equilibrio implementados en forma computacional.

Además, dichos tanques se encuentran normalmente agrupados en lo que se conoce como granjas o baterías de tanques tanto en refinerías como en plantas de almacenamiento. Tales granjas pueden albergar desde decenas hasta centenas de tanques, que pertenecen a una misma compañía o a varias. De manera que el comportamiento de cada tanque bajo vientos fuertes depende de su ubicación dentro del conjunto, pudiendo distinguirse los tanques que se encuentran en la periferia de aquellos que están en una segunda línea a contar desde la periferia.

Dentro de ese panorama, sorprende encontrar que la información disponible acerca de tanques bajo viento se concentra en la respuesta de tanques aislados ubicados en terrenos planos. Un reflejo de ese estado del arte se encuentra en un prestigioso trabajo de la Comunidad Europea (Rotter and Schmidt, 2008) que solo trata en detalle el pandeo de cáscaras aisladas. Un enfoque similar puede encontrarse en el trabajo de Greiner (1998), publicado 10 años antes. Otros trabajos de investigación referidos a efecto de agrupamiento fueron realizados para dimensiones características de silos que presentan una relación de aspecto altura–diámetro mayor (Macdonald *et. al* 1988, 1990) y en estos casos suelen estar dispuestos muy próximos unos de otros. Portela y Godoy (2005, 2007) estudiaron el efecto de grupo sobre la distribución de presiones en tanques mediante ensayos en túnel de viento y además, su influencia en la respuesta estructural.

La evaluación de la acción del viento sobre este tipo de estructuras necesita tanto el trabajo experimental como numérico, siendo importante el conocimiento del patrón de distribución de presiones para el análisis estructural. En este trabajo se analizó la acción del viento sobre tanques aislados en construcción, como así también sobre baterías de tanques en operación, mediante ensayos en túnel de viento con modelos físicos. Para la evaluación de efecto de grupo sobre granjas de tanques se estudió la estabilidad del equilibrio mediante modelación numérica, considerando las cargas de viento determinadas experimentalmente.

## 2 METODOLOGÍA

Los experimentos se realizaron en tres túneles de viento, dos en la Universidad Nacional del Comahue (UNCo) y uno en el Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (LaCLyFA) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Se realizaron algunos ensayos para evaluar en forma cualitativa el patrón de flujo y otros para obtener mediciones de

presiones que permitan evaluar la distribución de los coeficientes de presión. En el caso de los tanques en etapa constructiva se tomaron mediciones de presión en el interior del tanque y en el exterior de la cáscara cilíndrica con el objeto de mensurar el vórtice que se produce en el interior del tanque. En el caso de los tanques que forman parte de una batería, se tomaron mediciones sobre toda la envolvente cilíndrica y el techo para valorar la influencia del efecto de grupo sobre la distribución de presiones con respecto al tanque aislado. En este caso con las presiones medidas en el ensayo en túnel de viento se realizaron análisis de inestabilidad del equilibrio para calcular la carga máxima que puede resistir el tanque.

### 3 TANQUE SIN CUBIERTA

Este tipo de estructura frente a solicitaciones debidas al viento presenta problemas de inestabilidad, produciéndose grandes cambios en la geometría de los mismos. Ejemplos reales fueron los ocurridos en la zona de General Roca y de Rincón de los Sauces en los meses de Enero de los años 2001 y 2006, mostrados en las Figuras 1 (a) y (b) respectivamente. Los tanques en cuestión se encontraban en etapa de construcción y colapsaron por cambio de geometría bajo velocidades del orden del 33% al 43% de la velocidad de diseño de los mismos (CIRSOC 102, 2005). Por lo que se intuye que algún otro mecanismo o factor, influyó en su destrucción. La Figura 1 muestra el estado de deterioro en que quedaron ambos tanques luego de la débil tormenta de viento, para velocidades de 50 km/h y 64 km/h respectivamente registradas en las proximidades de la locación donde se encontraban los tanques.

Esta problemática fue estudiada mediante modelación computacional por Jaca (2008), sin tener en cuenta el efecto del viento dentro del tanque, pues a esa fecha no existía información al respecto. Solamente se consideró la succión indicada en los reglamentos CIRSOC pero no resultó suficiente para explicar el mecanismo de colapso. Con el objeto de tener un mayor conocimiento sobre dicha influencia, se realizó un estudio experimental del flujo existente en el interior del tanque, el cual se explica a continuación.

La primer etapa del trabajo se llevó a cabo en los dos túneles de UNCo de circuito abierto y con perfil de viento uniforme. Se los ha utilizado para visualizar el patrón de flujo interno de los tanques (vórtice en la cavidad) y realizar ensayos cualitativos de la deformación de los mismos sometidos a esas condiciones de flujo.



(a)

(b)

Figura 1: Tanques de petróleo en construcción en el norte de la Patagonia, que colapsaron a velocidades del viento muy inferior a las de diseño.

#### 3.1 Patrón de flujo interno

Pashley y Clark (2000) realizaron un estudio computacional (Computational Fluid Dynamics CFD) del flujo de viento en tanques de almacenamiento de petróleo con techo

flotante, analizando el comportamiento del fluido para diferentes posiciones de flotación del techo. En este trabajo se muestra que, para la condición de tanque vacío, se produce una recirculación completa de fluido en la cavidad, con succiones en el interior.

En el desarrollo de las ensayos se trató de visualizar el patrón de flujo que se produce dentro del tanques sin cubierta, para ello se realizó un ensayo en el túnel N°1 con tanque en escala 1:130 y 1:175 representando números de Reynolds del orden de  $8 \times 10^4$ , luego con tanques de mayor diámetro (con escalas 1:36 y 1:77) se realizaron ensayos en el túnel de viento N°2 para Reynolds del orden de  $2 \times 10^5$ , ambos túneles pertenecientes a la UNCo. Para poner en evidencia de manera cualitativa el patrón de circulación interior, se colocaron esferas de poliestireno expandido de baja densidad en el interior de los modelos ensayados. En ambos casos se pudo comprobar la formación de un vórtice interior semi estanco que intercambia importante cantidad de movimiento con el exterior y produce una importante depresión que contribuye al colapso de los tanques. Las Figuras 2 (a) y (b) muestran la ubicación del vórtice interno a través del movimiento de las esferas, para los modelos de modelos A y B relativos a los tanques de la Figura 1 (a) y (b). La Figura 3 muestra el mismo efecto pero para un ensayo con un tanque de mayor diámetro y a mayor Reynolds.

