

FALLA DE TANQUES DE ACERO DURANTE SU CONSTRUCCIÓN: EXPERIMENTOS Y MODELACIÓN COMPUTACIONAL¹

Rossana C. Jaca ², Esteban Cicerone ³, Facundo C. Hernández ⁴, Jorge L. Lassig ⁵, Luis A. Godoy ⁶

Resumen: La construcción de tanques de acero destinados al almacenamiento de petróleo plantea un estado de solicitaciones frente a la acción de viento que no está contemplado en las normativas. En la Patagonia Argentina, como en otros lugares reportados en la bibliografía, se han registrado casos de colapso de este tipo de estructuras durante la etapa constructiva a moderadas velocidades de viento. Estudios numéricos anteriores condujeron a determinar como factor desencadenante del mecanismo de colapso, la falta de integridad estructural por las irregularidades en la continuidad del apoyo en el sentido circunferencial. Un mayor conocimiento del comportamiento fluido-dinámico del viento permite ajustar las acciones actuantes usadas en el abordaje del estudio numérico. Este trabajo completa el análisis de tanques no anclados que colapsaron por acción del viento durante su etapa constructiva evaluando el patrón del flujo interior en los tanques mediante ensayos en túnel de viento, incluyendo estos resultados en el estudio numérico. La estructura se modela por elementos finitos mediante un código de propósitos generales, evaluando la inestabilidad del equilibrio mediante un análisis de bifurcación lineal (LBA) y análisis no lineal geométrico con imperfecciones (GNIA). Los ensayos permitieron determinar la formación de un vórtice interior que produce una depresión mayor que el de la estela a sotavento del tanque.

Palabras clave: colapso, elementos finitos, tanques, túnel de viento, viento.

FAILURE OF STEEL TANKS DURING THEIR CONSTRUCTION: EXPERIMENTS AND COMPUTATIONAL MODELING

Abstract: During the construction of steel storage oil tanks, a state of stresses under wind loads is induced which is not covered by the regulations. Cases of collapse of such structures during their construction occurred in Patagonia Argentina and elsewhere under moderate wind speeds, as reported in the literature. Previous numerical studies concentrated on the identification of the collapse mechanism, which was related to the loss of structural integrity due to discontinuity of the support in the circumferential direction. An increased knowledge of the fluid dynamic behavior under wind allows obtaining an improved input used in the subsequent numerical study. This paper provides new insight into the wind behavior of unanchored tanks that collapsed during their construction by wind tunnel tests to evaluate the flow pattern inside the tanks, which is an input for the subsequent numerical study. The structure is modeled using a general purpose finite element code, in which instability is evaluated by Linear Bifurcation Analysis (LBA) and by Geometrically Nonlinear Analysis with Imperfections (GNIA). Tests allowed identifying that an inner vortex is induced which produces a greater depression than the downwind wake in the leeward region of the tank.

Keywords: collapse, finite elements, tanks, wind, wind tunnel.

¹Artículo recibido el 3 de septiembre de 2014 y aceptado para publicación el 1 de diciembre de 2014.

²Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina. E-mail: rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar.

³Ingeniero, Conceptual Servicios de Ingeniería, Neuquén, Argentina. E-mail: estebancicerone@hotmail.com.

⁴Estudiante subgraduado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina. E-mail: cufa_cipo@hotmail.com.

⁵Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina. E-mail: lassigj@yahoo.com.ar.

⁶Director, Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, CONICET-UNC, Profesor Titular Plenario, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional del Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611. Córdoba, Argentina. E-mail: lgodoy@efn.uncor.edu.

INTRODUCCIÓN

La investigación de fallas de estructuras de paredes delgadas es un área en la que resulta importante modelar la respuesta estructural usando diferentes escenarios alternativos, a fin de realizar prueba de hipótesis. Los tanques de almacenamiento de fluidos usados en la industria del petróleo suelen presentar problemas de inestabilidad del equilibrio de manera no esperada que pueden llevarlas a la falla o colapso, ya sea en su etapa constructiva o de operación. Delatte (2009) define el proceso de diseño como formado por dos aspectos, uno asociado a identificar todo lo que puede tener errores y otro vinculado a lograr que eso no suceda. Para ello es necesario conocer las formas en que pueden fallar las estructuras o los sistemas, generando accidentes que pueden causar heridos o muertes, daños totales o bien fallas funcionales. Los códigos de aplicación plantean el diseño generalmente en base a métodos empíricos en los que estas situaciones de falla no suelen ser tenidas en cuenta. Maraveas y Miamis (2013) realizaron una comparación entre el código API 650 y el código europeo EN1993-1-6 intentando evaluar las previsiones fijadas en dichos códigos respecto a seguridad frente a inestabilidad del equilibrio para este tipo de estructuras.

Fallas en etapa constructiva, en general, están asociadas a estados no previstos en el diseño en los que se considera la estructura completa, no teniendo en cuenta que la falta de rigidización global de la estructura puede conducir a debilitamiento frente a acciones como las de viento. Orientado a lograr un mayor conocimiento de la problemática, la posibilidad del trabajo conjunto experimental y numérico permite una mejor definición de las condiciones asociadas a la falla y una evaluación más detallada de los aspectos desencadenantes del proceso que lleva al colapso.

Este trabajo plantea un abordaje acoplado experimental y numérico mediante la realización de ensayos en túnel de viento para evaluar las presiones generadas en el tanque sin techo y posteriormente una modelación numérica con esas cargas de viento para evaluar más detalladamente el mecanismo de colapso. El estudio se refiere a tanques de almacenamiento que fallaron por vientos de moderadas velocidad en una etapa de la construcción de su envolvente cilíndrica y en un estado previo a la instalación del techo cónico que aporta rigidez al conjunto.

