



INESTABILIDAD DE TANQUES FRENTE A LA ACCIÓN DE VIENTOS

Fernando G. Flores¹ y Luis A. Godoy²
Departamento de Estructuras, F.C.E.F. y N.
Universidad Nacional de Córdoba
Casilla de Correos 916, 5000 Córdoba-Argentina

RESUMEN

Se estudia la inestabilidad de cáscaras delgadas bajo acción de viento, utilizando técnicas de elementos finitos. Varios modelos se emplean para estimar cargas de pandeo en tanques de baja altura en relación con el diámetro. Estos modelos incluyen análisis de bifurcación del equilibrio, completos o simplificados; análisis no lineal incremental; y análisis dinámico. Los resultados muestran que los efectos de inercia y los de no linealidad por grandes desplazamientos no influyen significativamente en los resultados. La influencia del líquido almacenado es de estabilizar el comportamiento, pero no por valores altos.

ABSTRACT

Instability of thin-shells under wind load is investigated by finite element techniques. Several models are used to approximate the buckling loads in short storage tanks. Such models include bifurcation analysis, both full and simplified; non-linear incremental analyses; and dynamic analysis. The results show that inertia and non-linearity of deformations do not play a significant role in the results. A liquid stored in the tank has the effect of increasing the stability of the system by a small value.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y MOTIVACIÓN

La inestabilidad de tanques para el almacenamiento de líquidos, bajo acción de vientos, es de gran interés en zonas azotadas por vientos de alta intensidad. Ejemplos recientes de fallas de tanques de acero para almacenamiento de petróleo han ocurrido en las Islas Vírgenes de Estados Unidos, y producidos por el paso del huracán Marilyn sobre St. Thomas en 1995, y por el huracán Hugo sobre St. Croix en 1989. En ambos casos se tiene evidencia de la falla por pandeo de estructuras vacías o casi vacías durante el paso del huracán [Godoy et al., 1996].

El modelado de la inestabilidad de tales tanques requiere de varias consideraciones acerca del comportamiento, antes de decidir por el tipo de elemento y de análisis que se llevará a

¹Inv. Asistente de CONICET y Prof. Adjunto Univ. Nacional de Córdoba

²Inv. Independiente de CONICET

cabo. En primer lugar, ¿se trata de un problema fuertemente dinámico, o bien puede ser enfrentado mediante consideraciones estáticas de pandeo? En segundo lugar, ¿es necesario emplear procedimientos que tengan en cuenta grandes desplazamientos de la estructura, o bien es suficiente con obtener análisis de bifurcación del equilibrio? En tercer lugar, ¿qué nivel de simplificaciones pueden introducirse en el análisis, referidas a la axisimetría de la carga, que es evidentemente no axi-simétrica? Finalmente, ¿qué influencia tiene el fluido almacenado en la inestabilidad?

En este trabajo se aborda este tipo de preguntas, tomando como base una configuración de la cáscara y realizando el análisis mediante distintas herramientas de cálculo, basadas en elementos finitos. Las conclusiones son específicas del tipo estructural considerado, porque para configuraciones de relación de altura a diámetro mayores, la mecánica del comportamiento cambia y el error introducido por las aproximaciones tiene incidencia diferente.

CARGAS Y GEOMETRÍA DE LA LÁMINA

Se ha utilizado la geometría típica de los tanques de agua que colapsaron durante el huracán Marilyn en islas del mar Caribe. Corresponde a un tanque circular de 19m de radio y 7.6m de altura, empotrado en la base y libre en la parte superior (sin techo). El espesor es de 1cm y el material es acero con las siguientes características:

E	$= 0.206 \cdot 10^{12} \text{ N/m}^2$	(Módulo de Young)
ν	$= 0.3$	(Relación de Poisson)
ρ	$= 7800 \text{ kg/m}^3$	(Densidad)
σ_f	$= 0.2156 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	(Tensión de fluencia)

