

ANALISIS DE LA FALLA DE UN TANQUE METALICO BAJO LA ACCIÓN DEL VIENTO

Rossana C. Jaca *, Luis A. Godoy &

* Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina. TE: 54-(0299)-4490300–Interno 486
e-mail: rjaca@uncoma.edu.ar, web page: <http://www.uncoma.edu.ar/>

& Departamento de Estructuras, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba
Casilla de Correo 916, Córdoba 5000, Argentina
e-mail: lgodoy@com.uncor.edu

Palabras clave: Viento, Comportamiento poscrítico, Elementos Finitos, Falla estructural, Pandeo, Tanques.

Resumen. *En la región patagónica se encuentran tanques metálicos para almacenamiento de petróleo o sus derivados, que deben resistir fuertes vientos estacionales. Estas estructuras presentan una condición crítica ante problemas de inestabilidad del equilibrio bajo la acción del viento. En este trabajo se realiza un análisis computacional de un tanque (que estaba diseñado con techo cónico) ubicado en la zona Norte de la Patagonia que falló bajo viento durante su etapa constructiva. En el momento del colapso no se había llegado en la construcción al nivel del techo, resistiendo la acción del viento solamente la cáscara cilíndrica. Se pretende relacionar los resultados obtenidos en la simulación numérica con el daño observado en el tanque colapsado y vincularlo con las velocidades de viento registradas en el momento del colapso. El estudio se realiza a través de una modelación del tanque por elementos finitos mediante un análisis estático, considerando no linealidad geométrica. Dado que la estructura colapsada presenta grandes desplazamientos compatibles con estados poscríticos avanzados, se realiza un análisis de seguimiento de trayectoria que permite seguir la evolución de la respuesta carga-desplazamiento incluyendo imperfecciones geométricas. Se realiza un análisis de las condiciones de apoyo del tanque en el momento del colapso ya que, por el proceso constructivo, no presentaba un cordón de soldadura continuo sino puntos de soldadura cada 0.50m, observándose un posterior desprendimiento del fondo en el estado final de la estructura colapsada.*

1 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. Este trabajo informa sobre la falla de un tanque para almacenamiento de combustibles ocurrido recientemente en Argentina, en el que la falla está asociada a inestabilidad de la cáscara y para el que se ha modelado la respuesta estructural en detalle.

Los problemas de pandeo presentan la característica que dejan en la estructura una clara modificación en la geometría. Por una parte, esa modificación se interpreta como un modo de pandeo y puede compararse con resultados de modos obtenidos mediante simulación computacional. Por otra parte, el modo detectado en la estructura real no es el modo elástico inicial, sino que presenta características adquiridas por modificaciones durante grandes desplazamientos en las que aparece plasticidad. Una adecuada simulación del modo real requiere de un análisis no lineal incremental, incluyendo la no linealidad geométrica y mecánica. Por el contrario, un análisis de bifurcación sólo representa el comportamiento inicial de la estructura perfecta, pero en muchos casos da una idea del tipo de deformación esperable. La existencia de imperfecciones es importante en los problemas no lineales incrementales y debe ser tenida en cuenta en la modelación.

Hay varios autores que han estudiado problemas de pandeo de cáscaras bajo viento usando una formulación computacional (principalmente usando elementos finitos). Flores y Godoy ¹ usaron análisis de bifurcación comparando modelos para pandeo de tanques bajo viento. Greiner and Derler ⁵ incluyeron la incidencia de imperfecciones en la respuesta del tanque, encontrando que para tanques cortos la sensibilidad era máxima cuando su forma coincidía con la del autovector de la menor carga de bifurcación. Schmidt et al. ⁸ 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 ocurren en este caso estudiado). Flores y Godoy ² consideraron no sólo modelos estáticos sino también modelos de dinámica no lineal, los cuales fueron extendidos en Flores y Godoy ³ y Sosa y Godoy ⁹, concluyendo que para las geometrías comunes de tanques la incidencia de la inercia del tanque vacío bajo viento era despreciable. La evaluación de las frecuencias naturales apoyan esta conclusión, tal como se reporta en Virella et al. ¹⁰. Finalmente, la sensibilidad ante imperfecciones ha sido considerada por Godoy y Flores ⁴ y Jaca et al. ⁶.

En la Sección 2 se describen la estructura estudiada, las condiciones prevalecientes en la zona durante el día del colapso, y el mecanismo descrito por observadores del colapso. El modelo computacional adoptado se encuentra en la Sección 3. Las Secciones 4 y 5 contienen resultados provenientes de dos modelos, uno considera sólo la estructura cilíndrica, mientras que el segundo contempla también el fondo del tanque como parte del modelo. Finalmente, las conclusiones del trabajo se presentan en la Sección 6.

2 TANQUE ESTUDIADO, MECANISMO DE FALLA Y CONDICIONES EN EL MOMENTO DE LA FALLA

El tanque metálico estudiado está ubicado en la Patagonia Argentina, tiene diámetro $\phi = 15.5\text{m}$, y estaba prevista una altura de $H = 9\text{m}$; sin embargo, la falla ocurrió cuando la altura alcanzada durante la construcción era de $h = 7.5\text{m}$. El tipo de chapa usado está caracterizada como ASTM A-36, con espesor 3/16".

Los informes asociados a la falla identifican la acción causante como el viento en la tarde del 30 de enero, y el modo de falla debido a pandeo (pérdida de la geometría original). El tanque estaba en etapa de construcción, y al inicio de la jornada se encontraban instaladas y soldadas chapas de cuatro niveles 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 montó el quinto nivel de chapa, completándose la soldadura con el cuarto nivel hacia el mediodía.

Al inicio de la jornada el tiempo era bueno, con sol y sin viento. Las velocidades de viento aumentaron en horas de la tarde, con ráfagas registradas en la zona del aeropuerto de Neuquén superiores a 45 km/h. Esta es una velocidad relativamente baja para un tanque en su configuración final, en cuyo caso se supone que debe resistir ráfagas superiores a 150 km/h. Los registros de datos meteorológicos se obtuvieron de Internet y se muestran en la Tabla 1, en base a datos del Servicio Meteorológico Nacional registrados en el Aeropuerto Internacional del Neuquén.

