

## ANÁLISIS POSCRÍTICO DE TANQUES DE PARED DELGADA BAJO CARGAS DE VIENTO

Rossana C. Jaca<sup>\*</sup>, Luis A. Godoy<sup>†</sup>, y Fernando G. Flores<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional del Comahue  
Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina  
e-mail: rjaca@uncoma.edu.ar

<sup>†</sup> Departamento de Estructuras, F.C.E.F.y N.  
Universidad Nacional de Córdoba  
Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina  
e-mail: lgodoy@com.uncor.edu

**Key words:** Pandeo, Tanques, Elementos Finitos, Comportamiento Poscrítico, Carga de Viento, Sensibilidad a Imperfecciones.

**Abstract.** *Este trabajo presenta un análisis del comportamiento crítico y poscrítico de tanques de acero para almacenamiento de líquidos sometidos a la acción del viento. Los tanques analizados son cáscaras cilíndricas de pared delgada con techo flotante o cónico, sin contenido interior. El análisis se lleva a cabo utilizando un programa computacional de propósitos múltiples (ABAQUS), modelando los tanques por elementos finitos con elementos de cáscara delgada cuadrangulares y triangulares. La evaluación de las cargas críticas se realiza a partir de un análisis linealizado elástico de autovalores y autovectores. La evolución de la respuesta carga-desplazamiento desde el estado inicial se realiza mediante un algoritmo que obtiene soluciones de equilibrio estático considerando no-linealidad geométrica. Se realiza un análisis de la sensibilidad ante imperfecciones usando estudios elásticos no lineales para los diferentes tipos de tanque considerados. Un aspecto interesante es la observación de la respuesta de tanques mirada en diferentes escalas, es decir en la vecindad del estado crítico y en estados poscríticos alejados. Cuando existen imperfecciones iniciales, tanto en la geometría como en la carga, se detecta inicialmente una bifurcación simétrica inestable, pero en una de las direcciones a medida que crecen los desplazamientos poscríticos la trayectoria puede cambiar de signo de manera que a la cáscara le queda una sola opción de deflexión poscrítica avanzada.*

## 1 INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de tanques de almacenamiento de líquidos bajo cargas de viento es un problema de interés en la zona patagónica y en otras partes de Argentina sometidas a vientos fuertes estacionales. En la literatura técnica se encuentran casos de daño o colapso en tanques metálicos destinados a almacenar productos petroquímicos, petróleo o sus derivados debido a huracanes<sup>1-3</sup>. En esos trabajos se muestra evidencia de fallas en tanques sin techo, con techo flotante, y con techo cónico o esférico durante vientos fuertes. Diferentes tipos de daño han sido observados asociados principalmente al pandeo de la cáscara estando los tanques con un nivel de líquido interior bajo o sin contenido en el momento de la falla. El daño más común es en la cáscara cilíndrica, principalmente en la zona superior de la cáscara donde el espesor es menor, debajo de la unión entre el techo y las paredes. En algunos casos el cerramiento superior falló dejando solamente a la cáscara cilíndrica resistiendo al viento produciéndose una segunda forma de pandeo en la parte superior del cilindro. Estos tanques presentan grandes diámetros con una relación radio-altura (R/L) del orden de 2 a 3 y una relación radio-espesor (R/t) del orden de 1000 a 2000.

La bibliografía referida a pandeo bajo la acción del viento de cáscaras cilíndricas se ha desarrollado en los últimos 40 años con contribuciones basadas en evidencia experimental, analítica y computacional. Estudios que incluyen ensayos en túnel de viento fueron realizados por Maher<sup>8</sup> sobre tanques cilíndricos con techo cónico y esférico y por Purdy *et al.*<sup>9</sup> sobre tanques de techo plano. Resinger y Greiner<sup>4</sup> y Megson *et al.*<sup>5</sup> muestran resultados de ensayos realizados en túnel de viento sobre cilindros sin techo, con y sin rigidizadores. El efecto de imperfecciones en la geometría de la cáscara considerando no linealidad geométrica y plasticidad del material, fue analizado por Greiner y Derler<sup>6</sup> en forma computacional, para estructuras de silos y tanques. Schmidt *et al.*<sup>7</sup> evaluaron el comportamiento poscrítico ensayando cilindros de PVC y acero bajo succión interior y una distribución de cargas que simula la variación circunferencial de la acción del viento. En todos los trabajos mencionados anteriormente el efecto del viento fue estudiado en forma estática. Flores y Godoy<sup>1</sup> mostraron que la inercia de la cáscara no genera efectos dinámicos importantes concluyendo que estudios estáticos no lineales son adecuados para analizar la inestabilidad bajo la acción del viento. En el trabajo mencionado anteriormente también analizan el efecto estabilizante del líquido contenido en el tanque.

La distribución de presiones debidas a viento en un tanque con techo es un tópico que aun requiere mas investigación. Los estudios de túnel de viento de Maher<sup>8</sup> y Purdy *et al.*<sup>9</sup> no contemplan tanques cortos sino mas bien silos; los de Esslinger *et al.*<sup>10</sup> son decididamente para silos con relaciones de esbeltez muy diferentes que en tanques cortos. Méndez y Godoy<sup>3</sup> llevaron a cabo estudios de bifurcación del equilibrio en tanques con techo cónico con diferentes configuraciones de presiones y compararon los modos de pandeo y velocidades de viento con los observados en un tanque real que falló.