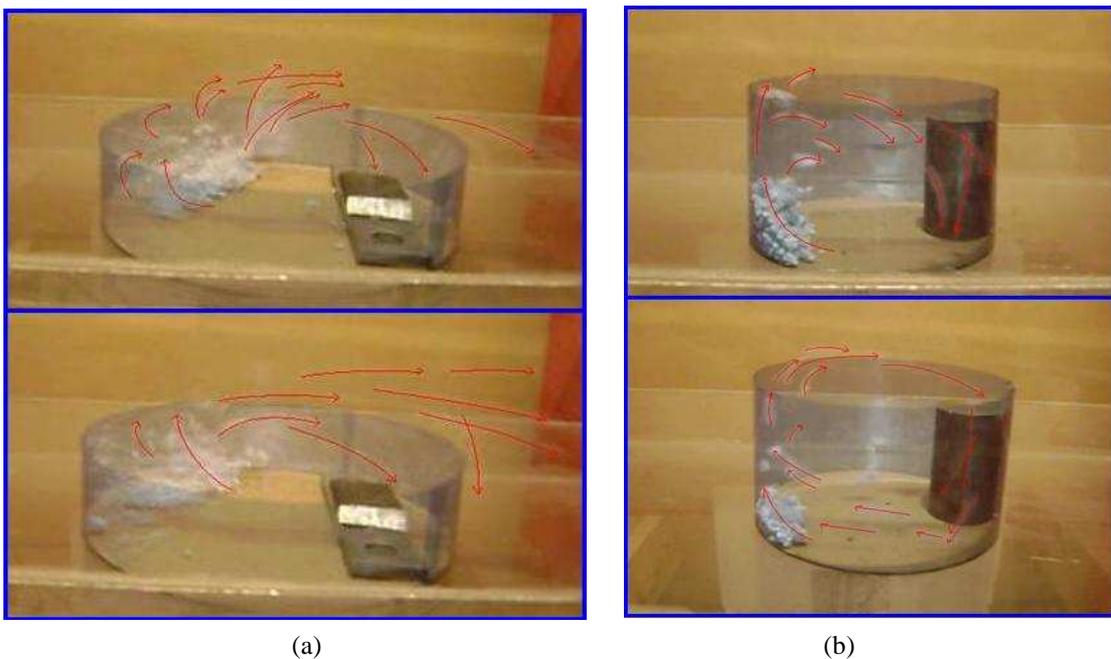


Figura 2: Trayectorias de las esferas de poliestireno expandido de baja densidad, (a) Tanque A con diámetro 17,7 cm, (b) Tanque B con diámetro 13,3 cm. La dirección del viento es de izquierda a derecha.



Figura 3: Ensayo de trayectoria con esferas de poliestireno expandido de baja densidad para el modelo de tanque B con un diámetro de 40 cm.

### 3.2 Ensayo Dinámico (Deformación) en el Túnel de Capa Límite Atmosférica

En una segunda etapa se realizaron ensayos en el túnel de viento de capa límite de la UNLP. Se ensayaron dos modelos de tanques sin techo con diámetros externos de 40 cm cada uno: el modelo A con una esbeltez (H/D) de 0.2425 y el modelo B con una esbeltez (H/D) de 0.6125. La Figura 4 ilustra los modelos ensayados poniendo en evidencia las deformaciones que se generan en los dos modelos de tanques A y B. Se puede observar que las deformadas son similares a las que se presentaron en el colapso de ambos tanques y que se exhibe en los modelos el efecto de levantamiento del fondo presente en ambos tanques colapsados. En los análisis numéricos realizados, este aspecto fue relevante en la representación del mecanismo de colapso.



(a)



(b)

Figura 4: Ensayo dinámico para: (a) Modelo tanque A, (b) Modelo tanque B.

A continuación se muestra en detalle el análisis realizado para el tanque B. La Tabla 1 muestra las dimensiones del prototipo y del modelo, vinculadas a través de la escala geométrica que resulta  $\alpha= 36.8$  para un diámetro del modelo de 40 cm.

	Prototipo	Modelo	
Diámetro [m]	14,70	0,4	<b>40 cm</b>
Altura (Colapso) [m]	9,00	0,245	<b>24,5 cm</b>
Espesor [m]	0,00635	0,00017	<b>170 <math>\mu</math>m</b>

Tabla 1: Dimensiones del prototipo y modelo del tanque B.

La escala cinemática  $\beta$  que permite vincular las velocidades del modelo y el prototipo, se define considerando la similitud de Froude (inercia versus gravedad), siendo:

$$\beta = \sqrt{\alpha} \quad (1)$$

y resultando para este caso un valor de  $\beta = 6.06$  para la escala de velocidades. La Tabla 2 muestra la velocidad de colapso ( $V=64.4$  km/h) para el prototipo y el modelo expresadas en m/s.

Tanque B	Prototipo	Modelo
Velocidad de Colapso [m/s]	17.8	2.94

Tabla 2: Velocidad de colapso del prototipo y modelo del tanque B.

Para evaluar la semejanza dinámica se consideró igualdad en el coeficiente de arrastre del modelo y prototipo, ya que se aseguró que el flujo en el modelo fue turbulento. Así la escala de fuerzas  $\gamma$  es:

$$\gamma = \alpha^3 \quad (2)$$

Para definir el material a utilizar en el modelo, se consideró la relación entre los módulos de Elasticidad del prototipo y del modelo de la siguiente manera:

$$\frac{E_{prototipo}}{E_{modelo}} = \frac{\frac{F_p}{A_p}}{\frac{F_m}{A_m}} \quad (3)$$

Donde las áreas a considerar son el producto del perímetro por el espesor, y en el espesor se utilizó otra escala de longitudes debido a la disponibilidad de los materiales a utilizar, así la semejanza geométrica del ensayo tuvo dos escalas, la  $\alpha_1$  expresada en la tabla 1 (alto, ancho y diámetro), y la escala de espesore  $\alpha_2$ . Como se utilizó láminas de aluminio de un espesor de 0,1 mm, para los tanques A y B la escala  $\alpha_2$  resultaron ser lo expresado en la Tabla 3.

Tanque	Espesor P	Espesor M	$\alpha_2$
A	4,65 mm	0,1 mm	46,5
B	6,25 mm	0,1 mm	62,5

Tabla 3: escala distorsionada de espesores en ambos tanques.