Tabla 1. Condiciones en Neuquén, Argentina, el 30 de Enero de 2001.

Temperatura promedio	77.2 °F / 25.1 °C
Temperatura máxima	94.6 °F / 34.8 °C
Temperatura mínima	59.9 °F / 15.5 °C
Cooling Degree Days	12
Growing Degree Days	27 (Base 50 °F / 9 °C)
Nivel de Rocío	32.0 °F / -0.0 °C
Precipitación	0.02 pul / 0.05 cm
Profundidad de nieve	-
Presión habitual	28.6 pul / 967.1 hPa
Presión al nivel del mar	29.5 pul / 997.4 hPa
Visibilidad	7.6 Millas / 12.2 Kilómetros
Velocidad del viento	18.0 mph / 28.9 km/h
Velocidad máxima del viento	27.5 mph / 44.3 km/h
Ráfaga	31.1 mph / 50.0 km/h
Hechos	Lluvia

El trabajo de soldadura entre la cuarta y la quinta virola se debió suspender debido a

oscilaciones en la cáscara, con amplitudes máximas del orden de 0.30 m. Debido a esos movimientos se realizó arriostramiento adicional de la estructura. La falla se produjo a las 18:10 hs, con deformaciones hacia adentro en los cuatro primeros niveles y hacia fuera en el quinto. La Figura 1 muestra la condición de falla de la estructura, vista de frente.



Figura 1: Estructura colapsada, en la que se aprecian las virolas y el levantamiento de parte de la soldadura entre el primer nivel y el fondo del tanque.

3 MODELO COMPUTACIONAL

Básicamente se consideraron dos modelos de discretización de la estructura, y para cada uno se llevaron a cabo diversos estudios de pandeo.

Modelo 1: El tanque fue inicialmente modelado con elementos de cáscara denominados S8R5 con 20 divisiones en altura y un total de 4000 elementos. Cada elemento tiene un desarrollo sobre la circunferencia de aproximadamente 0.25m, por lo tanto cada dos elementos se considera un nodo como apoyo fijo y el resto sin restricciones en la unión entre la cáscara y la fundación para simular los puntos de soldadura.

Para evaluar la falta de continuidad en la condición de apoyo se realizó un análisis de pandeo de autovalores lineal considerando un apoyo fijo continuo y luego la condición de puntadas de soldadura cada 0.50m. También se consideraron resortes sobre el borde inferior, con rigideces menores a las provistas por una unión continua entre cáscara y fondo de tanque.

Modelo 2: Debido a la dificultad que representa la evaluación adecuada de la rigidez de resortes a considerar en el modelo (como una forma de evaluar el levantamiento que sufre el tanque por acción del viento), se decidió modelar el piso del tanque y dejar que se deforme según la rigidez del mismo. Se modeló parte del piso ya que el tamaño del modelo es decisivo en el trabajo de seguimiento de trayectoria, colocándose apoyos dobles como condición de

contorno en el límite del piso considerado. Se ilustra la malla de elementos finitos en la Figura 2.

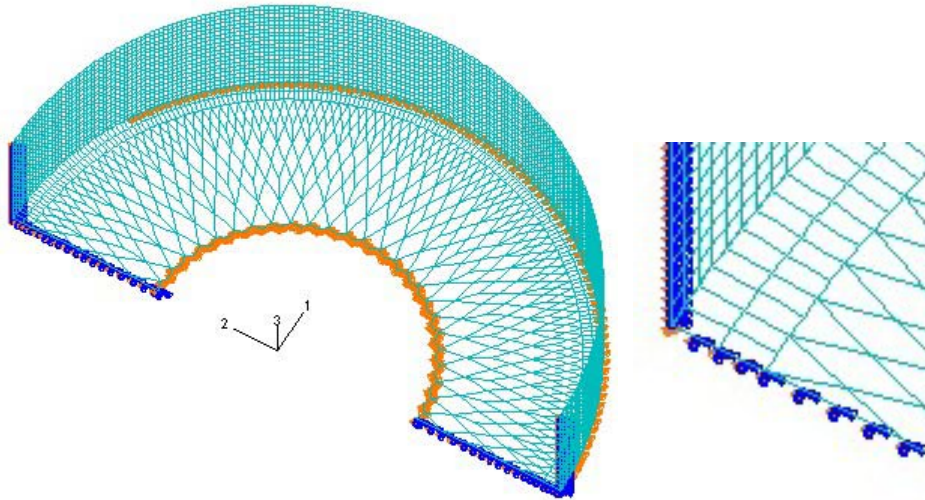


Figura 2 : Modelo incluyendo el fondo del tanque.
(a) Apoyos cada 0.5m con sector libre a barlovento. (b) Detalle del apoyo.

La distribución de presión de viento adoptada sobre el tanque es la correspondiente a la recomendación ACI-ASCE-1991, considerando una distribución de presión constante en la dirección vertical. La distribución circunferencial aplicada en la cáscara cilíndrica para ambos modelos analizados es:

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

con los siguientes coeficientes de Fourier: $C_0=0.2765$, $C_1=-0.3419$, $C_2=-0.5418$, $C_3=-0.3872$, $C_4=-0.0525$, $C_5=0.0771$, $C_6=0.0039$, $C_7=-0.0341$, donde q es la presión externa del viento, λ es el parámetro usado para aumentar la carga y φ es el ángulo con respecto a la dirección del viento.

Con el objeto de relacionar las cargas críticas halladas con velocidades del viento, se recurrió a las especificaciones del CIRSOC vigente, la reglamentación CIRSOC en etapa de evaluación y de ASCE, con las siguientes expresiones:

- Norma CIRSOC vigente

$$q = 0.000613 V_0^2 \quad (2)$$

siendo V_0 la velocidad básica de diseño expresada en [m/s] y q la presión dinámica básica ejercida por el viento expresada en [kN/m²].