La distribución de la presión del viento p se supuso uniforme en la altura y con la siguiente variación a lo largo del paralelo ($\theta = 0$ corresponde al meridiano enfrentado al viento)

$$p = \lambda \sum_{i=0}^6 c_i \cos(i\theta)$$

Los coeficientes de la descomposición de Fourier tienen los valores numéricos indicados en la Tabla 1 y la variación se ilustra en la Figura 1. Esta variación en la dirección del

$c_0 = 0,387$	$c_2 = -0,533$
$c_1 = -0,338$	$c_4 = -0,166$
$c_3 = -0,471$	$c_6 = 0,055$
$c_5 = 0,066$	

Tabla 1: Coeficientes de Fourier de la variación de presión

paralelo de la presión dinámica del viento fue tomada de los ensayos realizados por [Rish (1967)] y no necesariamente se corresponde con los reales en el caso del huracán Marilyn, sin embargo los resultados parecen indicar que la forma de distribución no es crítica en este caso de una lámina tan delgada.

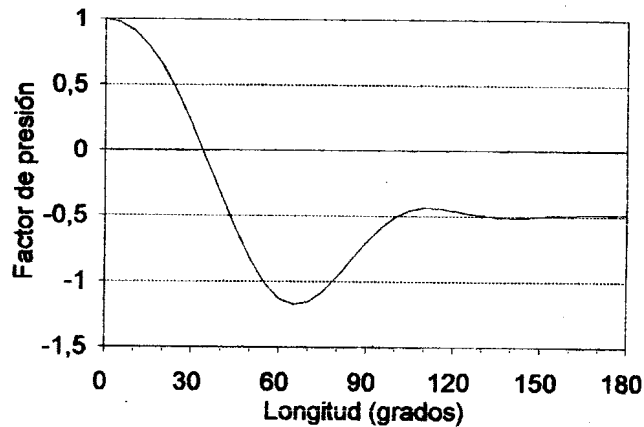


Figura 1: Distribución del viento en la dirección del paralelo

EVALUACIÓN DE LA CARGA CRÍTICA LINEAL

Para la evaluación de la carga crítica se recurre a un programa específicamente orientado al análisis de láminas de revolución denominado ALREF [Flores y Godoy (1991)], que utiliza un modelo de elementos finitos semianalítico, describiendo el comportamiento en la dirección del paralelo mediante series de Fourier. Para la obtención del valor crítico se recurre a un análisis lineal de autovalores. En este tipo de estructuras es común realizar algún tipo de simplificación que conduzca a evaluar modos de bifurcación con componentes en una sola de las armónicas del desarrollo de Fourier. Esto puede lograrse suponiendo una distribución axilsimétrica de los esfuerzos, lo que puede obtenerse de dos formas:

- a) asumiendo una presión de viento axilsimétrica (criterio del meridiano más cargado)
- b) calcular el estado tensional usando una distribución no axilsimétrica y utilizar los esfuerzos sobre el meridiano más exigido como si fueran uniformes en el paralelo (criterio del meridiano más exigido).

Para los criterios indicados las cargas críticas resultan las que se muestran en la Figura 2. El meridio más exigido corresponde a $\theta = 0$. Las cargas críticas resultan casi idénticas debido al alto número del modo crítico.

Los resultados usando criterios simplificados suelen ser bastante conservativos en la mayoría de los casos, sin embargo de acuerdo a la geometría, el criterio del meridiano más exigido suele dar cargas críticas mayores que la correcta [Flores (1990)]. Un análisis lineal de bifurcación acoplado las armónicas conduce a un valor de presión crítica de