El objetivo de este trabajo es evaluar estados poscríticos avanzados en tanques con techo flotante y con techo cónico sometidos a la acción del viento considerando la influencia de imperfecciones iniciales. Lo motiva el hecho que un análisis de pandeo lineal modela la etapa

inicial del proceso de pandeo mientras que las observaciones en tanques reales con daño muestran deformaciones avanzadas en la trayectoria poscrítica. Esta evaluación se realizará mediante modelación numérica por elementos finitos considerando no-linealidad geométrica e imperfecciones iniciales, a través de un algoritmo que permite realizar un seguimiento de la trayectoria de equilibrio no lineal en el espacio carga-desplazamiento.

## 2 CASOS DE ESTUDIO

Las estructuras analizadas son: (a) un tanque de acero cilíndrico de espesor constante sin techo que falló en 1995 <sup>1</sup>, (b) un tanque de acero circular con techo cónico con evidencia de falla en la cáscara cilíndrica <sup>3</sup>. Este último se encontraba vacío durante el paso del huracán y presenta espesor variable como se muestra en la Figura 1. En Tabla 1 se resumen las características de interés para ambos tanques.

	Tanque sin techo	Tanque con techo cónico
Radio	19 m	15.24 m
Altura	7.6 m	12.192 m
Espesor	0.01 m	Variable
Módulo de Elasticidad	$2.068 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$	$2.068 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
Módulo de Poisson	0.3	0.3
Tensión de Fluencia	$2.156 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$	$2.156 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

Tabla 1: Datos usados en el análisis.

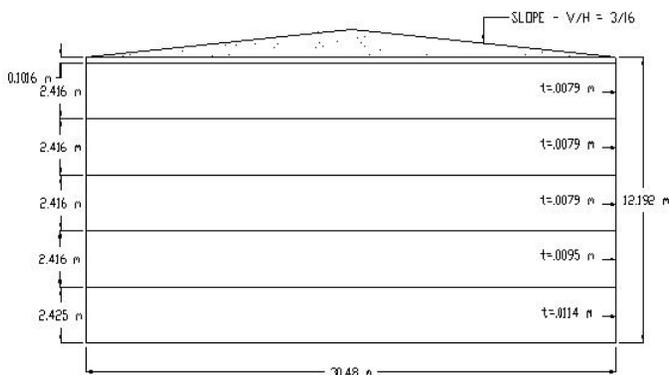


Figura 1: Dimensiones del tanque con techo cónico.

La simulación fue realizada mediante el programa de elementos finitos de propósitos múltiples ABAQUS <sup>12</sup>. El tanque sin techo fue modelado con elementos de cáscara denominados S8R5 con 20 divisiones en altura y un total de 1000 elementos. El elemento S8R5 es un elemento de 8 nodos con 5 grados de libertad por nodo. Dadas las condiciones de

simetría se modeló la mitad del tanque con condiciones de borde fijo en la unión entre la cáscara y la fundación. El tanque con techo cónico fue modelado con elementos de cáscara rectangulares y triangulares, S4R y S3R, respectivamente con cuatro y tres nodos por elemento. El tanque analizado presenta rigidizadores en el techo que también fueron modelados. En este caso se modeló el tanque completo resultando un total de 12325 elementos.

La distribución de presión de viento adoptada sobre las paredes cilíndricas del tanque fue la correspondiente a la recomendación ACI-ASCE-1991 usada anteriormente por otros autores<sup>1-3</sup>. Esta variación de presión tiene los valores positivos en la zona próxima al meridiano de barlovento, y presiones negativas en el resto del cilindro, considerando una distribución de presión constante en la dirección vertical. La distribución circunferencial aplicada en la cáscara cilíndrica para ambos modelos analizados es:

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

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  $p$  es la presión externa del viento,  $\lambda$  es el parámetro usado para aumentar la carga y  $\varphi$  es el ángulo con respecto a la dirección del viento.

La distribución de presión usada sobre el techo responde a un modelo de carga variable con orientación inversa a la presión sobre las paredes con succión en la zona próxima al meridiano de incidencia del viento y compresión en el resto del techo. Esta distribución se aplica en una distancia de un cuarto del diámetro del techo medido desde la unión entre el techo y la pared del tanque. Méndez y Godoy<sup>3</sup> mostraron que tal distribución era compatible con las evidencias de daño halladas.

### 3 ANÁLISIS COMPUTACIONAL

La inestabilidad del equilibrio es un proceso complejo que ocurre cuando la estructura no puede continuar absorbiendo cargas con la forma que posee y debe modificar su geometría inicial para resistir cargas adicionales. En esas nuevas configuraciones de deformadas se producen grandes cambios en la geometría, razón por la cual es necesario realizar un análisis no lineal geométrico y de material. Los estudios estáticos han demostrado que las estructuras de cáscaras pueden ser muy sensibles ante imperfecciones pequeñas (ver, por ejemplo, la Referencia [14]); por ello es necesario tener en cuenta la sensibilidad de las cargas máximas de pandeo a imperfecciones geométricas o de cargas que pueden estar presentes por defectos de construcción o acciones secundarias que inducen daño localizado.