- Norma CIRSOC en etapa de evaluación

$$q = 0.613 K_z K_{zt} K_d I V^2 \quad (3)$$

siendo V la velocidad básica del viento expresada en [m/s] y q 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 adopta para Categoría II el valor $I = 1$ y K_z es el factor de exposición a presión dinámica con valor $K_z=0.94$.

- ASCE

$$q = 0.004824 C_s V^2 \quad (4)$$

siendo V la velocidad del viento expresada en [km/h] , q la presión ejercida por el viento expresada en [kg/m^2] y C_s un coeficiente de forma de la estructura con un valor $C_s= 1.3$.

Con el objeto de reproducir el mecanismo de falla se realizaron estudios estáticos en diferentes etapas: por un lado se realizó un análisis de autovalores lineal para evaluar cargas críticas y además se realizó un estudio de seguimiento de trayectoria considerando no linealidad geométrica incluyendo imperfecciones geométricas 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.

4 RESULTADOS PARA TANQUE SIN INCLUIR EL PISO

4.1 Análisis de bifurcación con el Modelo 1

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos para la carga crítica en cada caso, observándose una reducción de la carga crítica de pandeo λ_c por la discontinuidad del apoyo. Analizando la imagen del tanque colapsado hay un sector donde la cáscara está desprendida del apoyo. Para analizar ese efecto se fueron separando los puntos de soldadura para ver su influencia sobre el valor de la carga crítica. En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 2: Carga crítica para diferentes condiciones de apoyo, obtenidas mediante análisis de autovalores (bifurcación).

Apoyo	λ_c [kN/m^2]
Continuo	0.456
Puntadas de soldadura cada 0.5m	0.413
Puntadas de soldadura cada 1.0m	0.383
Puntadas de soldadura cada 2.0m	0.337

En las Figuras 3-5 se muestra la deformada correspondiente al modo de pandeo en la zona del apoyo para las diferentes condiciones de apoyo consideradas. Comparando las deformadas correspondientes a los diferentes casos analizados, se observa que los nodos correspondientes al apoyo tienden a desplazarse según una tendencia que depende de la zona considerada es hacia adentro o hacia fuera y que los puntos de soldadura puntualmente los llevan a una posición fija. Si estos puntos de soldadura desaparecen, como se observa en la foto del tanque colapsado, las tres figuras irían indicando una secuencia de deformación. En la Tabla 3 se resumen los valores hallados en cada caso.

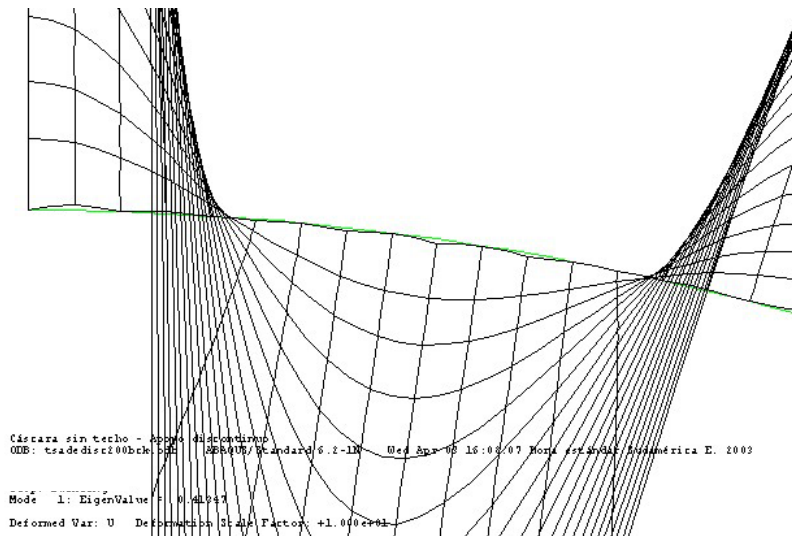


Figura 3: Deformada en zona de apoyo correspondiente a modo de pandeo. Soldadura cada 0.50m.

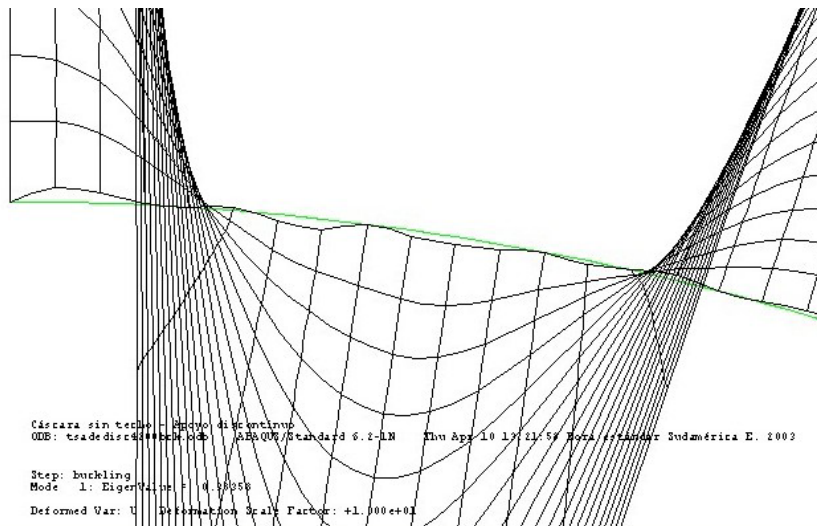


Figura 4: Deformada en zona de apoyo correspondiente a modo de pandeo. Soldadura cada 1.00m.