Las cáscaras cilíndricas sin techo son muy flexibles y pueden presentar daños por acción de viento, como ha sido estudiado por varios autores en forma numérica. Greiner y Derler (1995) incluyeron la incidencia de imperfecciones en la respuesta del tanque, encontrando que para tanques cortos la sensibilidad era máxima cuando la forma de las imperfecciones coincide con la del autovector de la menor carga de bifurcación. Schmidt et al. (1998) llevaron a cabo análisis computacional sobre tanques con geometría perfecta, para dar recomendaciones sobre la conveniencia de usar rigidizadores anulares que controlan las deformaciones en el borde superior de la cáscara (tal como ocurre en este caso estudiado). Flores y Godoy (1998) consideraron no sólo modelos estáticos sino también modelos de dinámica no lineal, los cuales fueron extendidos por Flores y Godoy (2002) y Sosa y Godoy (2005), concluyendo que para las geometrías comunes de tanques la incidencia de la inercia del tanque vacío bajo viento es despreciable. La evaluación de las frecuencias naturales apoyan esta conclusión, tal como se reporta en Virella et al. (2006). Finalmente, la sensibilidad ante imperfecciones ha sido considerada por Godoy y Flores (2002) y Jaca et al. (2002). Zhao y Yin (2014) estudiaron la respuesta de tanques abiertos de geometría variada bajo cargas de viento analizando su estabilidad mediante análisis de bifurcación lineal (LBA) y análisis no lineal con imperfecciones (GNIA). El estudio consideró tanques aislados evaluando la influencia del fluido almacenado, la variación de espesor en la cáscara cilíndrica y la existencia de una viga de borde. Los autores (Jaca, 2008; Jaca y Godoy, 2010) han estudiado en forma numérica el mecanismo de colapso de tanques en etapa constructiva. Borgersen y Yazdani (2010) también analizaron daños en tanques en etapa constructiva e hicieron recomendaciones para prevenir la falla, pero asociadas a rigidizaciones posibles en la configuración final de los tanques.

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 (MacDonald et al., 1988; Holroyd, 1983; Uematsu y Yamada, 1994). El estudio del patrón de flujos que se desarrolla en el interior de los tanques sin cubierta es poco conocido, pudiéndose rescatar el trabajo de Uematsu et al. (2008), donde se realizaron mediciones simultáneas de presión en las superficies externas e internas de tanques con techo abierto. Pasley y Clark (2000) analizaron el comportamiento del fluido en forma numérica en tanques de techo flotante para diferentes posiciones del techo con el objeto de evaluar la dispersión de contaminantes.

En la Sección 2 se presentan los casos de colapso a estudiar describiendo las estructuras y las condiciones prevalecientes en la zona durante el día de la falla para un estudio de caso. La Sección 3 incluye los resultados obtenidos en los ensayos en túnel de viento y la Sección 4 el estudio numérico de uno de los tanques que colapsaron. Las conclusiones del trabajo se presentan en la Sección 5.

MODELOS ESTUDIADOS

Los casos de colapso que se discuten en este trabajo ya han sido estudiados por los autores de forma numérica (Jaca y Godoy, 2010). Las características geométricas de los tanques que fallaron durante la construcción y las velocidades de viento registradas en el momento de la falla se muestran en la Tabla 1. Ambos tanques están ubicados en la Patagonia Argentina en la cuenca petrolífera Neuquina y el colapso se produjo en horas de la tarde de los días 30 de enero de 2001 y 11 de enero de 2006, respectivamente.

Tabla 1: Características de casos de estudio.

		Tanque A	Tanque B
Diámetro [m]		31.00	14.70
Altura envolvente [m]		9.00	9.75
Altura en momento de colapso [m]		7.50	9.00
Espesor envolvente		3/16"	1/4"
Material		ASTM A-36	F-24
Velocidades de colapso	[km/h]	57.9	64.4
	[m/s]	16.08	17.89

Los informes asociados a la falla identificaron la acción causante como el viento y el modo de falla debido a pandeo (pérdida de la geometría original). Los tanques estaban en etapa de construcción, y al inicio de la jornada se encontraban instaladas y soldadas chapas de cuatro y cinco niveles, respectivamente, cubriendo la circunferencia del tanque (virolas). En la parte inferior las chapas se encontraban soldadas al fondo mediante puntadas de soldadura de 20 mm cada 0.50 m de distancia. En horas de la mañana se montaron las chapas correspondientes a cada nivel siguiente (quinta y sexta virolas). Al inicio de la jornada el tiempo era bueno, con sol y sin viento. Las velocidades de viento aumentaron en horas de la tarde y las mostradas en la Tabla 1 corresponden a velocidades de ráfaga registradas en la zona de los aeropuertos más próximos (Neuquén y Rincón de los Sauces, respectivamente). Estas son velocidades bajas comparadas con las que deberían resistir un tanque en su configuración final, superiores a 150 km/h. La Figura 1 muestra la condición de falla de ambas estructuras, vista de frente.



Figura 1: Estructuras colapsadas: (a) tanque A; (b) tanque B.

ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO

Descripción de equipamiento y condiciones de ensayos

Los experimentos se realizaron en el Laboratorio de Capa Límite y Fluido-dinámica Ambiental (LaCLyFA) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Este es un túnel de viento de Capa Límite Atmosférica de circuito cerrado, con una sección de prueba de $1.4 \times 1.0 \text{ m}^2$. 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 20m/s (medida al centro de la sección transversal). El aire pasa por un panel de abejas que le da simetría axial y, a posteriori, atraviesa un conjunto de perfiles horizontales, con capacidad de girar alrededor de sus ejes, cuyo objetivo es la generación de turbulencia, la cual se varía según la posición relativa de cada perfil respecto del viento incidente. El túnel también posee una serie de tacos en el piso que simulan la rugosidad el terreno. El perfil de velocidad del viento medio se modeló con una ley de potencia, cuyo exponente fue de aproximadamente 0,165. La Figura 2(a) muestra una vista lateral del área de ensayos mientras que en la Figura 2(b) se observa la sección de prueba desde el interior.

Se efectuaron dos tipos de ensayos, uno sobre modelos rígidos para obtener adecuadas medidas de presión, tanto externa como interna, en los modelos de tanques y así deducir el coeficiente de presión (C_p) como se muestra en la Figura 2(b). Otros ensayos se realizaron sobre modelos flexibles para determinar el comportamiento de los tanques relacionado a inestabilidad del equilibrio frente a cargas de viento (Figura 2(a)). Se ensayaron dos modelos con diámetros externos de 0.40 m cada uno: el modelo A tiene una esbeltez $H/D = 0.2425$ con una escala geométrica de $\alpha_A = 77.5$ entre el prototipo y el modelo; el modelo B tiene una esbeltez $H/D = 0.6125$ en escala geométrica de $\alpha_B = 36.75$ entre el prototipo y el modelo.



Figura 2: Sección de prueba de túnel de viento: (a) vista exterior, Modelo A; (b) vista interior, Modelo B.

Para medir las presiones se utilizó el Sistema NetScanner de sensores electrónicos de presiones de 128 canales, que es un sistema de adquisición de presión multicanal basado en unidades de presión psi. Las tomas de presión de 0.5 mm de diámetro se instalaron según se indica en la Figura 3, tanto en la superficie externa, el fondo, como en la superficie interna, resultando 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.

Se midieron velocidades con un anemómetro de hilo caliente portátil marca DANTEC con brazo telescópico. Las velocidades del viento se midieron a una altura equivalente de 10 m para ambos prototipos. La Figura 4 ilustra la posición para la medición del anemómetro de hilo caliente realizada en el túnel de viento. En ambos casos esa posición representa una altura equivalente a 10 m en los tanques reales. Se realizaron los ensayos a tres velocidades de viento: 7.5 m/s, 10.3 m/s y 18.0 m/s, con números de Reynolds que variaron desde 2.1×10^5 hasta 4.8×10^5 .

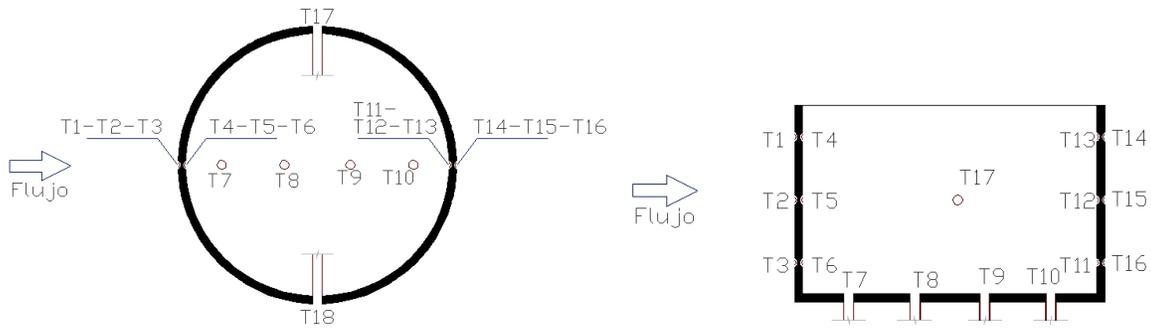


Figura 3: Configuración y nomenclatura de tomas.

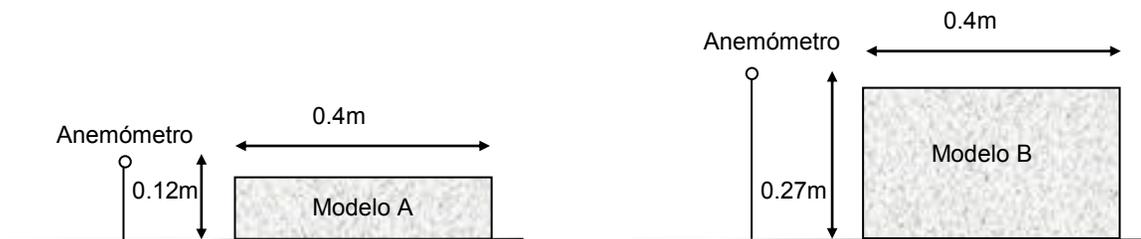


Figura 4: Posición del anemómetro para los ensayos en túnel de viento.

La escala cinemática del ensayo se define en función de la escala geométrica (α) de cada modelo y considerando la similitud de Froude, que relaciona inercia con gravedad, y resulta que la escala cinemática de velocidades (β) es:

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

con valores $\beta_A = 8.79$ para el modelo A ($\alpha_A = 77.5$) y $\beta_B = 6.06$ para el modelo B ($\alpha_B = 36.75$).