Los resultados de este trabajo se llevaron a cabo en dos etapas. En una primera etapa de la simulación se realizó un análisis lineal de autovalores con el objeto de obtener las cargas críticas de pandeo (autovalor) y la forma de modo asociada (autovector). Los resultados obtenidos son comparados con aquellos hallados en otros trabajos<sup>1-3</sup>. Esto provee una estimación de los valores que pueden ser esperados en un análisis no lineal y los posibles

modos.

En la segunda etapa se llevó a cabo un análisis estático no lineal. En este punto interesa analizar el comportamiento de los desplazamientos producidos por un incremento de la distribución de carga aplicada considerando una relación no lineal carga-desplazamiento previa a la carga crítica, su comportamiento en la vecindad de la carga crítica y su evolución en la trayectoria poscrítica. Con este propósito se utilizó el método de Riks modificado disponible en el programa ABAQUS que permite obtener soluciones de equilibrio estático no lineales para problemas inestables, en el que la carga y/o desplazamiento pueden disminuir cuando la solución evoluciona. El método de Riks permite trazar la trayectoria estable o inestable de la estructura con pandeo.

Para evaluar la sensibilidad a las imperfecciones se introdujo una imperfección inicial en la geometría perfecta de manera que haya en la respuesta una contribución en el modo de pandeo previa a que se alcance la carga crítica. Las imperfecciones iniciales fueron introducidas a la estructura como imperfecciones geométricas según la forma de modo o como cargas secundarias para excitar el modo de pandeo. Estas cargas se aplican como cargas muertas con valores fijos antes de iniciar el algoritmo de Riks. Con relación a este aspecto hay dos factores que pueden modificar el comportamiento de pandeo: la forma de la imperfección y la amplitud de la imperfección. Por esta razón se plantearon dos formas diferentes de imperfección, una de las formas propuestas es proporcional a la forma de pandeo y la otra tiene deformaciones impuestas en un sector localizado de la cáscara.

#### 4 TANQUE SIN TECHO

Para el tanque sin techo de la Tabla 1, el valor de carga crítica de pandeo hallada en este trabajo con ABAQUS<sup>12</sup> es de 2.212 kN/m<sup>2</sup>. Este valor es adecuado comparado con el hallado por Flores y Godoy<sup>1</sup> de 2.207 kN/m<sup>2</sup> usando un programa para propósitos específicos, y por Godoy y Méndez<sup>3</sup> de 2.614 kN/m<sup>2</sup> usando ALGOR<sup>13</sup>, teniendo en cuenta la diferencia de los modelos usados en cada caso. La forma de modo obtenida es la mostrada en la Figura 2.a en una vista superior y en 2.b en perspectiva. Dicha forma de modo también muestra buen acuerdo con los obtenidos por los autores mencionados anteriormente.

Se analizaron imperfecciones iniciales de cargas impuestas y geométricas según la forma de modo de pandeo asociado a la carga crítica mas baja en el análisis de la cáscara perfecta, aplicadas en el sentido del modo de pandeo (Figura 3) y en sentido contrario al mismo (Figura 4). Las cargas aplicadas según los esquemas 3.a y 4.a fueron analizadas con diferentes intensidades  $P= 5, 10, 20$  kN y para imperfección con la forma de modo, la relación entre la amplitud máxima y el espesor es de  $\xi/t = 0.0068$  en ambos casos (Figuras 3.b y 4.b).

La amplitud de las configuraciones deformadas iniciales impuestas por las diferentes precargas en el nodo de mayor desplazamiento, ubicado en el borde superior del tanque sobre el meridiano de incidencia del viento, varían entre 2.4% y 0.6 % del espesor de la cáscara.

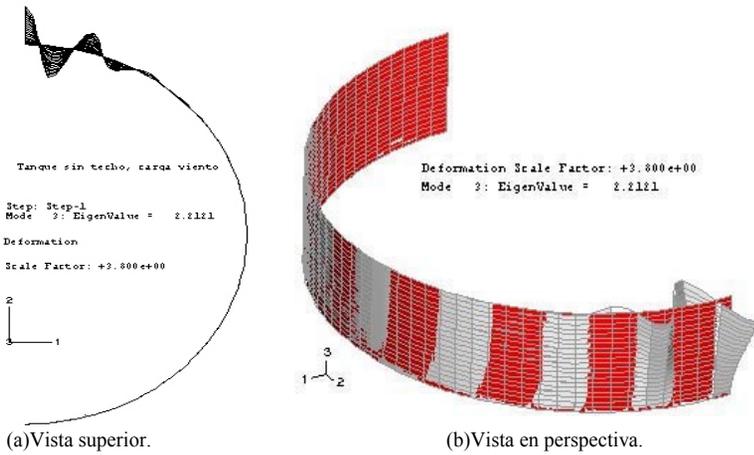


Figura 2: Modo de pandeo obtenido.