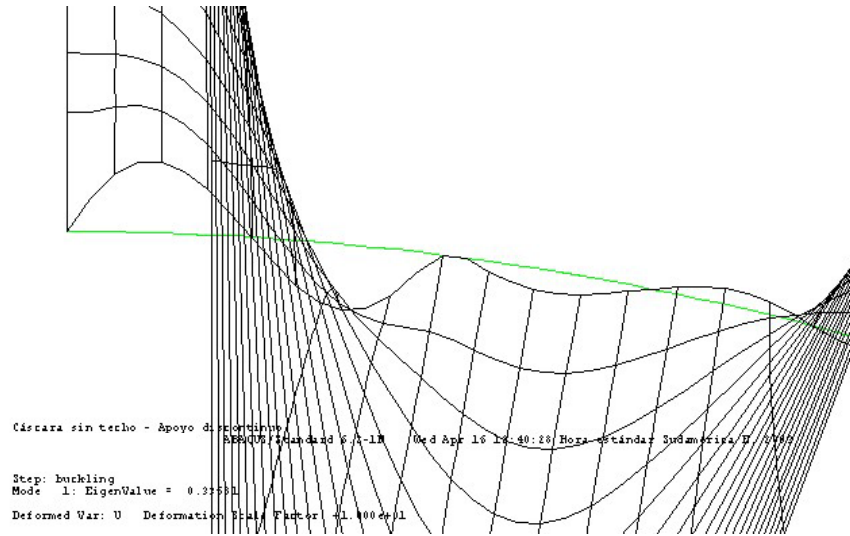


Figura 5: Deformada en zona de apoyo correspondiente a modo de pandeo. Soldadura cada 2.00m.

Tabla 3: Velocidades de viento para diferentes condiciones de apoyo.

λ_c [kN/m ²]	CIRSOC (vigente) [km/h]	CIRSOC (en evaluación) [km/h]	ASCE [km/h]
0.456	99.23	101.44	85.34
0.413	93.4	96.4	81.15
0.383	90.0	92.8	78.2
0.337	84.41	87.1	73.3

Los valores de velocidad de viento hallados relacionados con carga crítica son superiores al registro de velocidad en el momento del colapso (45 km/h), con una tendencia a disminuir sus valores al modificar las condiciones de apoyo. Este comportamiento refleja la necesidad de incluir en la simulación la posibilidad que el apoyo circunferencial presente desplazamientos.

4.2 Análisis no lineal con el Modelo 1

De la observación de la estructura dañada mostrada en la Figura 1, se infiere que la estructura presenta un estado poscrítico avanzado con grandes desplazamientos. Por esta razón es necesario realizar un análisis de seguimiento de la trayectoria, en nuestro caso por el método de Riks. Se analizaron puntos ubicados sobre el eje de simetría en el meridiano de incidencia del viento y en su zona próxima donde se observan los mayores desplazamientos, siendo el nodo A el que está ubicado sobre el eje de simetría.

En la Figura 6(a) se presenta la deformada correspondiente a un incremento de carga correspondiente al 37 % de la carga crítica en el caso que la imperfección inicial sea de

amplitud pequeña y en el sentido del modo de pandeo, alcanzada posteriormente de llegar al 96 % de la carga crítica. En la Figura 6(b) se muestra la deformada en el caso que la imperfección inicial sea en sentido contrario al modo de pandeo asociada a un estado de carga del 32 % de la carga crítica. En cada caso hasta ese incremento de carga se mantiene la forma de la deformada desde el comienzo del proceso de carga.

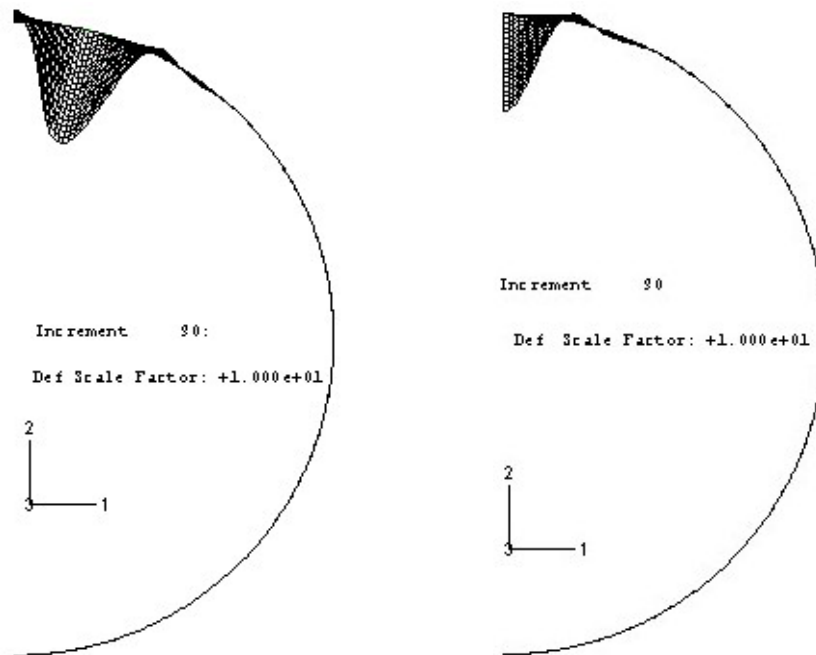


Figura 6: Deformadas correspondientes a diferentes imperfecciones iniciales.
 (a) En el sentido del modo de pandeo. (b) En sentido contrario a modo de pandeo

Se construyó la curva carga-desplazamiento relacionando el factor de proporcionalidad de carga (LPF) con el desplazamiento de los nodos indicados anteriormente. En el nodo ubicado sobre el meridiano de incidencia del viento (nodo A) se utilizó el desplazamiento según el eje Y (U2) mostrado en la Figura 7 y en el nodo ubicado en la zona de mayores desplazamientos aproximadamente a 15° del meridiano de incidencia del viento (nodo B) se analizó el desplazamiento según el eje X (U1) y según el eje Y (U2) correspondiente a la Figura 8 (a) y (b) respectivamente.

En el caso de imperfección en sentido del modo de pandeo la deformada obtenida no se corresponde con la imagen del tanque colapsado, pero en la parte final del proceso de carga comienza a invertirse el patrón de desplazamientos.

Se observa una trayectoria poscrítica inestable en ambos casos analizados con una reducción importante en el valor de la carga, aunque los desplazamientos obtenidos en la simulación son menores que los estimados en el tanque colapsado.