$$\lambda_c = 2208 \text{ N/m}^2$$

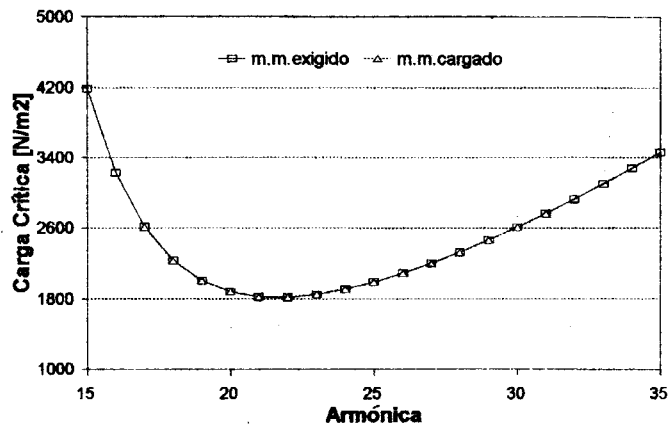


Figura 2: Cargas críticas para los criterios simplificados

Para este análisis acoplado es necesario elegir aquellas armónicas que puedan ser las de mayor influencia en el comportamiento crítico. Se ha seguido como criterio el de utilizar aquellas armónicas que individualmente tienen asociadas las menores cargas críticas usando el criterio de meridiano más exigido. En este caso se usaron 15 armónicas que de acuerdo a los resultados presentados en la figura son de la 17 a la 31.

Dadas las características del código de elementos finitos, este tipo de análisis es computacionalmente muy económico y sencillo de realizar. En este caso para modelar el meridiano se han usado 8 elementos de 3 nodos con interpolación cúbica para los desplazamientos membranales y de quinto grado para los desplazamientos normales a la superficie.

En este tipo de análisis resulta necesario observar el nivel de desplazamientos que se produce para el valor de la presión crítica, de forma de asegurar que se mantiene la hipótesis de linealidad. En este caso los máximos desplazamientos son menores a 1mm por lo que puede suponerse que la carga crítica es aceptable como tal, restando determinar la sensibilidad a imperfecciones que pueda tener como carga límite de colapso.

Nótese que los criterios de meridiano más cargado y de meridiano más exigido dan resultados prácticamente iguales, que son un 18% inferiores a los del análisis más refinado que considera acoplamiento de modos. Tales criterios serán aceptables en este caso para estimar cargas de pandeo, pero no proveen información acerca de la forma del modo de pandeo. Esto último es de importancia si se intenta verificar que relación tiene el modo de pandeo computacional con el observado en una estructura real.

ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO CON ELEMENTOS DE LÁMINA EN TRES DIMENSIONES

Un análisis más completo, donde se puedan considerar geometrías imperfectas, grandes desplazamientos en trayectorias poscríticas y plasticidad, requiere de modelos generales

de láminas en tres dimensiones.

Para discretizar el cilindro como un elemento tridimensional se ha utilizado un elemento cuadrilátero de 4 nodos (bilineal) basado en la teoría de láminas desarrollada por Simo [Simo et al (1989)(1990)] implementado dentro de un código denominado ALPHA [Flores (1996)] de propósito múltiple con facilidades no lineales en análisis estático y dinámico. Se dispusieron 14 elementos en la altura y haciendo uso de la simetría del problema se consideró sólo una mitad del cilindro. Además a partir de resultados preliminares se observó que era suficiente modelar sólo la parte enfrentada al viento, por lo que se utilizaron 46 elementos en un cuadrante lo que condujo a un total de 644 elementos y 705 nodos (3234 grados de libertad). Se consideraron 3 geometrías diferentes:

1. Cilindro perfecto con planta circular
2. Cilindro con una pequeña imperfección geométrica consistente en un aplanamiento de 2 mm en toda la altura en el borde enfrentado al viento (cilindro quasi-perfecto)
3. Cilindro con una imperfección en la forma del modo crítico con una amplitud de 1cm

Esta última imperfección, que tiene una amplitud del mismo orden que el espesor de la lámina, parece un valor razonable para las dimensiones globales del tanque (1/1900 del radio del tanque, 1/760 de la altura).