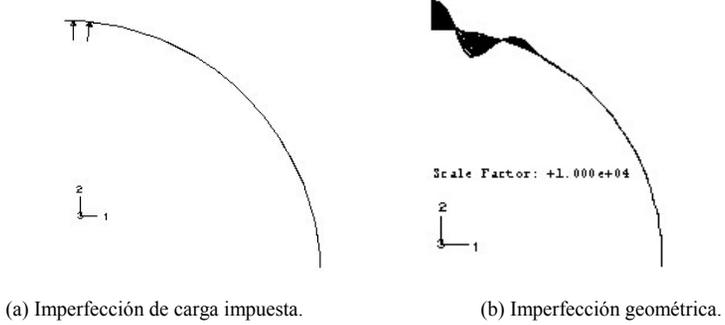


Figure 3: Imperfecciones en sentido de modo de pandeo.

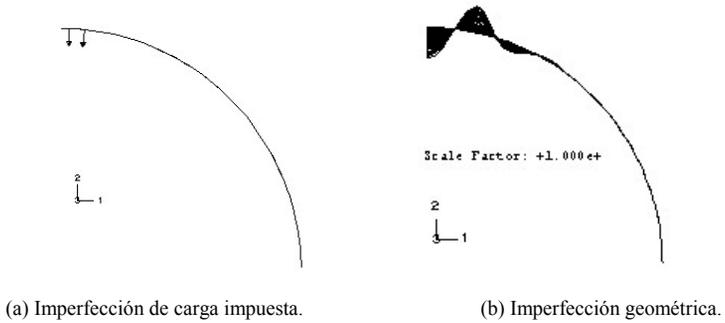


Figure 4: Imperfecciones en sentido contrario al modo de pandeo.

En las referencias las diferentes cargas correspondientes a Figura 3.a aparecen como  $P=-5, -10, -20$ ; para la Figura 3.b como Modo (-); para la Figura 4.a aparecen como  $P=5, 10, 20$  y para la Figura 4.b como Modo (+).

Los puntos analizados para realizar el seguimiento de la trayectoria en el proceso de aumento de carga están ubicados en el borde superior del tanque ya que allí se presentan los mayores desplazamientos en el modo de pandeo. Se consideraron los siguientes nodos: uno ubicado en el meridiano de incidencia del viento (nodo A), otro a  $90^\circ$  (nodo B) y otro en el meridiano a sotavento (nodo C).

Al analizar precargas que produzcan deformaciones contrarias al modo de pandeo y comenzar el aumento de carga, en la estructura se producen deformaciones en el sentido de la carga de viento. El nodo ubicado a barlovento se desplaza hacia el interior del tanque desde la deformada inicial hasta niveles de carga de 65-70 % de la carga crítica, con desplazamientos muy pequeños. A partir de ese estado el nodo comienza a desplazarse en sentido contrario con mayores desplazamientos a medida que se acerca a la carga crítica apareciendo autovalores negativos en la matriz de rigidez y reproduciendo la deformada la forma de pandeo con valores de factor de proporcionalidad de carga (LPF) muy cercanos a la carga crítica (Figura 5.a). A continuación se acentúa esa forma de deformada aumentando fuertemente los desplazamientos en los puntos indicados con la flecha en ese sentido. A continuación, con niveles de carga del 40 % de la carga crítica, cambia nuevamente el comportamiento comenzando a tener el nodo A desplazamientos hacia el interior del tanque y posteriormente con un 65% de la carga crítica empieza a tomar valores negativos con una forma de deformada como la mostrada en la Figura 5.b.

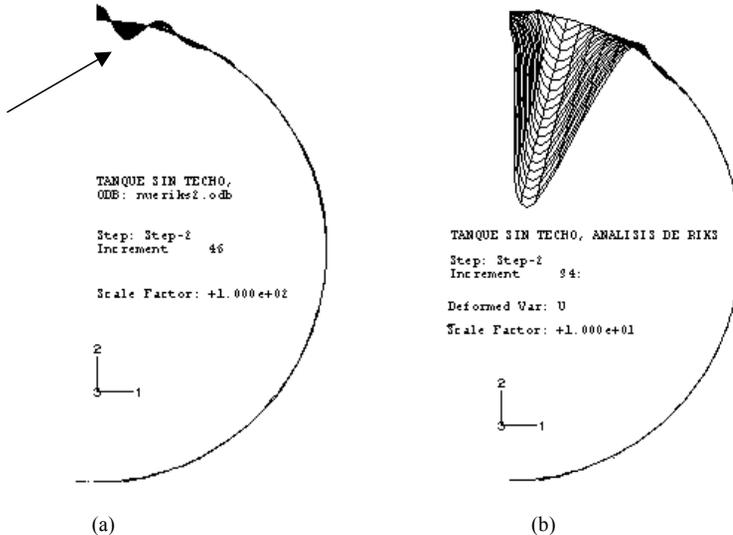


Figure 5: Deformadas correspondientes a precargas en sentido contrario a modo de pandeo.