La relación de áreas es:

$$\frac{A_p}{A_m} = \frac{\pi \cdot \phi_p \cdot \text{Espesor}_p}{\pi \cdot \phi_m \cdot \text{Espesor}_m} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \quad (4)$$

Volviendo a la (3) tenemos:

$$\frac{E_p}{E_m} = \frac{\frac{F_p}{A_p}}{\frac{F_m}{A_m}} = \frac{\alpha^3}{\alpha_1 \cdot \alpha_2} = \frac{\alpha_1^2}{\alpha_2} \quad (5)$$

La Tabla 4 indican las relaciones de módulos de elasticidad para ambos tanques.

Tanque	Ep/Em	Em
A	129,16	16300 Kg/cm2
B	21,66	100000 Kg/cm2

Tabla 4: Módulo de elasticidad del modelo y su relación con el prototipo en ambos tanques.

Por lo que el material a utilizar en el tanque A debería ser un tipo de plástico (como acetato

u otro) y para el tanque B el aluminio está en el orden de magnitud.

Al utilizar láminas de aluminio para ambos modelos, la relación entre los módulos de elasticidad fue de 3, ya que el material constitutivo del modelo es acero con  $E=2.1 \cdot 10^8$  kN/m<sup>2</sup>, y el del aluminio con un módulo de Elasticidad de  $7 \cdot 10^7$  kN/m<sup>2</sup>. Por lo que el ensayo del tanque A resultaría mas rígido y más resistente a la deformación por ende resistiría mayor velocidad del viento. Por el contrario, el tanque B se ajustaría mejor su deformación con la escala de velocidades de viento.

Durante los ensayos se analizaron diferentes configuraciones de unión entre cilindro y el fondo, en cuanto a separación entre los puntos de soldadura y su posible desprendimiento. La Figura 5 muestra diferentes esquemas analizados y configuraciones de apoyo junto con las velocidades a las que se produjo el mecanismo de colapso de la estructura en el túnel de viento. Las configuraciones de apoyo consideradas tienen en cuenta la posibilidad de desprendimiento de los puntos de soldadura que permiten el levantamiento del fondo. El caso A se corresponde con soldaduras existentes cada 0.5m (13.6 cm en el modelo), el caso B cada 1.0 m (27.2mm) o bien un punto fijo de soldadura a barlovento y el resto libre hasta los 90° de dirección del viento.

APOYO		SOLDA- DURAS CADA	VEL. EVANT. FONDO	VEL. PANDEO (modelo)	VEL. PANDEO (prototipo)
A		13,6 mm	1,5 m/s se levanta el fondo.	3 m/s pandea.	66 km/h pandea.
B		27,2 mm	2,15 m/s se levanta el fondo.	2,7 m/s pandea.	59 km/h pandea.
C		1 a barlovento y libre hasta los 90°.	2,3 m/s se levanta el fondo.	2,5 m/s pandea.	55 km/h pandea.

Figura 5: Tipos de apoyo internos del tanque B, separación entre soldaduras en el modelo y las velocidades en el túnel de viento para el levantamiento del fondo y el colapso del tanque.

Se puede observar que las velocidades de colapso en el ensayo entre 2,5 y 3 m/s son semejantes a las pronosticadas en la escala de velocidades del ensayo y las que ocurrieron en el tanque verdadero.

### 3.3 Medición de las Presiones y Velocidades

Para obtener adecuadas medidas de presión tanto externa como interna en los modelos de tanques y así deducir el coeficiente de presión ( $C_p$ ), se utilizó un túnel de viento de Capa Límite Atmosférica de circuito cerrado, con una sección de prueba de  $1,4 \times 1,0$  m<sup>2</sup>, generándose los ensayos a mayores números de Reynolds. Para medir las presiones se utilizó el Sistema NetScanner de sensores electrónicos de presiones de 128 canales.

Las tomas de presión de 0,5 mm de diámetro se instalaron según se indica en la Figura 6, tanto en la superficie externa, el fondo, como en la superficie interna. En total 12 orificios para las mediciones de presión estática. Todas las presiones se muestrearon a una frecuencia

de 4 Hz por aproximadamente 60 segundos de forma simultánea.

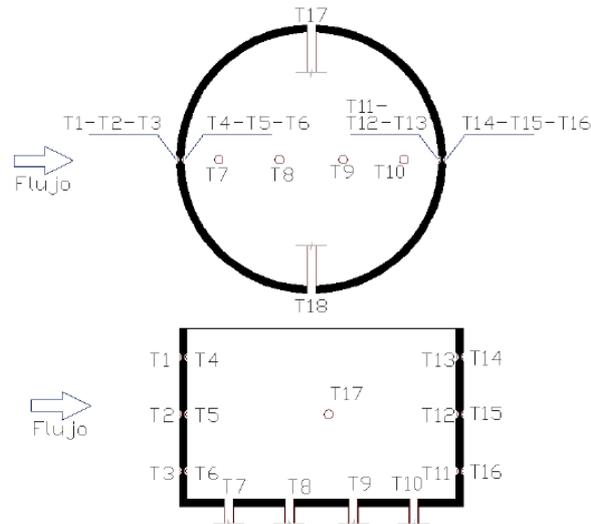


Figura 6: Ubicación y nomenclatura de las tomas estáticas en los tanques ensayados.

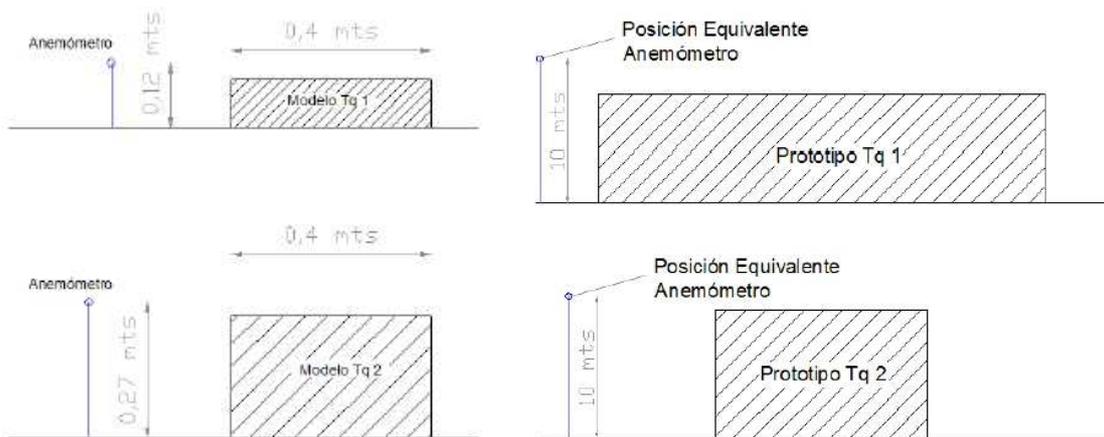


Figura 7: Ubicación relativa de la velocidad del viento  $U_H$  tomada como referencia en los ensayos dentro del túnel de viento, y el equivalente en los prototipos.