Para la semejanza dinámica (γ) se asume que el coeficiente de arrastre es el mismo para el modelo y el prototipo, dando como resultado la siguiente relación de escala de fuerza:

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

con factor de escala dinámica $\gamma_A = 465.5$ para el modelo A y $\gamma_B = 49.8$ para el modelo B.

Estos parámetros de semejanza representan en los modelos a ensayar dimensiones y velocidades de viento que se muestran en la Tabla 2 para cada modelo estudiado.

Tabla 1: Características de casos de estudio.

Caso de análisis	Dimensiones geométricas (α)		Velocidades de colapso (β) (m/s)
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	
Modelo A	40	9.67	1.83
Modelo B	40	24.49	2.95

Descripción de ensayos dinámicos

En trabajos anteriores se determinó que la falta de continuidad en los apoyos es un aspecto importante en el desarrollo del mecanismo de colapso y el hecho que el tanque estuviera en condición de simplemente apoyado durante la etapa constructiva. En esos estudios el efecto del viento dentro del tanque fue evaluado a través de disposiciones reglamentarias que fijan una succión interior, pues no se disponía de información medida por ensayos. Por estos motivos se desarrolló un programa de ensayos tendientes a evaluar estos aspectos. Por un lado se ensayaron modelos flexibles para evaluar cualitativamente la influencia de la condición de apoyo, y además se realizaron modelos rígidos para estudiar el patrón de flujo que se desarrolla en el interior de los tanques sin cubierta y medir los coeficientes de presión (interiores y exteriores) que genera el viento.

Para los ensayos dinámicos, se variaron las condiciones de apoyo del tanque y las condiciones de vinculación entre la cáscara y el fondo, registrando las velocidades en el momento de levantamiento del fondo y pandeo de la cáscara. Las condiciones de apoyo del tanque se variaron mediante el cambio de distribución de pesos en el fondo y con delgadas cintas adhesivas igualmente espaciadas según el análisis de semejanzas, como se muestra en la Figura 5. El material usado para ambos modelos son láminas de aluminio con módulo de elasticidad $E = 7 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ (espesor = 61.4 μm). Al considerar la semejanza dinámica con el Modelo A, dicho material resultó muy rígido conduciendo a valores muy altos de velocidad que produce el colapso, razón por la cual será necesario realizar otro conjunto de ensayos para este modelo con un material más flexible. Para el modelo Modelo B, la semejanza dinámica resultó adecuada y en la Tabla 3 se muestran las velocidades registradas para las diferentes condiciones de apoyo. La condición de apoyo A corresponde a un semicírculo a barlovento libre con soldaduras cada 0.50m, la condición de apoyo B igual a anterior pero con puntos de soldadura más espaciados y la denominada C con un punto fijo a barlovento.

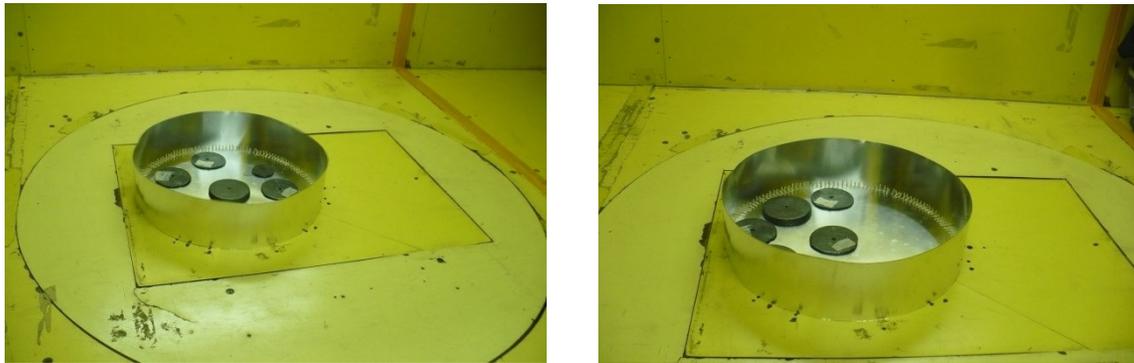
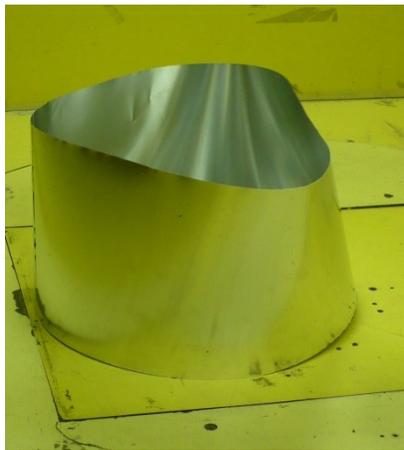


Figura 5: Representación de diferentes condiciones de apoyo en los ensayos dinámicos.

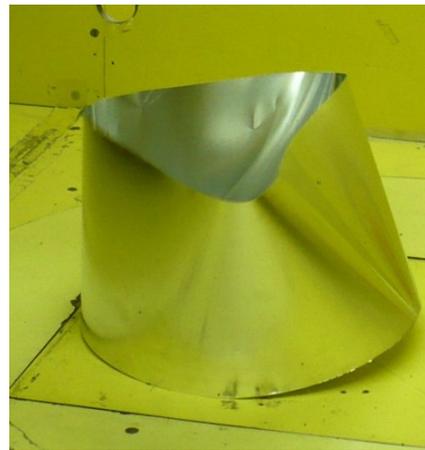
Tabla 3: Caracterización de apoyos y velocidades registradas en ensayos.