En la Figura 3 se muestra el modo crítico en el extremo superior del tanque obtenido con el programa lineal (ALREF) y con el programa no lineal (ALPHA). En este último caso se presentan dos modos que corresponden uno a un análisis lineal de bifurcación y otro a desplazamientos incrementales en la cercanía de la carga límite para la geometría (2). La correspondencia entre los modos es excelente. Notar que el modo está localizado sobre la zona enfrentada al viento y que a 90° del mismo los desplazamientos son prácticamente nulos, lo que permite suponer que el haber utilizado un modelo con sólo un cuarto del tanque es adecuado.

En la Figura 4 se muestra el valor de la presión del viento (factor de carga λ) en función del desplazamiento del punto superior para el análisis lineal seguido de bifurcación (ALREF), y para las tres geometrías consideradas en el análisis no lineal. La correspondencia entre las cargas críticas obtenidas con ambos análisis es excelente (análisis lineal y geometría perfecta (1)). Las trayectorias poscríticas del análisis no lineal muestran un comportamiento inicialmente inestable y una cierta sensibilidad de la carga límite a las imperfecciones geométricas, con una caída al 70% de la carga de límite de la estructura perfecta para una imperfección de 1cm (geometría (3)). Suponiendo una densidad del aire de $1,2 \text{ kg/m}^3$, la presión de 1561 N/m^2 corresponde a una velocidad del viento de 51 m/s (183 km/h).

Con respecto al comportamiento del material, los niveles de tensiones se mantienen en el rango elástico, incluso bien avanzada la trayectoria poscrítica, alcanzándose recién el límite de fluencia para valores de desplazamiento de 70cm que ya corresponden a valores de resistencia de la estructura substancialmente más bajos que la carga crítica.