Si la precarga produce una deformada en el sentido del modo de pandeo, al comenzar el proceso de aumento de la carga desde la deformada inicial el nodo A comienza a desplazarse hacia el interior del tanque tomando posiciones en el interior de la estructura perfecta para valores de carga del orden del 15 % de la carga crítica con una forma como la representada en la Figura 6.a. Posteriormente continúa deformándose en ese sentido, de modo que al acercarse a la carga crítica se producen mayores desplazamientos. Con valores de carga del orden del 98% de la carga crítica aparecen autovalores negativos en la matriz de rigidez con una deformada similar a la forma de pandeo pero en sentido contrario como se observa en Figura 6.b. A partir a ese estado continua deformándose hacia el interior del tanque con grandes desplazamientos y una deformada como la mostrada en la Figura 6.c. Posteriormente con un nivel de carga de 1.13 kN aproximadamente comienza a invertirse la forma de la deformada teniendo el nodo A desplazamientos hacia el exterior.

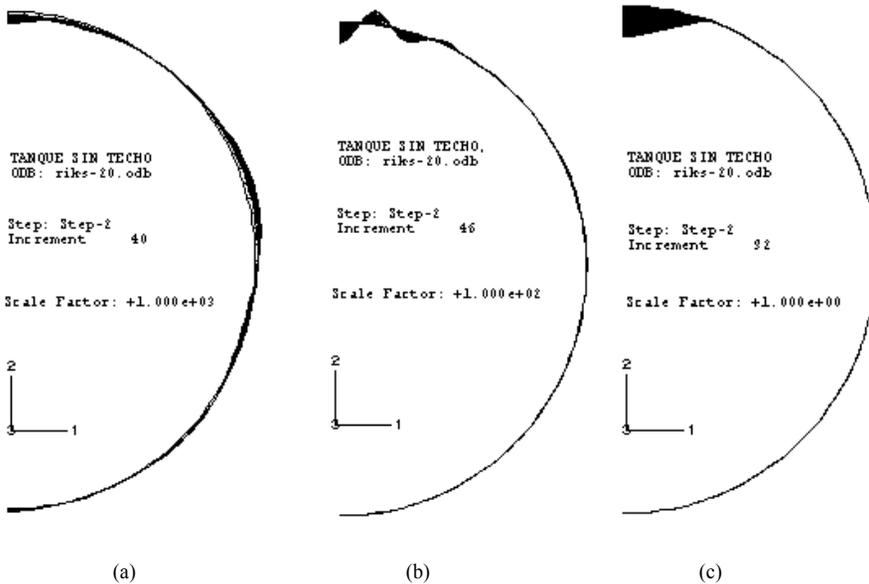


Figure 6: Deformadas correspondientes a precargas en sentido de modo de pandeo.

Como puede observarse en los casos representados en Figuras 5 y 6 la configuración deformada en el análisis poscrítico depende de la forma de la imperfección introducida en la estructura.

Para todos los casos analizados se construyó la curva carga-desplazamiento relacionando el factor de proporcionalidad de carga (LPF) con el desplazamiento de los nodos indicados anteriormente. En los nodos A y C se utilizó el desplazamiento según el eje Y (V) y en el

nodo B el desplazamiento según el eje X (U). En las Figuras 7, 8, 9 se muestran los desplazamientos del nodo A considerando en cada gráfico diferentes escalas para observar el comportamiento con mas detalle. Los gráficos 10 y 11 muestran respectivamente los desplazamientos de los nodos B y C.

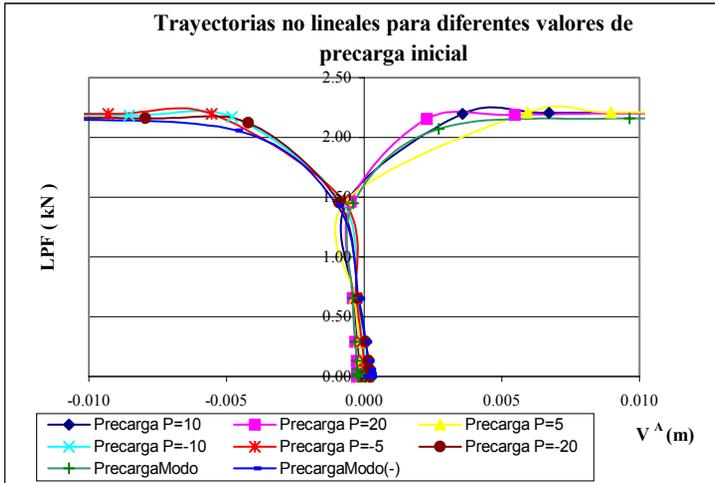


Figura 7: Trayectoria de equilibrio en Nodo A.

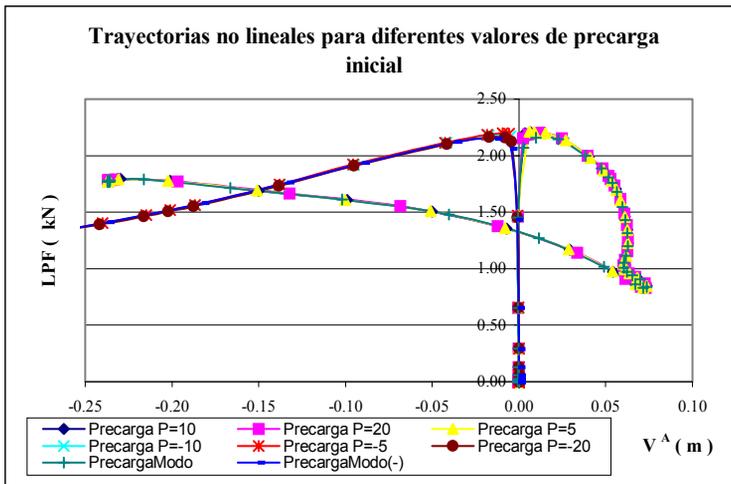


Figura 8: Trayectoria de equilibrio en Nodo A.