Para medir la velocidad se utilizó un anemómetro de hilo caliente portátil marca DANTEC con brazo telescópico. Las velocidades  $U_H$  del viento se midieron a una altura (H) equivalente de 10 m para ambos prototipos, la Figura 7 ilustra la posición de la medición con el anemómetro de hilo caliente realizada en el túnel de viento y lo que representaría en los tanques reales. Se realizaron los ensayos a tres velocidades de viento  $U_H$ : 7,5; 10,26 y 18 m/s, con números de Reynolds que variaron desde  $2,1 \times 10^5$  hasta  $4,8 \times 10^5$ .

En los ensayos con la medición de presión estática en las superficies externas e internas de los tanques, se pudo cuantificar el valor de la succión producida por el vórtice en el interior de los tanques. La Figura 8 muestra para ambos modelos la distribución del coeficiente de presión  $C_p$  en las 16 tomas alineadas con el eje longitudinal a la dirección del viento, dentro y fuera de las paredes de los tanques, toma desde T1 hasta T16. Las tomas estáticas T17 y T18 son las laterales (a  $90^\circ$  y  $270^\circ$  respectivamente). Las Tablas 5 y 6 indican los valores de  $C_p$  medios en cada toma estática en ambos tanques para tres distintas velocidades de viento de ensayo.

V	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
7	0.39	0.633	0.55	-0.99	-1.04	-0.88	-0.79	-1.24	-1.59	-0.64	-0.42	-0.82	-0.79	-0.62	-0.37	-0.27	-1.23	-1.22
10	0.723	0.92	0.723	-1.15	-1.15	-1.1	-1.08	-1.44	-1.65	-0.74	-0.23	-0.72	-0.6	-0.74	-0.59	-0.5	-1.27	-1.76
18	0.42	0.487	0.397	-0.57	-0.59	-0.55	-0.57	-0.73	-0.78	-0.41	-0.11	-0.32	-0.3	-0.41	-0.34	-0.29	-0.59	-0.99

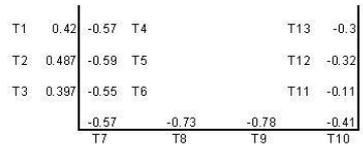
Tabla 5: Coeficientes de presión medios en cada toma estática medidos en el modelo de tanque A, para tres velocidades expresadas en m/s.

V	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
10	0.91	0.74	0.627	-0.78	-0.65	-0.54	-0.67	0.293	-0.53	-0.17	-0.07	-0.46	-0.43	-0.2	-0.21	-0.19	-0.6	-0.98
13	1.017	0.793	0.677	0.33	-0.81	-0.65	-0.83	-0.87	-0.76	-0.29	-0.28	-0.67	-0.62	-0.28	-0.33	-0.33	-0.86	-1.27
18	0.723	0.593	0.47	-0.8	-0.78	-0.65	-0.73	0.163	-0.75	-0.36	-0.37	-0.69	-0.61	-0.38	-0.37	-0.43	-0.77	-1.16

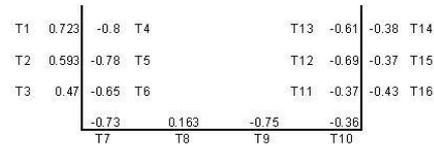
Tabla 6: Coeficientes de presión medios en cada toma estática medidos en el modelo de tanque B, para tres velocidades expresadas en m/s.

Tanque A:  $H/D=0,2425$ ;  $V=18$  m/s

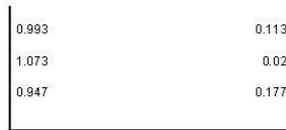
Tanque B:  $H/D=0,6125$ ;  $V=18$  m/s



$C_p$  promedio en cada toma estática



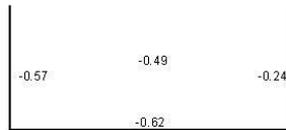
$C_p$  promedio en cada toma estática



Diferencia de  $C_p$  en cada pared



Diferencia de  $C_p$  en cada pared



$C_p$  promedios en el interior del tanque



$C_p$  promedios en el interior del tanque

Figura 8: (a) valor promedio de los  $C_p$  en cada toma estática; (b) diferencias de  $C_p$  a sotavento y a barlovento; (c)  $C_p$  internos promedios en cada pared y promedio de todos los  $C_p$  internos en el centro del tanque.

En la Figura 8 (a) y (b) se puede observar que el efecto de succión interno del vórtice produce en la pared delantera del tanque (barlovento) una mayor carga, de la que se considera actualmente según las normas. Por otra parte, en la cara trasera del tanque (sotavento) al considerarse el efecto de succión interna del vórtice, se produce sobre una menor carga.

Además, en sentido perpendicular a la dirección de incidencia del viento, al tener internamente un  $C_p$  negativo, se produce una menor carga en esas paredes laterales, comparado con el caso de los tanques con techo. También se pudo medir la succión registrada en el fondo, que no había sido considerada en las evaluaciones numéricas anteriores.

#### 4 BATERIA DE TANQUES

Los modelos de los tanques en batería, se construyeron con un diámetro de 20 cm. La escala de longitudes para estos ensayos fue de  $\alpha_C = D_{\text{prototipo}} / D_{\text{modelo}} = 152.4$ .

La Figura 9 muestra la disposición de los mismos considerada para los ensayos de baterías de tanques. Se usaron dos tanques de iguales dimensiones y sobre el que se realizan las mediciones se dispusieron 97 tomas de presión distribuidas en tres niveles en el casco, otros

tres niveles en el techo y una toma individual en la parte superior del techo cónico. Se analizó el efecto de bloqueo para una separación variable de  $1.0D$  a  $1.8D$ , para un diámetro  $D$  de los tanques, con direcciones de incidencia variables  $D1$  a  $D5$ .