APOYO	Puntos de soldadura	FONDO	PANDEO (modelo)	PANDEO (prototipo)
A	Cada 13.6mm	1.5m/s-eleva el fondo.	3m/s	66km/h.
B	Cada 27.2mm	2.5m/s-eleva el fondo.	2.7m/s	59km/h
C	Nodo a barlovento fijo y libre hasta los 90°.	2.3m/s-eleva el fondo.	2.5m/s	55km/h

Al modificar las condiciones de los apoyos y separación entre soldaduras, las evidencias de levantamiento del fondo y pandeo de la cáscara se modifican generando deformadas como las mostradas en la Figura 6. Se puede observar que las velocidades de pandeo en los modelos, entre 2.5m/s y 3m/s, vinculadas con el prototipo a través de la semejanza cinemática β_B son semejantes a las que ocurrieron en el tanque verdadero y que reproducen la deformada final mostrada en la Figura 1(b).



(a)



(b)

Figura 6: Deformadas de Modelo B en túnel de viento; (a) condición de apoyo A, (b) condición de apoyo B.

Medición de presiones y velocidades

Mediante la medición de presión estática en las superficies externas e internas de los tanques, en los ensayos se pudo cuantificar el valor de la succión producida por el vórtice en el interior de los tanques. Las tomas estáticas T17 y T18 son las laterales (a 90° y 270° respectivamente). Las Tablas 4 y 5 indican los valores de C_p medios en cada toma estática en ambos tanques para tres distintas velocidades de viento de ensayo. La Figura 7 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, denominadas desde T1 hasta T16. La Figura 7(a) muestra los valores medidos en cada toma de presión mientras que en la Figura 7(b) se presentan las diferencias entre los valores medidos a barlovento y sotavento, representando la acción neta sobre cada pared. En la Figura 7(c) se representan los valores correspondientes a la succión interna solamente, que permiten cuantificar el vórtice interior que se genera en la cavidad, sobre las paredes a barlovento, sotavento y en el fondo del tanque. El valor indicado en el centro del tanque representa un valor de succión constante en todo el interior, del tipo de lo que indican los reglamentos. Para estos casos ASCE-7-10 (2010) y el Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones (CIRSOC 102, 2005) establecen una succión interior de valor 0.18 clasificando los tanques como cerrados, ya que no cumplen con las condiciones necesarias para edificio abierto o parcialmente abierto. Este valor resulta inferior al evaluado para ambos tanques.

Tabla 4: Coeficientes de presión medios medidos en Modelo A, para velocidades (V) en m/s.

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 medidos en Modelo B, para velocidades (V) 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

MODELACIÓN COMPUTACIONAL

Estudios anteriores realizados por los autores (Jaca, 2008; Jaca y Godoy, 2010) utilizaron una representación de la carga de viento dada por Rish (1967), considerando una distribución de presión constante en la dirección vertical. Con el objeto de comparar resultados con dichos estudios, en este trabajo se usa esta misma distribución circunferencial aplicada como acción exterior en la cáscara cilíndrica adicionando los coeficientes de presión medidos en los ensayos para representar el vórtice interno. Las presiones exteriores están dadas por:

$$q = \lambda \sum_{i=1}^n c_i \cos(i\theta) \quad (3)$$

con los siguientes coeficientes de Fourier: $C_0 = 0.387$, $C_1 = -0.338$, $C_2 = -0.533$, $C_3 = -0.471$, $C_4 = 0.166$, $C_5 = 0.0666$, $C_6 = 0.055$, donde q es la presión externa del viento, λ es el parámetro usado para aumentar la carga y θ es el ángulo con respecto a la dirección del viento. El vórtice medido fue considerado en el modelo como una succión constante en las paredes del tanque de valor 0.56 y en el piso del tanque un valor único de 0.42.

La simulación se realizó para el tanque denominado Modelo B con el objeto de analizar numéricamente la influencia en la respuesta de la estructura del vórtice interior medido en el ensayo. Para ello se utilizó el programa de propósitos generales ABAQUS (2006) que permite discretizar por elementos finitos la pared cilíndrica del tanque y el fondo del mismo con elementos cuadrilaterales de cáscara de ocho nudos, denominados S8R5, y triangulares de 6 nodos, denominados STRI65. Dada la condición de simetría de la carga y la estructura se modela la mitad del tanque y se incluyen diferentes condiciones de apoyo para representar la falta de continuidad existente por las características de la etapa constructiva. En los estudios anteriores se analizaron diferentes escenarios que permitan reproducir el mecanismo del colapso, degradando la integridad de la estructura por la posibilidad de desprendimiento de los puntos de soldadura y de levantamiento del fondo del tanque. El material del tanque es acero con un módulo de elasticidad $E = 210$ GPa y módulo de Poisson $\mu = 0.3$.

Con el objeto de reproducir el mecanismo de falla se plantean estudios estáticos en diferentes etapas: por un lado se realiza un análisis de autovalores lineal (LBA) para evaluar cargas críticas y además se efectúa un estudio de seguimiento de trayectoria considerando no linealidad geométrica incluyendo imperfecciones geométricas (GNIA) para intentar reproducir la deformada final observada en el tanque colapsado, relacionando en todos los casos las cargas máximas halladas con las velocidades de viento. Con el objeto de relacionar las cargas críticas halladas con velocidades del viento, se recurrió a las especificaciones de ASCE-7-10 (2010). En ambos casos la presión ejercida por el viento se vincula con la velocidad a través de la siguiente expresión:

$$q = 0.613 K_z K_{zt} K_d I V^2 \quad (4)$$

donde V es la velocidad básica del viento expresada en m/s y q es la presión dinámica básica ejercida por el viento expresada en N/m^2 , K_{zt} es el factor topográfico cuyo valor para terreno plano es $K_{zt} = 1$, K_d es el factor de direccionalidad del viento, usado en combinación de cargas, adoptando en este caso el valor $K_d = 1$, I es el factor de importancia, que para Categoría II adopta el valor $I = 1$, y K_z es el factor de exposición a presión dinámica con valor $K_z = 0.94$.