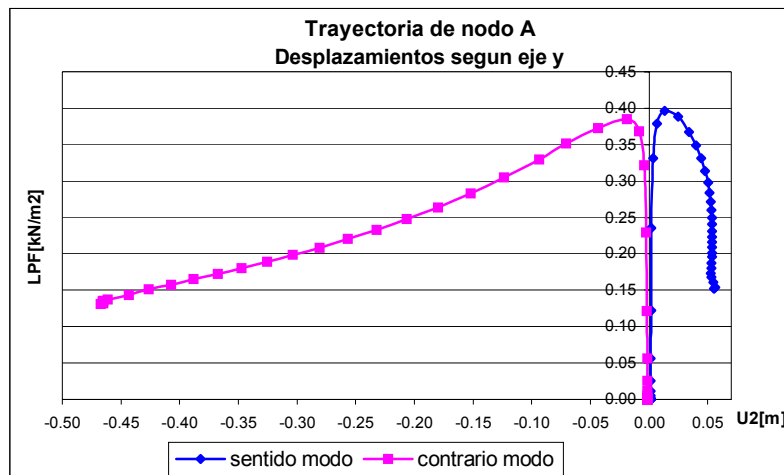


Figura 7: Trayectoria de equilibrio. Nodo sobre meridiano de incidencia del viento

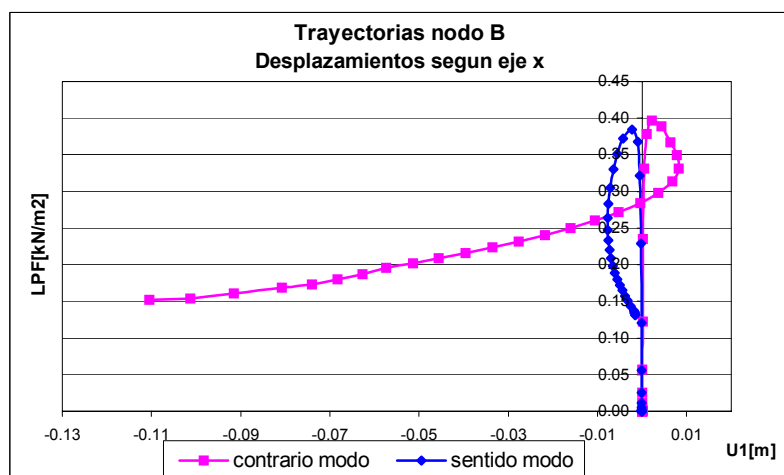
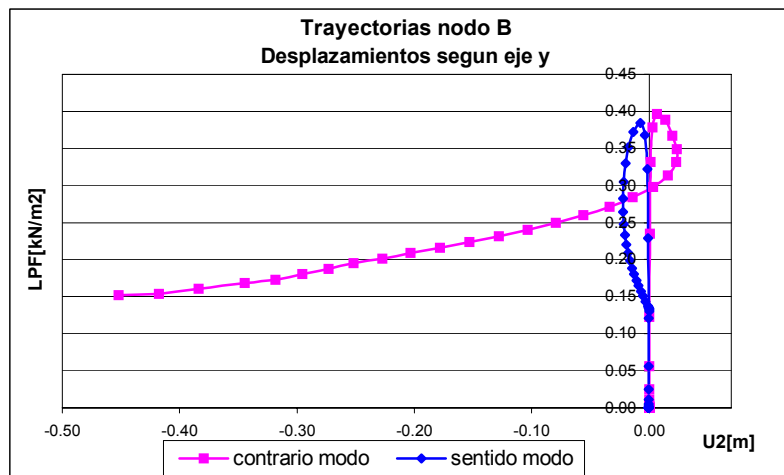


Figura 8: Trayectorias de equilibrio. Nodo zona de mayores desplazamientos.
(a) Desplazamientos según eje y. (b) Desplazamientos según eje x.

Los estudios de esta sección sólo consideran pequeñas imperfecciones iniciales en el análisis, y para acercarse a las condiciones registradas en el evento es necesario considerar imperfecciones iniciales del orden del espesor de la cáscara.

5 MODELO DEL TANQUE INCLUYENDO EL PISO

Una mejora significativa en la representación del problema se logró mediante la inclusión del fondo del tanque como parte del modelo, tal como se ilustra en la Figura 2. Se evaluaron diferentes condiciones de apoyo en el borde, tendientes a considerar que se produce un desprendimiento en todo el contorno o que el desprendimiento es en la zona de mayores solicitaciones. Las tres condiciones consideradas son:

- (a) Puntos de soldadura distribuidos en todo el contorno, cuya separación se fue variando para representar el desprendimiento gradual.
- (b) Puntos de soldadura cada 0.5m con un sector libre en la zona de incidencia del viento, representando un desprendimiento solamente en la zona a barlovento.
- (c) Una condición similar a la anterior pero con un apoyo en el meridiano de incidencia ya que la fotografía de la estructura con daño muestra una deformada en la base del tanque con esa característica.

Se realizó un proceso de seguimiento de trayectoria mediante el método de Riks comenzando por la condición de apoyo continuo en la base del tanque considerando posteriormente la relajación de las condiciones de apoyo que se fueron presentando por el proceso constructivo correspondiente al armado del tanque y el posterior desprendimiento del fondo por la acción del viento. En todos los casos analizados se consideró una imperfección geométrica en sentido contrario a la forma de modo con un desplazamiento (ξ) del orden de 1 cm en el nodo ubicado en el borde superior del tanque sobre el meridiano a barlovento. Este valor parece compatible con los desplazamientos que se pueden presentar durante el proceso constructivo, resultando la relación entre la amplitud máxima y el espesor $\xi/t = 2$.

En todas las simulaciones realizadas los resultados obtenidos fueron sensibles a las separaciones propuestas. En el caso (a) se consideraron apoyos dobles cada 5m y cada 6.25 m resultando cargas máximas $\lambda_{\max.} = 0.162$ y $\lambda_{\max.} = 0.133$ respectivamente. La Figura 9 muestra las trayectorias de equilibrio obtenidas para los casos mencionados anteriormente junto con las que corresponden a apoyo continuo y puntos de soldadura cada 0.5m. Se observa una disminución considerable de la carga máxima comparada con la condición de puntos de soldadura cada 0.5m, similar a lo hallado con el modelo con los resortes.