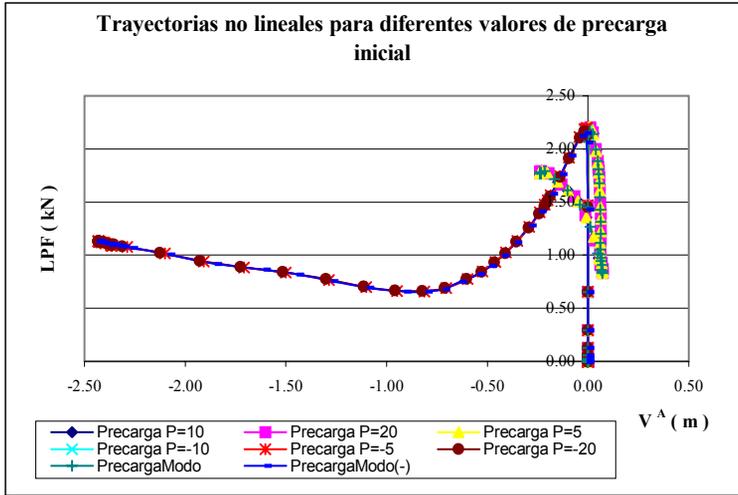


Figura 9: Trayectoria de equilibrio en Nodo A.

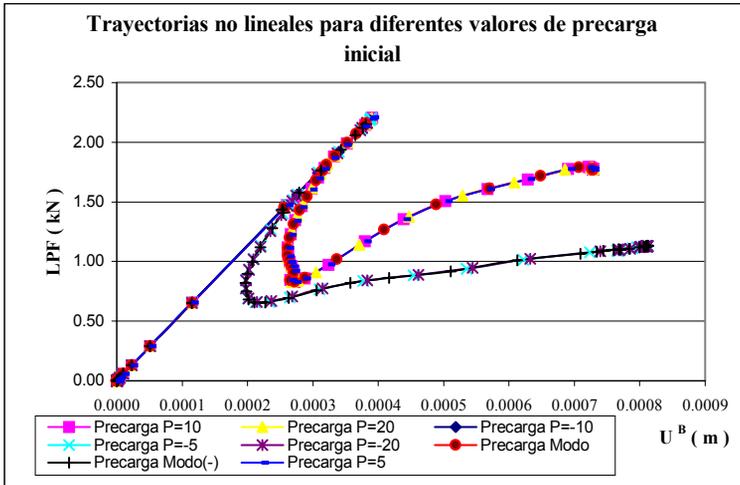


Figura 10: Trayectoria de equilibrio en Nodo B.

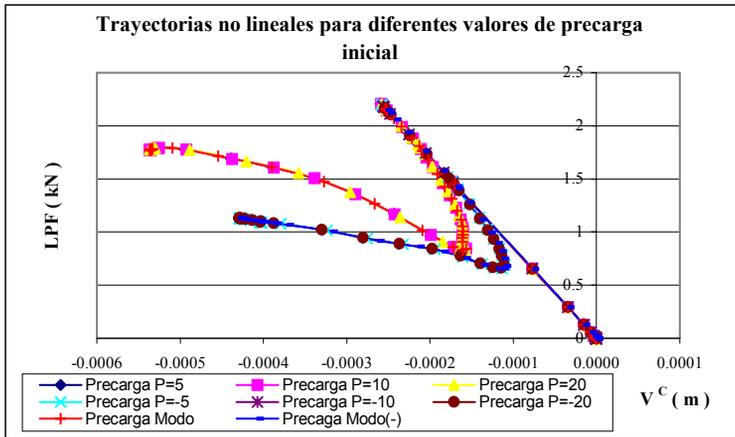


Figura 11: Trayectoria de equilibrio en Nodo C.

Se puede observar en todos los casos que la trayectoria poscrítica es altamente no lineal. Teniendo en cuenta la no-linealidad de la trayectoria fundamental el cambio de trayectoria se produce para un nivel de carga del orden del 97-99 % de la carga crítica hallada considerando una trayectoria fundamental lineal. Analizando las Figuras 9, 10 y 11 se observa que al llegar el nivel de carga al correspondiente a la carga crítica hay un cambio de trayectoria hacia una trayectoria de equilibrio secundaria inestable y posteriormente al continuar el proceso de carga un nuevo cambio de trayectoria hacia una estable. Este comportamiento es similar en todos los puntos analizados para los diferentes estados de imperfección inicial. Comparando el orden de magnitud de los desplazamientos en los diferentes puntos analizados, los desplazamientos producidos en el nodo A son notablemente superiores. Por esta razón continuaremos el análisis sobre la base del comportamiento de este nodo.