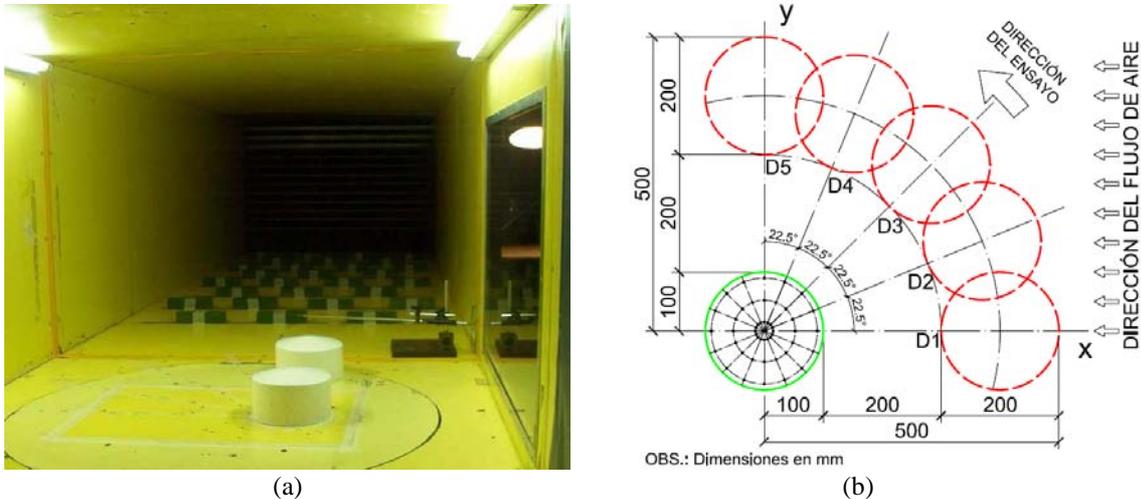


Figura 9: Ensayo de tanque con apantallamiento, (a) Vista interior del túnel de viento, (b) Esquema de diferentes direcciones de ensayo.

#### 4.1 Ensayo Tanque Aislado

Para realizar comparaciones con los tanques en batería, primero se realizó un ensayo con un solo tanque aislado. Los resultados de la distribución del  $C_p$  se pueden observar en la Figura 10. Estos valores muestran acuerdo con lo reportado por Portela y Godoy (2005).

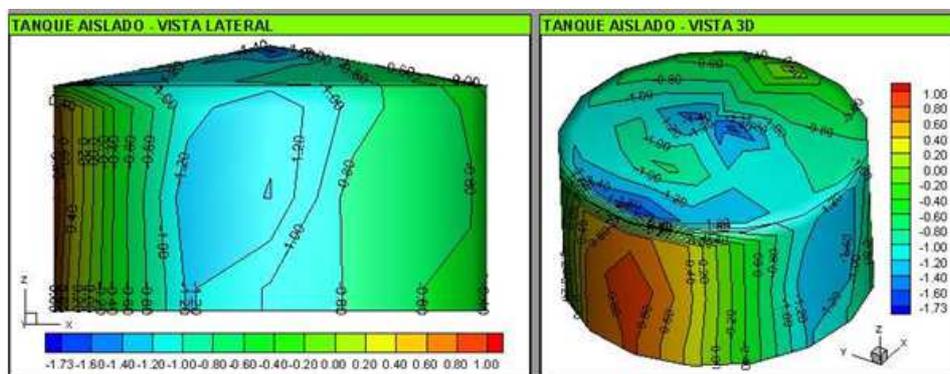


Figura 10: Distribución del  $C_p$  en el contorno de un tanque aislado para una velocidad del ensayo de  $12.6 \text{ m/s}$ .

#### 4.2 Ensayos con Batería de Tanques

La Figura 11 presenta los resultados de los ensayos correspondientes a una separación de  $1.0 D$  entre los tanques para las direcciones de viento 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente. Una mejor descripción de las condiciones de realización de los ensayos se encuentra en Burgos et al. (2012).