Las condiciones de apoyo correspondientes a los casos (b) y (c) fueron evaluadas considerando una zona con desprendimiento con un desarrollo circunferencial de aproximadamente 4.5 m en el caso (b) y de 8.5m en el caso (c), con una magnitud de imperfección inicial igual a la usada anteriormente. Las cargas máximas alcanzadas fueron

$\lambda_{\max.} = 0.130$ y $\lambda_{\max.} = 0.126$ respectivamente. La Figura 10 muestra las trayectorias de equilibrio halladas en cada caso. Las trayectorias de equilibrio de las figuras 9, 10 y 11 corresponden al nodo ubicado sobre el meridiano de incidencia del viento identificado como nodo A.

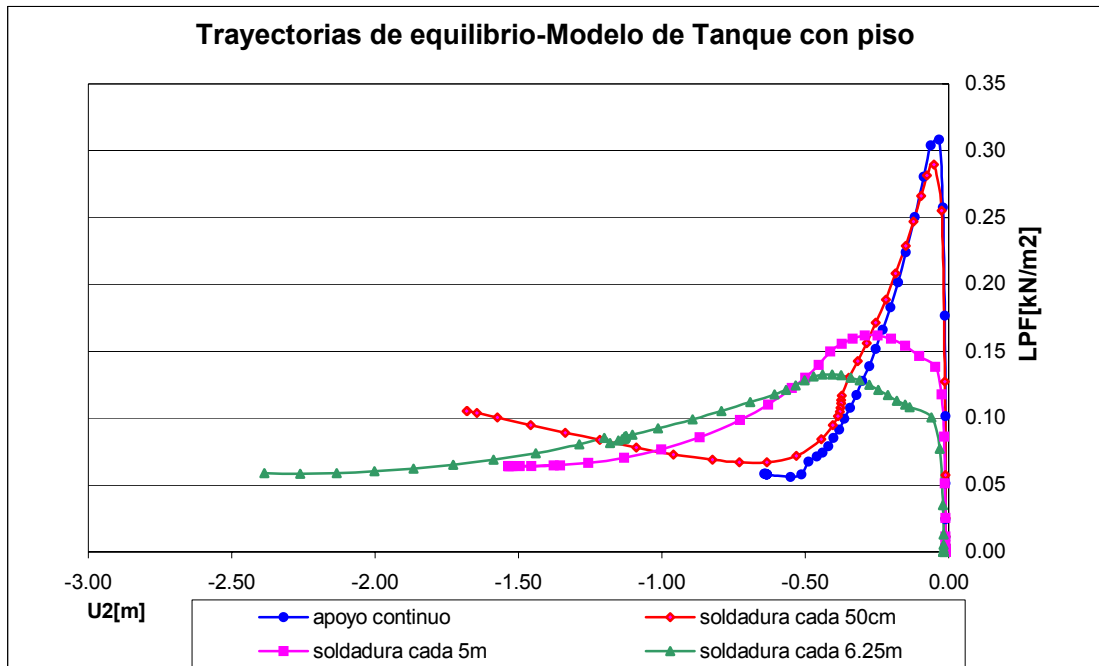


Figura 9: Trayectorias de equilibrio. Apoyos distribuidos de manera uniforme.

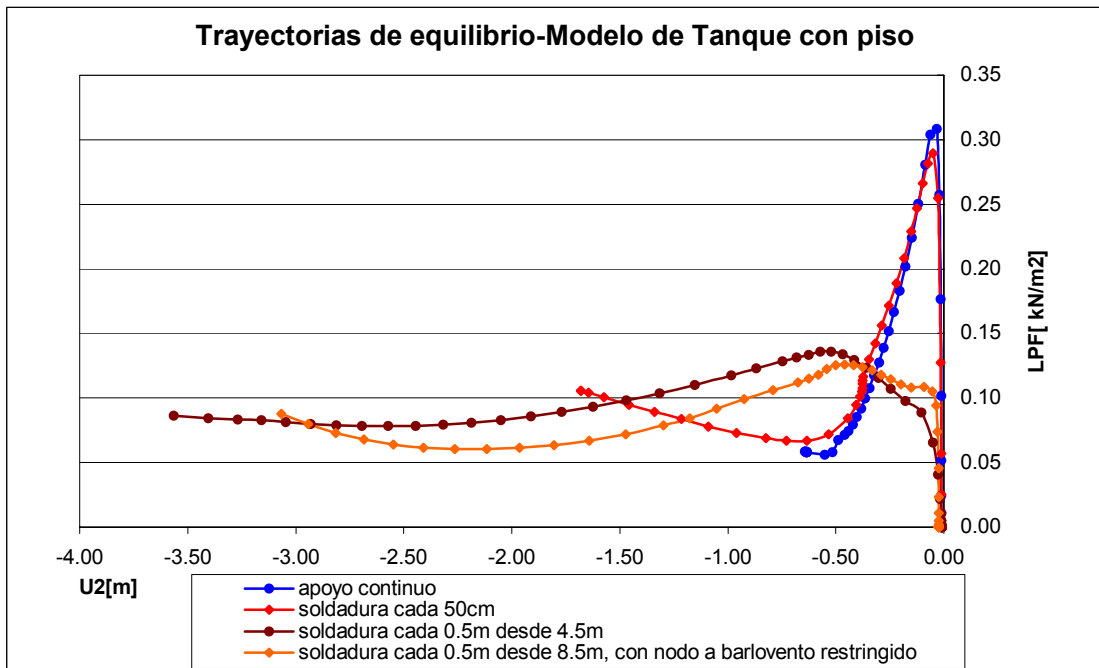


Figura 10: Trayectorias de equilibrio. Apoyos cada 0.5m con sector libre a barlovento.