Un análisis de sensibilidad de imperfección ( Figura 12 ) representa el factor de carga máximo hallado para los diferentes estados de precarga, adimensionalizado respecto a la carga crítica, en función del desplazamiento  $V$  inicial en el nodo A para la precarga respectiva, adimensionalizado respecto el espesor de la cáscara cilíndrica.

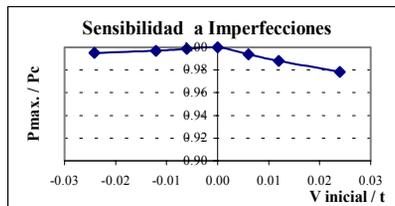


Figura 12: Sensibilidad a imperfecciones.

Se puede observar en ambos casos los resultados obtenidos muestran baja sensibilidad al tamaño de la imperfección y un comportamiento diferente cuando varía la forma de la imperfección, sin grandes diferencias al variar la magnitud de la misma..

Del análisis de la Figura 9 se puede concluir que al llegar a la carga crítica aparece una bifurcación simétrica inestable. Cuando la forma de la imperfección es en sentido contrario a la forma de pandeo la trayectoria obtenida acompaña a esta trayectoria secundaria inestable con desplazamientos positivos en el nodo A en cambio cuando la imperfección es en sentido contrario, la trayectoria obtenida acompaña a la rama descendente con desplazamientos negativos en el nodo analizado. En ambos casos la trayectoria es inestable. Este comportamiento ya fue observado en las Figuras 5 y 6.

## 5 TANQUE CON TECHO CÓNICO

Con el objeto de evaluar la carga crítica mas baja y la forma de modo asociada, también se realizó en el modelo de tanque con techo de autovalores lineal. La carga crítica calculada por ABAQUS <sup>12</sup> fue de 2.687 kN/m<sup>2</sup> para la distribución de viento sobre las paredes y techo mencionada anteriormente, mostrando acuerdo aceptable con la hallada por Godoy y Méndez <sup>3</sup> de valor 3.03 kN/m<sup>2</sup> usando ALGOR <sup>13</sup>. Se toma como referencia el orden de magnitud ya que se presentan diferencias en los modelos usados en ambos casos. La forma de modo asociada que se muestra en la Figura 13 es consistente con la hallada por los autores antes mencionados y con la evidencia de daño exhibida en el tanque real.

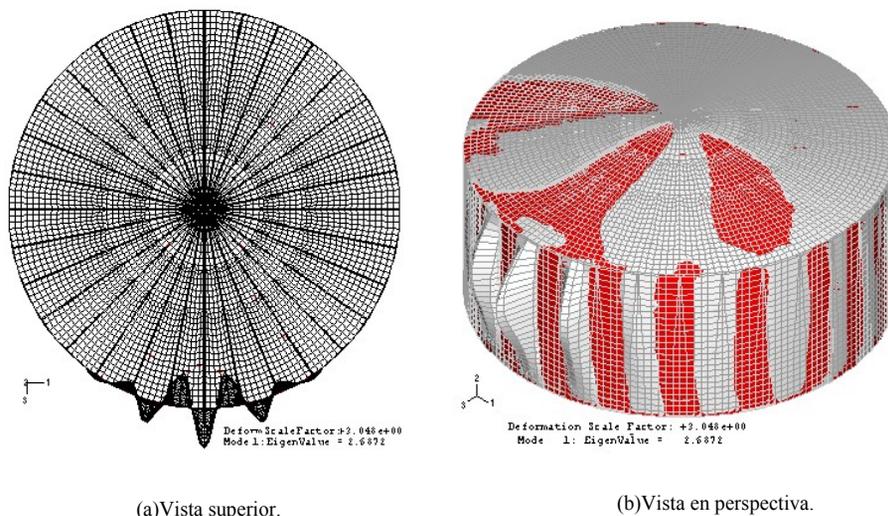


Figure 13: Modo de pandeo en tanque con techo cónico.

Para realizar el seguimiento de la trayectoria en el proceso de aumento de carga se

analizaron dos nodos ubicados sobre el meridiano de incidencia del viento: uno en la unión entre el techo y la cáscara cilíndrica (nodo D) y otro aproximadamente a dos tercios de la altura (nodo E) donde se verifica el mayor desplazamiento en la forma de modo.

Se analizaron imperfecciones iniciales de cargas impuestas y geométricas según la forma de modo de pandeo asociado a la carga crítica mas baja en el análisis de la cáscara perfecta, aplicadas en el sentido del modo de pandeo y en sentido contrario al mismo con una distribución similar a la usada en el tanque sin techo sobre la cáscara cilíndrica. La deformada inicial en sentido contrario al de pandeo se muestra en la Figura 14.a y en el sentido del modo de pandeo en la Figura 14.b. Las cargas aplicadas fueron analizadas con diferentes intensidades  $P= 20,50,100,200$  kN y para imperfección geométrica con la forma del primer modo se utilizó un factor de escalamiento de 0.005 en ambos casos. La amplitud de las configuraciones deformadas iniciales impuestas por las diferentes precargas en el nodo de mayor desplazamiento varían entre 12% y 4 % del espesor medio de la cáscara.