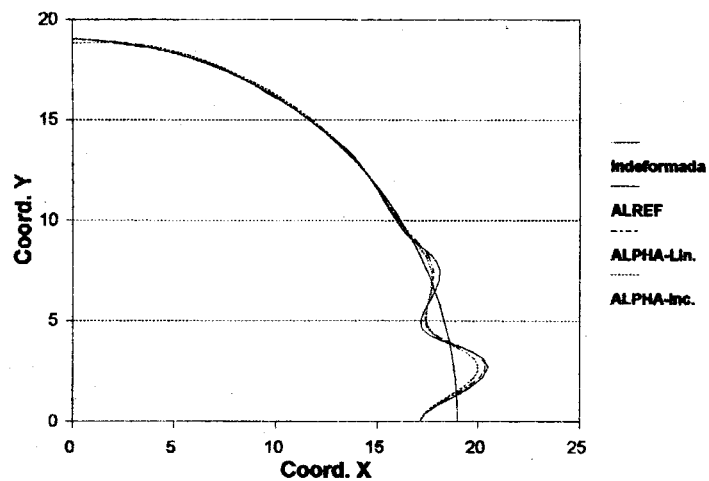


Figura 3: modo crítico sobre el borde del tanque

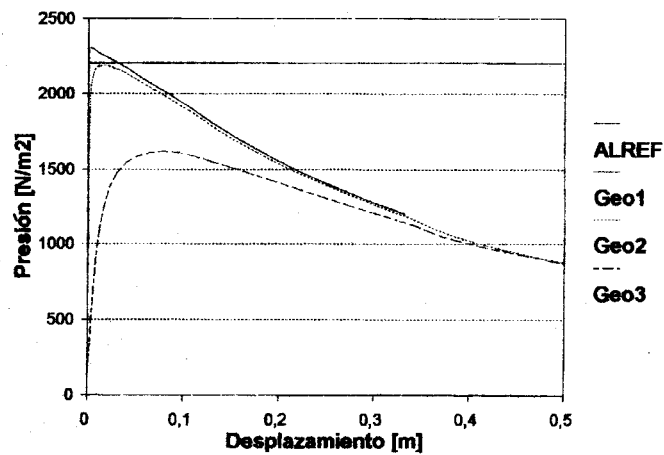


Figura 4: carga vs. desplazamiento para las distintas geometrías

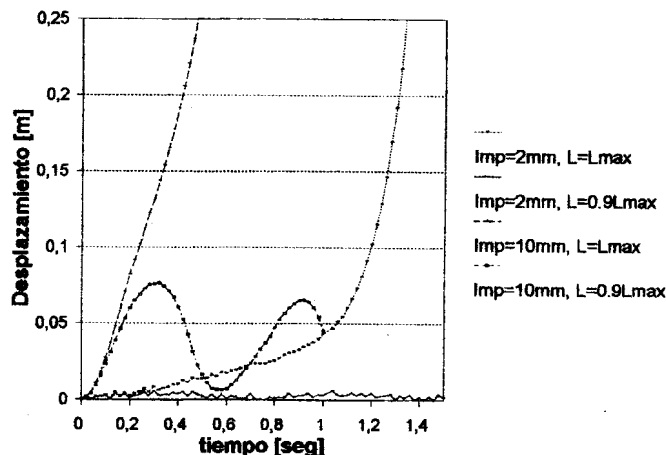


Figura 5: Análisis dinámico, desplazamiento del extremo superior en función del tiempo

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Siendo la carga de viento una acción esencialmente dinámica, interesa considerar la influencia de la inercia del sistema en este tipo de problemas, de forma de determinar si el análisis estático es suficientemente confiable.

Para el análisis dinámico se han utilizado las dos geometrías imperfectas mencionadas en la sección anterior. Se han considerado cargas del tipo escalón (Heaviside) simulando una ráfaga. Se usaron dos niveles de carga: el correspondiente a la carga límite estática y el 90% de dicho límite. El comportamiento de ambas geometrías es esencialmente el mismo. Para el nivel de carga coincidente con la carga límite estática, luego de algunas oscilaciones los desplazamientos crecen descontroladamente produciendo el colapso. En tanto que para el 90% de la carga límite estática los desplazamientos se mantienen acotados, vibrando la estructura alrededor de su posición de equilibrio. La amplitud de los desplazamientos en la estructura con la imperfección en la forma del modo crítico son importantes. En la Figura 5 se muestran los desplazamientos del borde del cilindro (punto enfrentado al viento) en función del tiempo para los cuatro casos estudiados.

Estos resultados permiten asumir que el análisis estático es suficientemente acertado y que los efectos dinámicos no producirán una caída substancial en el nivel de la carga de colapso.

INFLUENCIA DEL LIQUIDO INTERIOR EN LA CARGA CRÍTICA

A priori parece razonable suponer que el caso más desfavorable frente a la acción del viento es cuando el tanque está vacío. Para observar la influencia del líquido en el interior se ha utilizado el código ALREF que permite mantener una carga constante (la presión del líquido interno y el peso propio en este caso) y realizar un análisis lineal de autovalores

Nivel de agua	Carga Crítica	Carga normalizada
0	2208	1.000
H/6	2211	1.001
H/3	2264	1.025
H/2	2510	1.137

Tabla 2: cargas críticas para distintos niveles de agua

Altura del cilindro	Borde Empotrado	Borde articulado
H	1.000	0.995
5/6 H	1.184	1.175
2/3 H	1.518	1.500
1/2 H	2.286	2.228

Tabla 3: cargas críticas normalizadas para distintos alturas del cilindro

para una segunda condición de carga (en este caso la presión de viento). Se han supuesto tres niveles de líquido dentro del tanque: lleno en una sexta parte, lleno en una tercera parte y con agua hasta la mitad de la altura. Las cargas críticas obtenidas son siempre crecientes y se presentan en la Tabla 2 normalizadas con respecto a la carga crítica del cilindro vacío.