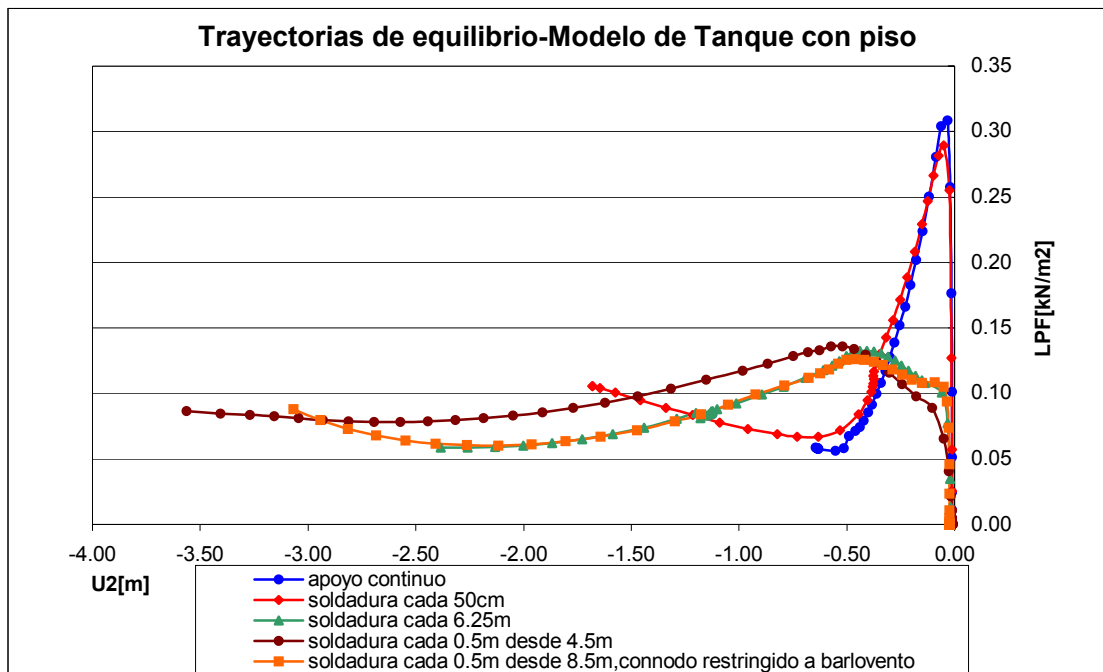


Figura 11: Trayectorias de equilibrio. Diferentes condiciones de apoyo.

La Figura 11 resume el comportamiento obtenido para las diferentes condiciones de apoyo asumidas, incluyendo también la condición de apoyo continuo y la condición de puntadas de soldadura cada 0.5 m. Se observa que, para las diferentes formas de modelación del desprendimiento del apoyo, se obtiene valores de carga máxima similares entre si, exhibidas en la Tabla 4, y compatibles con las velocidades de viento registradas, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 4: Cargas máximas. Diferentes condiciones de apoyo

Apoyo	λ_{max} [kN/m ²]
Apoyo continuo	0.310
Uniones soldadas cada 50 cm.	0.289
Soldadura cada 6.25 m	0.133
Soldadura cada 0.5m desde 4.5m	0.130
Soldadura cada 0.5m desde 8.5m, con nodo restringido a barlovento	0.126

Tabla 5: Velocidades de viento. Diferentes condiciones de apoyo.

Condición de la base	CIRSOC (vigente) [km/h]	CIRSOC (en evaluación) [km/h]	ASCE [km/h]
Apoyo continuo	80.9	83.5	70.3
Uniones soldadas cada 50 cm.	78.2	80.6	67.9
Soldadura cada 6.25 m	53.0	54.6	46.0
Soldadura cada 0.5m desde 4.5m	52.4	54.0	45.5
Soldadura cada 0.5m desde 8.5m, con nodo restringido a barlovento	51.6	53.2	44.8

El desprendimiento del apoyo, ya sea en todo el perímetro del tanque o en la zona a barlovento, genera una disminución importante de las cargas máximas con respecto a la condición de apoyo continuo poniendo de manifiesto la degradación de las condiciones de apoyo producida en la etapa constructiva.

En la Figura 12 se muestra la deformada correspondiente al estado final de la simulación y un detalle correspondiente a la zona del apoyo donde se presenta un levantamiento del fondo. Se puede observar que la misma reproduce la imagen del tanque colapsado.