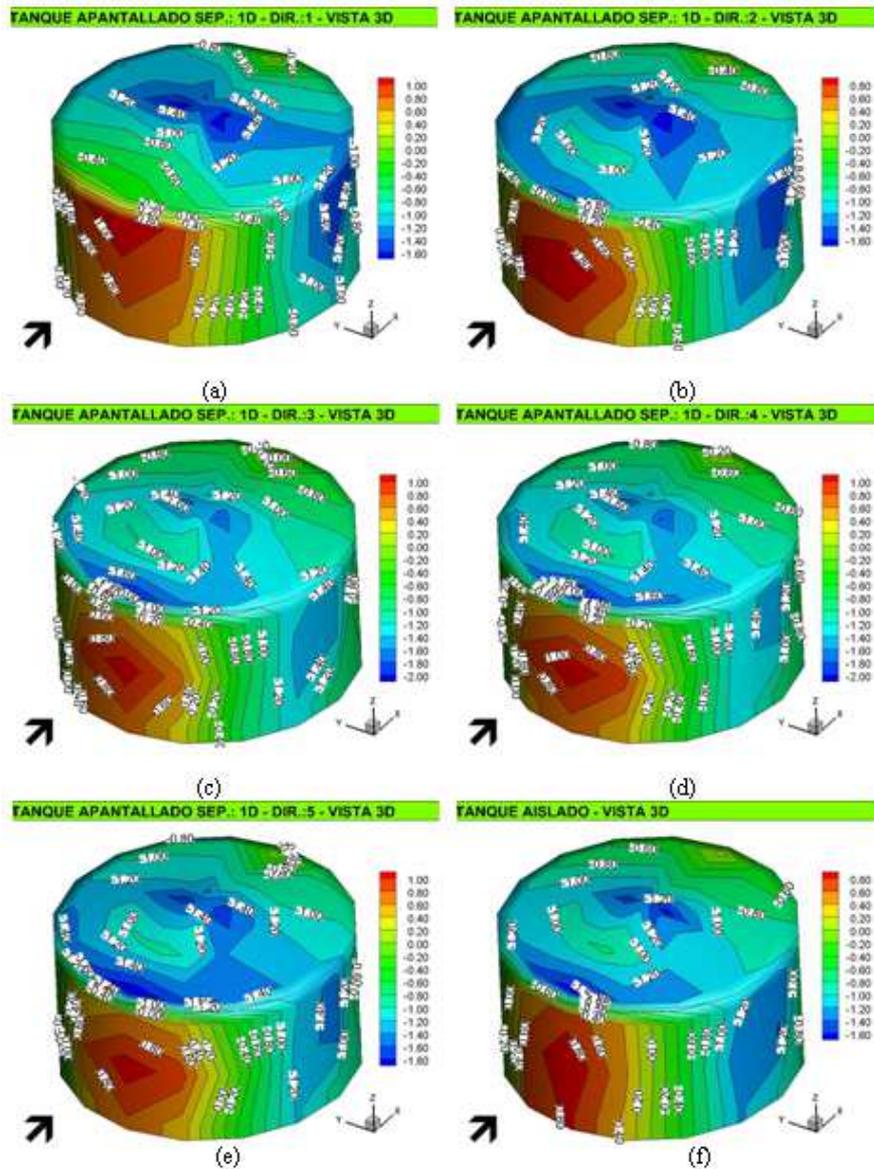


Figura 11: Coeficientes de presión para tanques separados 1.0D y aislado, (a) Dirección 1, (b) Dirección 2, (c) Dirección 3, (d) Dirección 4, (e) Dirección 5, (f) Aislado.

En general, se observa que el rango de presiones es mayor que el que corresponde al tanque aislado, tanto en presiones como en succiones y que la distribución que corresponde a la dirección de incidencia D1, con el obstáculo en la misma dirección del viento, presenta los mayores cambios respecto al tanque aislado, tanto en valores como en las formas de la distribución de presiones.

En la dirección D1, en la envolvente cilíndrica se puede ver que, a barlovento, las mayores presiones se presentan en la zona más próxima a la unión entre el cilindro y el techo, y tiende a ser similar al tanque aislado en las otras direcciones pero con mayores valores. Esto indicaría que, cuando se produce la obstrucción completa del flujo (dirección D1), el flujo detrás del cilindro de apantallamiento se desvía al pasar por el techo del mismo generando mayores presiones en esa zona próxima al techo del segundo tanque. Pero este sector con las mayores presiones va descendiendo al desplazarse el obstáculo hacia un lado (direcciones D2 a D5), presentando una distribución del tipo correspondiente al tanque aislado. En la zona a sotavento, los valores son similares al tanque aislado salvo para la dirección D1 donde las

succiones son menores.

Para visualizar como interactúa el viento con el tanque en su condición de aislado y apantallado a una separación de  $1.0D$  y dirección de incidencia  $D1$ , se realizó un ensayo inyectando humo en el flujo de aire que circula en el túnel de viento. La Figura 12 muestra lo observado en dicho ensayo y los valores de coeficiente de presión ( $C_p$ ) medidos sobre la superficie sobre el tanque aislado y en su condición de apantallado. El flujo de aire impacta en el tanque apantallado a una altura superior respecto al tanque aislado, debido a la desviación que sufre al pasar por el techo del tanque que produce el bloqueo.

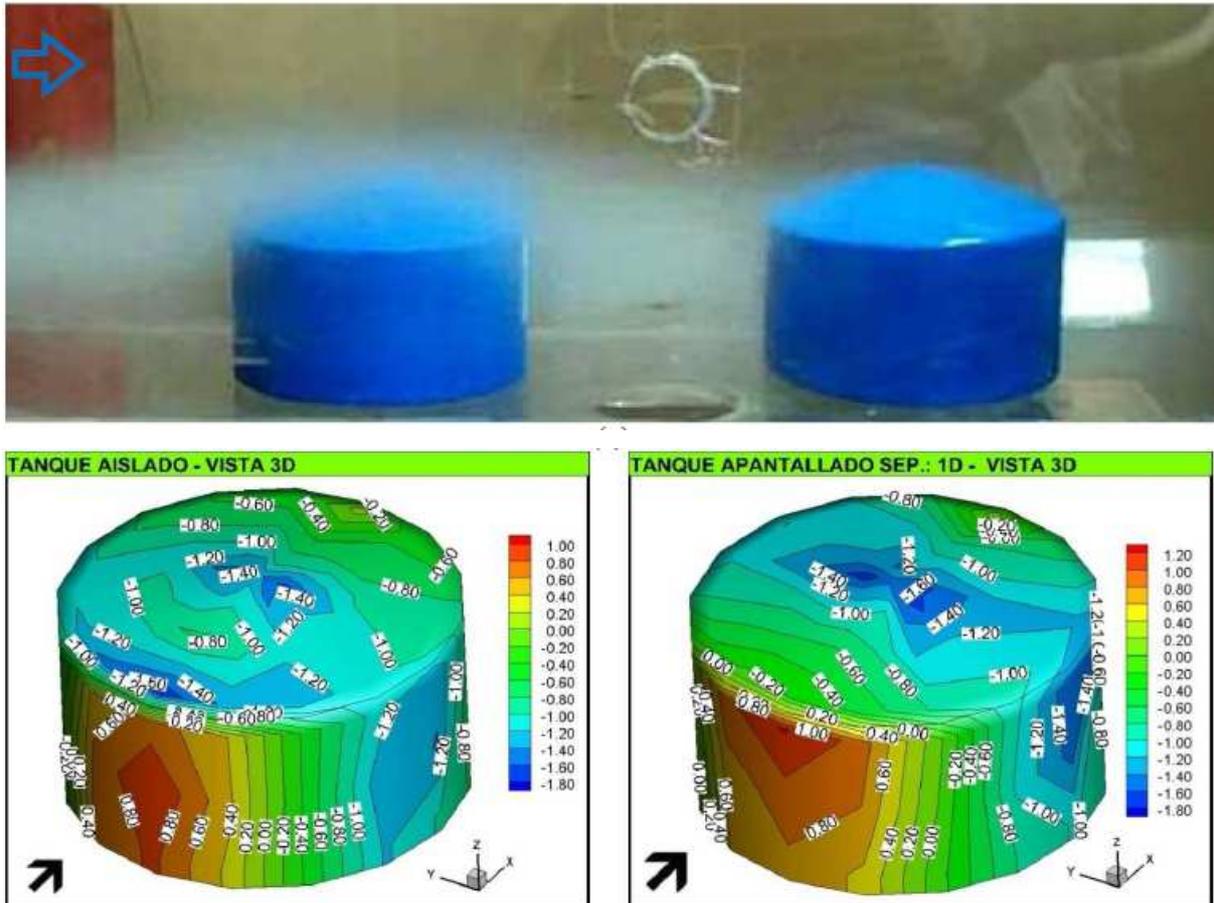


Figura 12: Patrón de flujo sobre tanques apantallados, (arriba) Ensayo con humo para  $1.0D-D1$ , (abajo izquierda)  $C_p$  para tanque aislado, (abajo derecha)  $C_p$  para  $1.0D-D1$ .