Podría pensarse que la influencia del líquido se resume a disminuir la altura de pandeo del cilindro. Se han considerado diferentes alturas del cilindro para observar su influencia en la carga crítica, considerando además dos condiciones de borde diferentes, empotrado y articulado. En la Tabla 3 se presentan estos resultados normalizados con respecto a la carga crítica del cilindro original. Como era de esperar la disminución de la altura del cilindro produce un aumento substancial de la resistencia del mismo. Sin embargo, esos resultados poco tienen que ver con los de la Tabla 2. Por ejemplo, para la mitad de líquido del tanque la carga crítica es de 1.137 la del tanque vacío. Un tanque vacío con altura igual a la mitad del caso real, por otra parte, da una carga crítica de 2.2. Por lo tanto, ese tipo de análisis simplificado no es aceptable.

CONCLUSIONES

Se ha realizado el análisis estructural de un tanque de almacenamiento bajo la acción del viento, con geometría similar a los que fallaron recientemente en islas del mar Caribe. Para estas características geométricas, tanques bajos de muy baja relación espesor/radio, puede concluirse que:

- El valor de carga crítica y el modo inicial de pandeo pueden obtenerse a partir de trayectorias precriticas lineales con excelente aproximación.

- La utilización de criterios simplificados (simetría de comportamiento) conducen a valores conservativos de la carga crítica y no suministran información respecto al modo de falla.
- La carga máxima es moderadamente sensible a imperfecciones geométricas, por lo que resulta necesario disminuir mediante factores la carga crítica de diseño. Una evaluación correcta de estos factores requiere de algún código capaz de realizar dicho tipo de análisis de sensibilidad (poco comunes) o de un análisis no lineal con la geometría imperfecta.
- El comportamiento del material puede suponerse elástico no sólo al comienzo de la trayectoria poscrítica sino bien avanzada ésta. La plasticidad no juega rol alguno en la máxima resistencia al viento, si por supuesto en la forma final colapsada, lo que puede tener interés con fines de comparación pero no de diseño.
- Si bien la acción del viento es esencialmente dinámica, un análisis estático es adecuado para la predicción de la carga de colapso.
- La existencia de agua en el interior del tanque produce un efecto estabilizante, dicho efecto no puede modelarse asumiendo un tanque de menor altura.

Estas conclusiones no son directamente extrapolables a geometrías diferentes. En un caso general un análisis no lineal es siempre preferible, sin embargo un análisis lineal de bifurcación resulta de gran valor y en muchos casos, con los cuidados y la experiencia adecuada, es también suficiente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente con subsidios otorgados por CONICET y CONICOR.

REFERENCIAS

1. Flores F.G., Godoy L.A. (1991), "Instability of shells of revolution using ALREF: studies for wind loaded shells", en *Buckling of Shells Structures, on Land, in the Sea and in the Air*, Elsevier Applied Science, Londres, pp 213-222.
2. Flores F.G. (1990), "Análisis no lineal geométrico y estabilidad elástica de láminas de revolución mediante elementos finitos con aplicaciones a recipientes de presión", Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
3. Flores F.G. (1996), "ALPHA, a Static/Dynamic Implicit Finite Element Program", user's manual, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
4. Godoy L., Flores F., Elaskar S., Zapata R. (1996), "Comportamiento no lineal de silos y tanques frente a acciones de viento", presentado en el Seminario *Lecciones del Huracán Marilyn*, Mayaguez, Puerto Rico, Febrero 1996.

5. Rish R.F. (1967), "Forces in Cylindrical Shells Due to Wind", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, **36** (abril 1967), pp 791-803.
6. Simo J.C., Fox D.D. (1989), "On Stress Resultant Geometrically Exact Shell Model. Part I: Formulation and Optimal Parametrization", *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.* **72**, pp 267-304.
7. Simo J.C., Fox D.D., Rifai M.S. (1990), "On Stress Resultant Geometrically Exact Shell Model. Part III: Computational Aspects of The Nonlinear Theory", *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.* **79**, pp 21-70.