La carga crítica que corresponde a la condición de apoyo continuo es de 1.60 kN/m^2 que resulta menor que el valor de 2.38 kN/m^2 considerando la succión interior prevista en la reglamentación ASCE-7-10. Si bien la carga crítica hallada con la inclusión de la presión correspondiente al vórtice interno presenta un factor de reducción $\eta = 0.68$, al vincular esta carga crítica con la velocidad de viento mediante la ecuación (4) se obtiene un valor de 189 km/h que resulta muy superior al registrado en el momento del colapso.

En la simulación se realiza un análisis de seguimiento de trayectoria mediante el método de Riks (1972, 1979) con imperfecciones geométricas según la forma del primer modo crítico. Se considera una magnitud de imperfección de orden del espesor de la cáscara ($\xi/t = 1$) y se evalúan diferentes condiciones de apoyo que incluye un apoyo continuo, puntadas de soldadura cada 0.50 m y posteriormente diferentes posibilidades para representar la separación entre el fondo del tanque y la cáscara envolvente, similares a las consideradas en los estudios anteriores.

A medida que se van degradando las condiciones de apoyo las cargas máximas alcanzadas van disminuyendo. La Figura 9 muestra las trayectorias de equilibrio para diferentes condiciones de apoyo obtenidas considerando la succión interior del vórtice medido en el ensayo. En la Tabla 6 se presentan las cargas máximas (λ_{max}) halladas bajo estas características de cargas interiores y exteriores y también las obtenidas con las mismas cargas exteriores pero con la succión indicada en el reglamento.

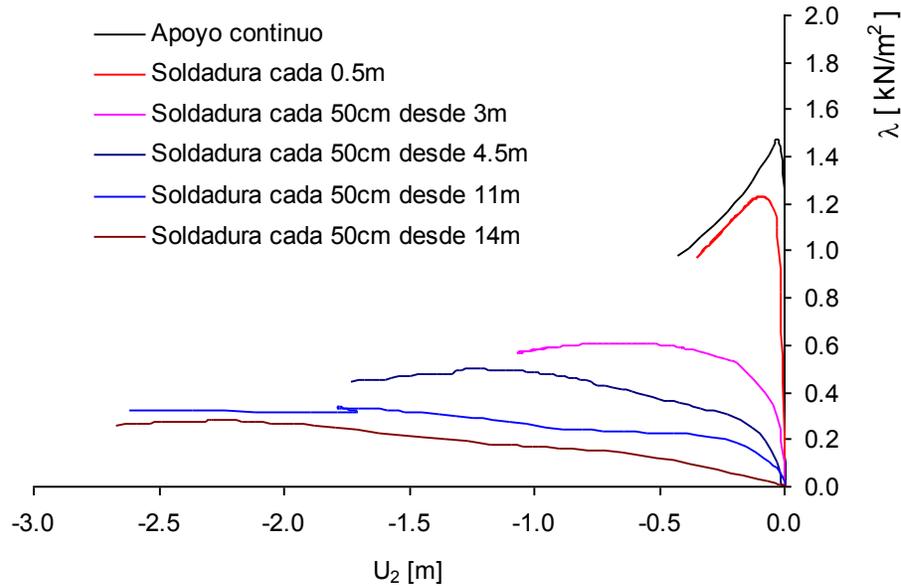


Figura 9: Trayectorias de equilibrio en nodo en borde superior, sobre el meridiano de incidencia del viento.

Tabla 4: Coeficientes de presión medios medidos en Modelo A, para velocidades (V) en m/s.

Condición de la base	Succión medida		Succión reglamento	
	λ_{max} [kN/m ²]	V [km/h]	λ_{max} [kN/m ²]	V [km/h]
Apoyo continuo	1.474	181.8	1.644	192.3
Soldadura cada 50 cm	1.231	166.4	1.522	185.0
Soldadura cada 50 cm desde 3 m	0.610	117.1	1.281	169.0
Soldadura cada 50 cm desde 4.5 m	0.499	105.9		
Soldadura cada 0.5 m desde 11 m, con nodo restringido a barlovento	0.336	90.7	0.428	98.1
Soldadura cada 0.5 m desde 14 m, con nodo restringido a barlovento	0.285	80.10	0.363	90.3

Se puede observar que la existencia del vórtice medido y no correctamente evaluado por reglamentos no logra explicar por sí solo el colapso del tanque en etapa constructiva a velocidades tan bajas como las registradas en el momento de la falla. Es necesario también incluir en la modelación la posibilidad de levantamiento del fondo del tanque como elemento importante para poder explicar el mecanismo de falla.

Las velocidades halladas son algo superiores a las registradas en el Aeropuerto de Rincón de los Sauces indicadas en la Tabla 1, pero la batería de tanques donde se produjo el colapso está ubicada a 25-30 km al Noroeste de la población y puede presentarse una variación en la velocidad de las ráfagas debido a que la zona del colapso es descampada y no posee vegetación, mientras que el aeropuerto está próximo a la población presentando una mayor rugosidad superficial.