### 4.3 Análisis computacional de pandeo

El análisis se realiza con el código de elementos finitos de propósitos generales ABAQUS (2006), con elementos de cáscara cuadráticos rectangulares y triangulares. El tanque se modela empotrado en la base y 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 y circunferencialmente 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). 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. Como parte del estudio en una primera etapa se evalúan cargas críticas y formas de modo asociadas mediante bifurcación lineal para tener una referencia de los valores a los que pueden aparecer problemas de inestabilidad del equilibrio. Posteriormente se realiza un análisis no lineal geométrico por el método de Riks (1972, 1979), esta metodología permite evaluar la carga máxima resistida por la estructura para una determinada magnitud de imperfección geométrica. De esta manera se obtiene una evaluación del comportamiento de la estructura incluyendo la respuesta poscrítica.

En la Tabla 7 se muestran las cargas críticas halladas 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 13 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.

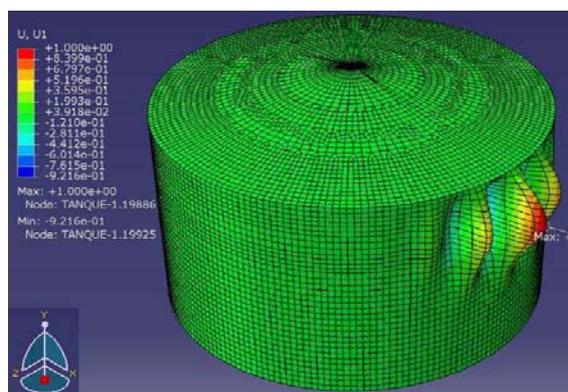


Figura 13: Bifurcación lineal, primer modo 1.0D-Dirección D1.

	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 7. Cargas críticas y máximas y factores de reducción.

Para apantallamiento a distancia 1.0D y dirección de incidencia 2 a 5 o para separaciones 1.5D y 1.8D, las formas de modo son similares. 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 0.69 ( $\lambda^c_{D1} = \lambda^c_{\text{aislado}}$ ).

La Tabla 7 también muestra las cargas máximas halladas para cada caso al realizar seguimiento de las trayectorias de equilibrio mediante 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 consideró 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. Estas curvas representativas de los diferentes estados de equilibrio para todas las configuraciones de disposición relativa entre los tanques son mostradas en la Figura 14, en función del desplazamiento del punto de mayor valor para el primer modo crítico.

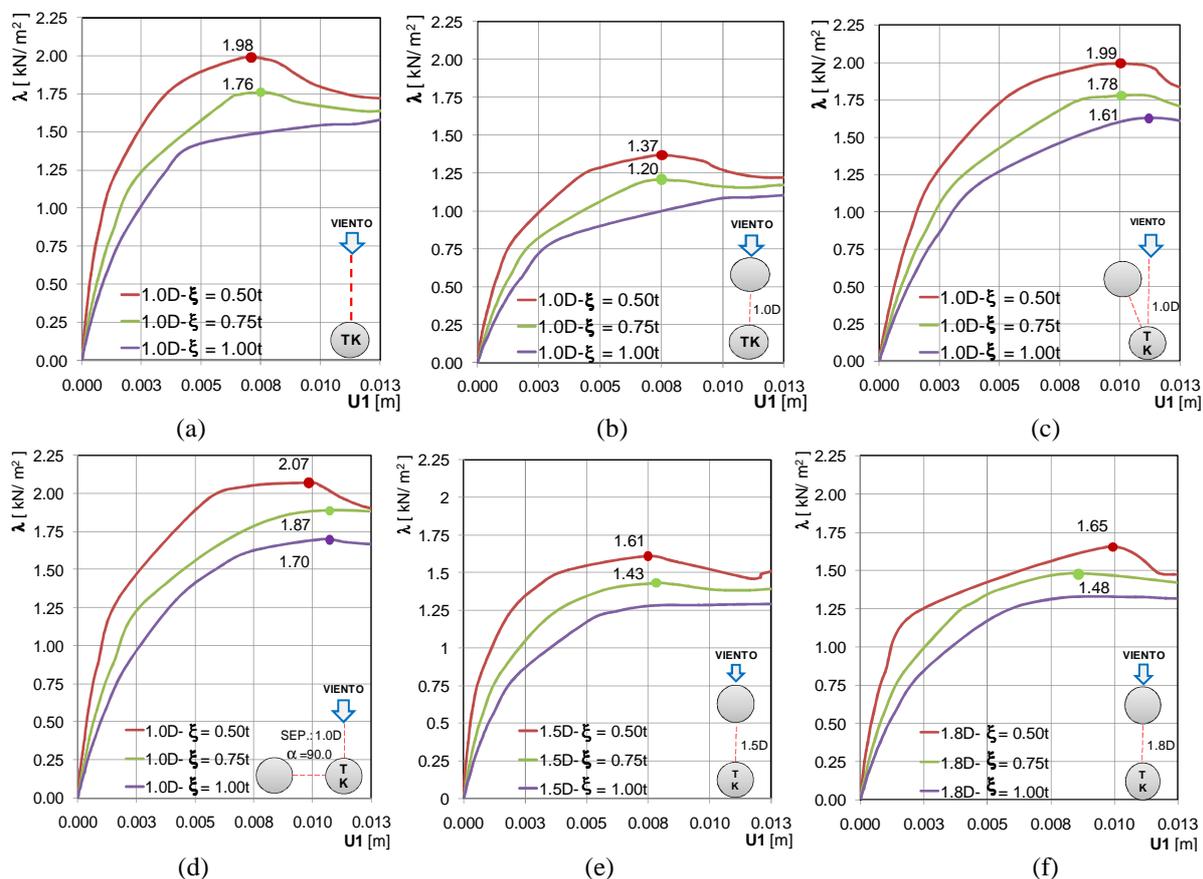


Figura 14: Trayectorias de equilibrio (GNIA), Tanque sin rigidizador, (a) Aislado, (b) Separación 1.0D y D1, (c) Separación 1.0D y D2, (d) Separación 1.0D y D5, (e) Separación 1.5D y D1, (f) Separación 1.8D y D1.