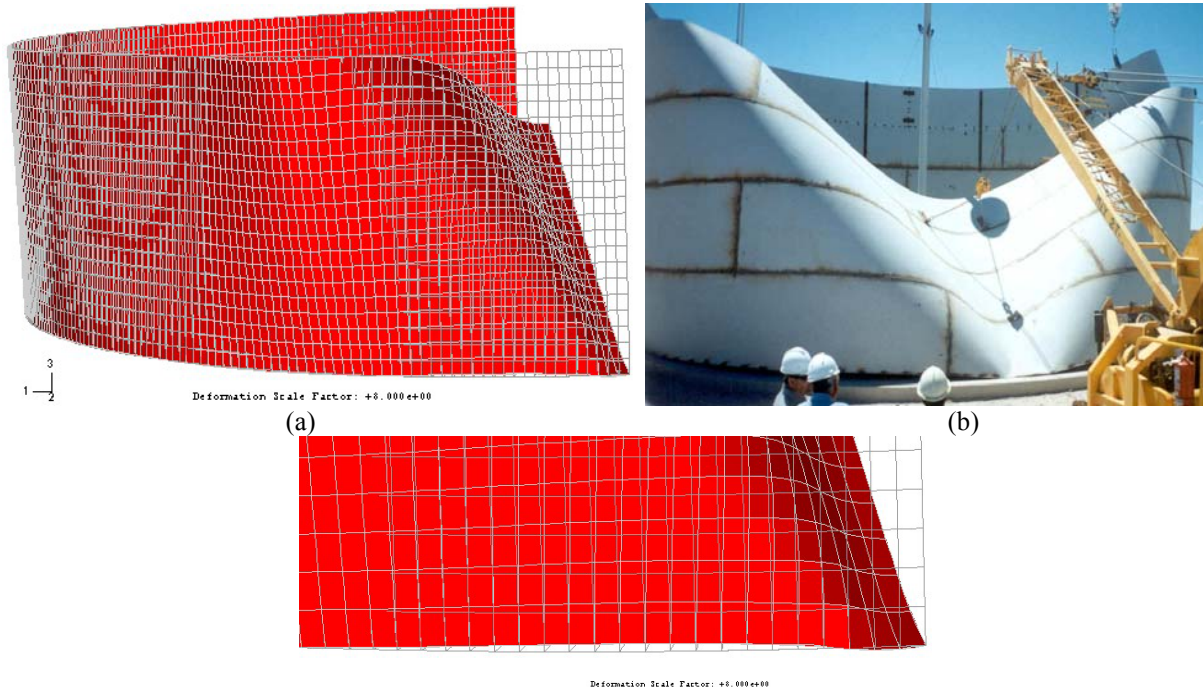


Figura 12: Comparación de resultados de la simulación con tanque colapsado. (a) Deformada en etapa final de la simulación (b) Tanque colapsado. (c) Detalle levantamiento del fondo del tanque

La Figura 11 muestra que al ir cambiando las condiciones de apoyo, desde una condición de apoyo continuo hasta un apoyo que permite desplazamientos en las zonas más solicitadas de la cáscara, va disminuyendo la carga a la que se producen problemas de inestabilidad del equilibrio. Las características del proceso constructivo por el cual no se hacen soldaduras continuas sino puntos de soldaduras, permitidos en la norma API 650, y el posterior desprendimiento de la cáscara en los puntos de soldadura, han erosionado o degradado las características de la cáscara que pudieron considerarse como de proyecto bajo la acción del viento. Hay mayores reducciones de resistencia con respecto a la versión final del tanque que no se llegó a construir debido a que el tanque considerado en su etapa final tenía un techo cónico que hubiera permitido elevar la carga máxima de viento admitida por el mismo.

De esta manera las velocidades de viento que producen inestabilidad del equilibrio, como se muestra en la Tabla 5, van variando según el reglamento considerado desde valores del orden de 78 km/h promedio para la condición mas favorable a valores del orden de 50 km/h, en promedio. En la Tabla 1 se observa que las velocidades de viento registradas en el día y en la zona con registros más próxima a la de ubicación del tanque, son del orden de las obtenidas.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado el uso de modelos de la mecánica computacional de cáscaras para evaluar escenarios que permitan explicar la falla de una estructura de un tanque metálico. Una particularidad de este caso es que falló durante la construcción, y su rigidez era menor que la esperada de la estructura una vez completada. Los vientos para los que se produjo la falla eran de menos de la tercera parte de vientos de diseño.

Los resultados muestran que la estructura perfecta tiene cargas de pandeo por viento muy superiores a las ocurridas durante el evento, pero que cuando se incluyen imperfecciones del orden de dos veces el espesor de la lámina, entonces se produce una reducción muy importante en la carga crítica elástica. De manera que estudios de bifurcación del equilibrio, en los que no se incluyen imperfecciones, no representan adecuadamente el comportamiento.

Considerando imperfecciones en la cáscara, aún queda por representar el efecto de falta de soldadura en toda la base, y la posible flexibilidad de la misma. Los resultados muestran que la inclusión de la base como parte del modelo es importante para obtener una representación realista del proceso de falla. Si se intentan emplear resortes de apoyo, la rigidez de esos resortes queda como una variable de ajuste para acercarse a las velocidades de viento actuantes en el día del colapso; por el contrario, la modelación de la base permite no hacer ajustes adicionales.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo brindado a este trabajo por la Universidad del Comahue, por la Agencia Córdoba Ciencia y por CONICET, a través de subsidios de apoyo a la investigación.

7 REFERENCIAS

- [1] Flores, F. G. y Godoy, L. A. (1991). "Instability of shells of revolution using ALREF: Studies for wind loaded shells." In: *Buckling of Shells in Land, in the Sea and in the Air*, J. F. Jullien (Ed.), Elsevier Applied Science, Oxford, 213-222.
- [2] Flores, F. G. y Godoy, L. A. (1998). "Buckling of short tanks due to hurricanes." *J. Engineering Structures*, 20(8), 752-760.
- [3] Flores, F. G. y Godoy, L. A. (1999). Forced vibrations of silos leading to buckling, *J. Sound and Vibration*, vol. 224(3), pp. 431-454.
- [4] Godoy, L. A. y Flores, F. G. (2002). Imperfection-sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks, *J. Structural Engineering and Mechanics*, vol. 13(5), pp. 533-542.
- [5] Greiner, R. y Derler, P. (1995). "Effect of imperfections on wind loaded cylindrical shells." *Thin-Walled Structures*, 23, 271-281.
- [6] Jaca, R. C., Godoy, L. A., Flores, F. G. (2002). Análisis poscrítico de tanques de pared delgada bajo cargas de viento, *Mecánica Computacional*, vol. XXI, pp. 1842-1861.
- [7] Resinger, F. y Greiner, R. (1982). "Buckling of wind-loaded cylindrical shells: Application to unstiffened and ring-stiffened tanks." In *Buckling of Shells*, E. Ramm (Ed.), Springer-Verlag, Berlin, 305-331.
- [8] Schmidt, H., Binder, B. y Lange, H. (1998). "Postbuckling strength design of open thin-walled cylindrical tanks under wind load." *Thin-Walled Structures*, vol. 31, 203-220.
- [9] Sosa, E. M. y Godoy, L. A. (2003). Nonlinear dynamics of above-ground thin-walled tanks under fluctuating pressures, en proceso de revisión.
- [10] Virella, J. C., Godoy, L. A., Suárez, L. E. (2003). Influence of the roof on the natural periods of empty steel tanks, *Engineering Structures*, vol. 25, pp. 877-887.