Las Figuras 10(a), (b) y (c) muestran la deformada obtenida, resaltando los desplazamientos horizontales según el eje de simetría, y los desplazamientos verticales con un punto de vista desde el interior del tanque y del exterior, respectivamente. La Figura 11 muestra la compatibilidad obtenidas entre la fotografía de la estructura colapsada, el modelo ensayado en túnel de viento y el tanque modelado numéricamente.

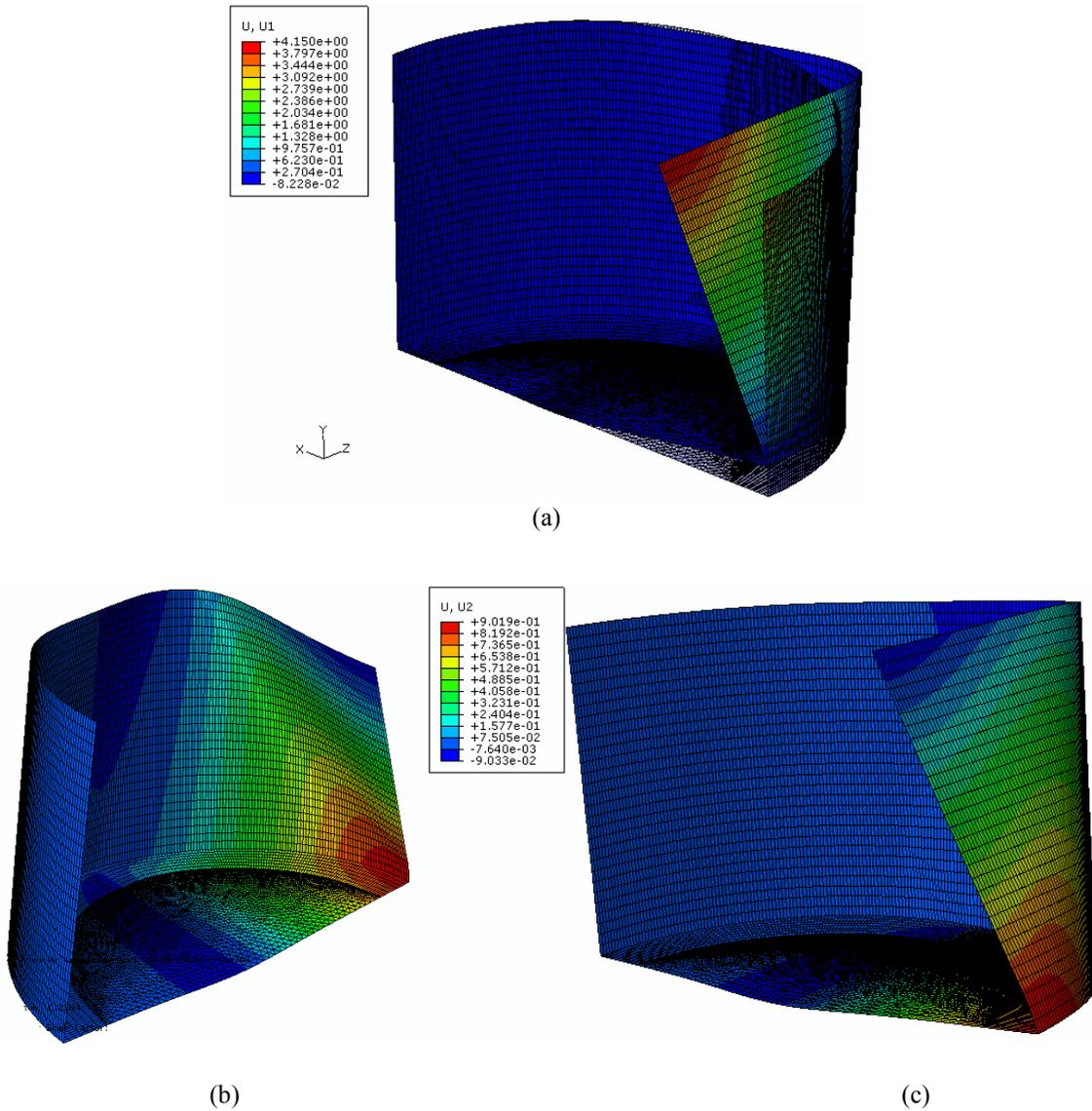


Figura 10: Deformadas del Tanque B, (a) desplazamientos horizontales, (b) desplazamientos verticales, vista interior, (c) desplazamientos verticales, vista exterior.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizaron ensayos en túnel de viento sobre modelos de tanques abiertos para describir y evaluar el comportamiento fluido-dinámico del viento en el interior de tanques de petróleo sin cubierta. Posteriormente con las presiones medidas se simuló numéricamente la respuesta de los tanques en etapa constructiva que colapsaron a velocidades de viento muy por debajo de la de diseño.