En la Figura 14 se observan las trayectorias de equilibrio obtenidas para los casos analizados tomando como referencia el nodo con mayor desplazamiento en el modo crítico. Se puede observar que la respuesta es similar en todos los casos y que las mayores reducciones de la carga máxima resistida se corresponden con el obstáculo en la dirección de incidencia del viento para las diferentes separaciones analizadas. Entre todas ellas la mayor reducción es para la menor distancia analizada, de un diámetro. Se considera como límite en la reducción de la carga la curva que resulta creciente, para la cual la respuesta es diferente debido a una configuración geométrica modificada en exceso por la imperfección.

Para analizar la influencia de las imperfecciones en la disminución de las cargas resistidas para la distribución de presiones medidas en los ensayos, se calcula el factor de reducción a través de la relación entre la carga máxima y la carga crítica. En la Tabla 5 también muestran esos factores de reducción para cada caso analizado. 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.

## 5 CONCLUSIONES

Este trabajo plantea una evaluación experimental de problemáticas asociadas a la acción del viento sobre estructuras de tanques de almacenamiento de petróleo o derivados. Por un lado, se realizaron ensayos en túnel de viento para esclarecer el comportamiento de tanques en etapa constructiva que colapsaron por pandeo frente a vientos de magnitud del orden de la tercera parte de las velocidades de referencia en los reglamentos. Y por otro, se analizó la influencia del efecto de grupo en granjas de tanques sobre las presiones de viento con respecto a la acción sobre tanques aislados. Ninguno de estas dos problemas están expresamente tratados en los reglamentos y su tratamiento no específico presenta deficiencias cuando se realizan evaluaciones sin tenerlos en cuenta.

Para el ensayo de tanques que fallaron durante su construcción y que no presentaban techo al momento del colapso, las mediciones de presiones interiores y exteriores en la envolvente cilíndrica y en el fondo del tanque permitieron detectar la formación de un vórtice interior que produce mayores presiones a barlovento y menores succiones a sotavento, con respecto a la distribución de presiones para un tanque cerrado con techo fijo.

Desde el punto de vista fluidodinámico, la generación de este vórtice en la cavidad contribuye al colapso de estos tanques en construcción que presentan condiciones estructurales debilitadas frente a las del estado final una vez terminado el montaje. El vórtice fue visualizado por medio del arrastre de pequeñas esferas de poliestireno expandido de baja densidad, y se pudo cuantificar el efecto de dicha succión midiendo las presiones estáticas en un corte longitudinal en la dirección del viento en las caras externas e internas de los dos modelos de tanques.

En trabajos futuros se realizarán análisis de pandeo incluyendo estas presiones adicionales generadas por el vórtice interior en la cavidad para evaluar su real influencia en el mecanismo de colapso. En los estudios numéricos realizados anteriormente se incluyó la succión definida por el reglamento CIRSOC sobre las paredes del tanque, pero que resultan valores menores a los medidos, y no se consideró la succión que pudo ser medida en el fondo durante los ensayos.

El ensayo dinámico logró reproducir cualitativamente la deformación que se produce bajo estas condiciones fluidodinámicas a la que son sometidos los tanques sin cubierta, coincidiendo con la forma en que colapsaron.

Para el caso de los tanques agrupados en batería, las conclusiones fueron:

- La distribución de presiones sobre el tanque con apantallamiento presenta modificaciones tanto en su magnitud como en el patrón de distribución con respecto al tanque aislado, en el cilindro y en el techo, sobre todo para bloqueo en la dirección de incidencia del viento y tanques separados un diámetro.
- A barlovento, los mayores cambios se presentan próximos a la unión cilindro-techo afectando a ambas cáscaras. A sotavento, la succión sobre el cilindro es casi constante en altura y de menor valor que en el tanque aislado. En el sector lateral del cilindro en el lado opuesto al bloqueo se observan menores succiones con una distribución en altura diferente. En la zona lateral del lado del obstáculo, la distribución en altura es semejante al tanque aislado con succiones mayores.
- El patrón de distribución de presiones se mantiene al aumentar la separación entre los tanques, pero los valores máximos tienden a acercarse a los de tanque aislado.
- La acción de vientos en dirección inclinada con respecto al obstáculo no afecta la respuesta del tanque comparado con la obtenida para tanque aislado, obteniéndose cargas máximas resistidas similares.

- Entre las configuraciones estudiadas, la mayor reducción de las cargas máximas resistidas corresponde a apantallamiento en la dirección de incidencia del viento siendo menor la carga soportada para la menor distancia entre tanques, de una vez de diámetro.

### Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a los miembros del Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (LaCLyFA) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Doctores: Juan Sebastian Delnero, Jorge Colman Lerner y Julio Maraion Di Leo. R. Jaca y J.Lassig agradecen a la SCYT de la Universidad Nacional del Comahue por el apoyo recibido para realizar la investigación.

### REFERENCIAS

- ABAQUS, *User's Manuals, Version 6.3*, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. Rhode Island, 2006.
- CIRSOC 102, *Acción del viento sobre las construcciones*, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires, 2005.
- 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*. C.J. Brown, L. Nilssen (Eds.), Silos, p. 378-399 [Chapter 17], EFN Spon, London, 1998.
- Holroyd, R.J. On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds (Part 1). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12: 329-352, 1983.
- Jaca, R.C. and Godoy, L.A. Wind buckling of metal tanks during their construction. *Thin Walled Structures*, 48: 453-459, 2010.
- Jaca, R.C. Límites Inferiores en Inestabilidad de Láminas en Tanques de Pared Delgadas. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, 2008.
- Jaca, R.C., y Godoy, L.A. Colapso de un tanque metálico en construcción bajo la acción del viento. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 3(1): 73-83, 2003.
- MacDonald, P.A, Kwok, K.C.S. and Holmes, J.D. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31: 165-187, 1988.
- MacDonald, P.A, Kwok, K.C.S. and Holmes, J.D. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: II. Effect of grouping. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 34: 77-95, 1990.
- Pashley,H. and Clark, C. Computational fluid dynamics of flow around floating-roof oil storage tanks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 86:37-54, 2000.
- Portela, G., y Godoy, L.A. Shielding effects and buckling of steel tanks in tandem arrays under wind pressures. *Wind and Structures: 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.
- 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. and Schmidt, H. *Buckling of Steel Shells: European Design Recommendations*. 5th Ed.. European Convention for Const. Steelwork, Mem Martins, Portugal, 2008.
- Uematsu,Y., and Yamada,M. Aerodynamic forces on circular cylinders of finite height. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51: 249-265, 1994.