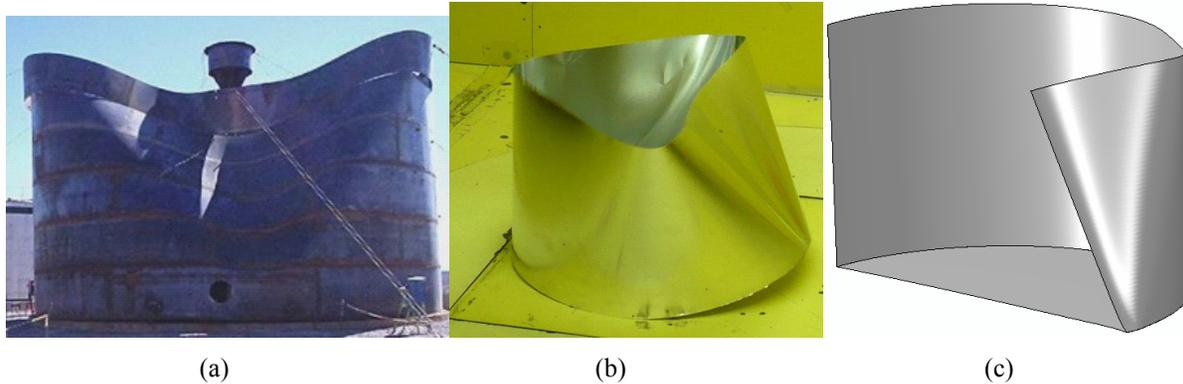


Figura 11: Comparación de deformadas, (a) tanque colapsado, (b) modelo ensayado, (c) modelo numérico.

En el ensayo de tanques rígidos, las mediciones de presiones interiores y exteriores en las paredes laterales 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 fluido-dinámico, 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.

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.

La evaluación de la respuesta estructural de los tanques muestra que la presencia del vórtice disminuye las cargas a las que se produce el colapso pero, para que dicho mecanismo se desarrolle, es necesario que pueda ocurrir un levantamiento del fondo del tanque. Esta característica está presente durante el proceso constructivo ya que es una práctica usual que los tanques sean anclados solamente por requerimientos de estabilidad frente a carga de viento con una condición de tanque con fluido interior para la etapa de operación.

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 Sebastián Delnero, Jorge Colman Lerner y Julio Marañón Di Leo. El trabajo de LAG fue apoyado mediante subsidios de SECYT-UNCordoba y CONICET (PIP 0126).

REFERENCIAS

- Hibbitt, Karlsson y Sorensen (2002). “ABAQUS/CAE User's Manual: Version 6.3”, Providence, Rhode Island.
- API Standard 650 (2010). “Welded steel tanks for oil storage”, American Petroleum Institute, Washington, D.C.
- ASCE/SEI 7-10 (2010). *Minimum Design Loads for Building and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

- Borgersen, S. y Yazdani, S. (2009). "Finite element analysis of wind induced buckling of steel tank", Chapter 24 in: *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, Ghafoori, N., Editor, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 157-171.
- CEN (2007). "Eurocode 3-Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures", European Standard EN 1993-1-6, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- CIRSOC 102 (2005). "Acción del Viento Sobre las Construcciones", Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires, Argentina.
- Delatte, N.J. (2009). *Beyond Failure. Forensic Case Studies for Civil Engineering*, ASCE Press, Reston, Virginia.
- Flores, F.G. y Godoy, L.A. (1998). "Buckling of short tanks due to hurricanes", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 752-760.
- Godoy, L.A. y Flores, F.G. (2002). "Imperfection-sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks", *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 13. No. 5, pp. 533-542.
- Greiner, R. y Derler, P. (1995). "Effect of imperfections on wind-loaded cylindrical shells", *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 23, pp. 271-281.
- Holroyd, R.J. (1983). "On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds (Part 1)", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 12, pp. 329-352.
- Jaca, R.C. y Godoy, L.A. (2010). "Wind buckling of metal tanks during their construction". *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 453-459.
- Jaca, R.C., Godoy, L.A. y Flores, F.G. (2002). "Análisis poscrítico de tanques de pared delgada bajo cargas de viento", *Mecánica Computacional*, Vol. 21, pp. 1842-1861.
- Jaca, R.C. (2008). "Límites inferiores en inestabilidad de láminas de tanques de pared delgadas", Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- MacDonald, P.A., Kwok, K.C.S. y Holmes, J.D. (1988). "Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 31, pp. 165-187.
- Maraveas, C. y Miamis, K. (2013). "Shell buckling evaluation of thin-walled steel tanks filled at low liquid level according to current design codes", *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council*, St. Louis, Missouri.
- Pasley, H. y Clark, C. (2000). "Computational fluid dynamics study of flow around floating-roof oil storage tanks", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 86, pp. 37-54.
- Riks, E. (1972). "The application of Newton's method to the problem of elastic stability", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 39, pp. 1060-1065.
- Riks, E. (1979). "An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 15, pp. 529-551.
- Rish, R.F. (1967). "Forces in cylindrical shells due to wind", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 36, pp. 791-803.
- Schmidt, H., Binder, B. y Lange, H. (1998). "Postbuckling strength design of open thin-walled cylindrical tanks under wind load", *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 31, pp. 203-220.
- Sosa, E.M. y Godoy, L.A. (2005). "Non-linear dynamics of above-ground thin-walled tanks under fluctuating pressures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 283, pp. 201-215.

- Uematsu, Y. y Yamada, M. (1994). "Aerodynamic forces on circular cylinders of finite height", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 51, pp. 249-265.
- Uematsu, Y., Coo, Ch. y Kondo, K. (2008). "Wind loads on open-topped oil storage tanks", *Proceedings of the VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics and Application*, Milano, Italy, pp. 20-24.
- Virella, J.C., Godoy, L.A. y Suárez, L.E. (2006). "Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake loadings", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp. 521-531.
- Zaho, Y. y Lin, Y. (2014). "Buckling of cylindrical open-topped steel tanks under wind load", *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 79, pp. 83-94.