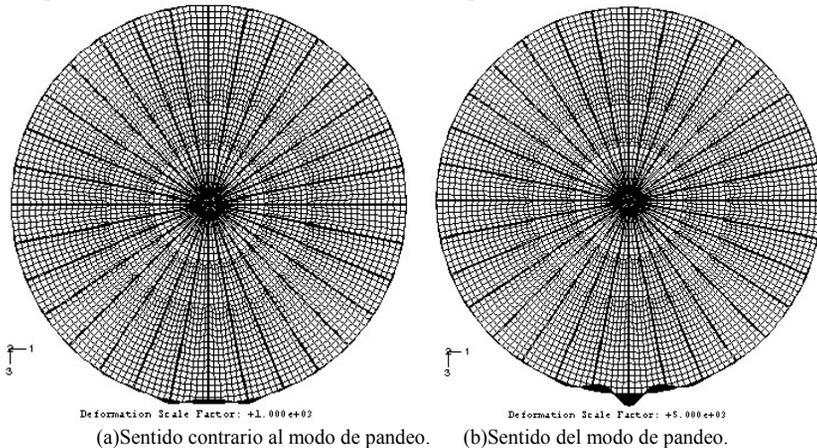


Figura 14: Imperfecciones iniciales.

Si la imperfección inicial es en sentido contrario al modo de pandeo, la estructura tiende a recuperar su forma original desplazándose el nodo analizado E desde esa posición inicial hacia afuera del tanque. Al llegar el factor de proporcionalidad de carga (LPF) a valores de 96-97 % de la carga crítica la deformada reproduce la forma de pandeo, como se observa en la Figura 15.a. A partir de ese estado los desplazamientos continúan aumentando con esa forma siendo cada vez mayores en la zona indicada en la Figura 15.a, llegando LPF a valores del 69 % de la carga crítica. Posteriormente el nodo sobre el meridiano sigue desplazándose hacia fuera involucrándose cada vez una zona mayor de la cáscara en la onda hacia el interior del tanque indicada anteriormente (Figura 15.b). Considerando imperfección geométrica con forma del primer modo, al alcanzar la carga valores del 85 % de la carga crítica se presenta en el comportamiento poscrítico una tendencia a desplazarse el meridiano a barlovento hacia el exterior del tanque perdiendo la deformada la simetría de su forma, aproximándose a la forma

del segundo modo crítico con factor de carga de  $2.679\text{kN/m}^2$ . Al continuar el proceso de carga vuelve a recuperar la simetría en su deformada.

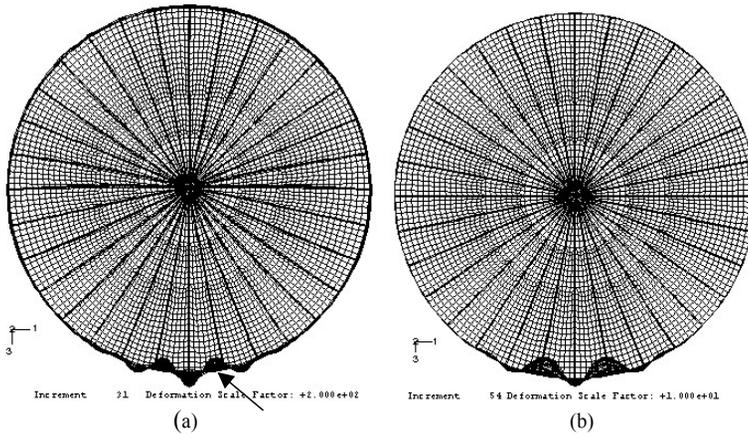
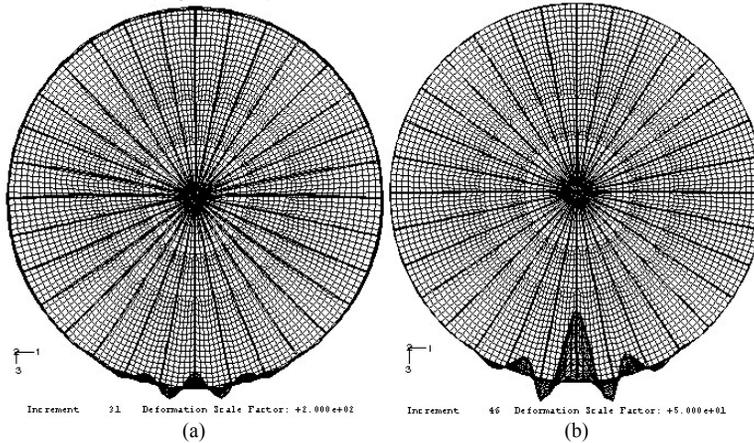


Figura 15: Deformadas para precarga en sentido contrario al modo crítico.

Cuando la imperfección inicial tiene el sentido del modo crítico, la estructura desde ese estado comienza a volver a la posición indeformada recuperándose hacia el interior del tanque. Con valores de carga del orden del 93 al 97% del valor crítico la deformada reproduce el modo de pandeo en sentido contrario (Figura 16.a). A partir de ese estado continúa desplazándose el nodo analizado hacia el interior hasta niveles de carga del orden de 77 % de carga crítica aproximadamente (Figura 16.b). Desde esa posición comienza a desplazarse en sentido contrario hacia el exterior continuando de esa manera pero perdiendo la simetría en la forma de la deformada (Figura 16.c).



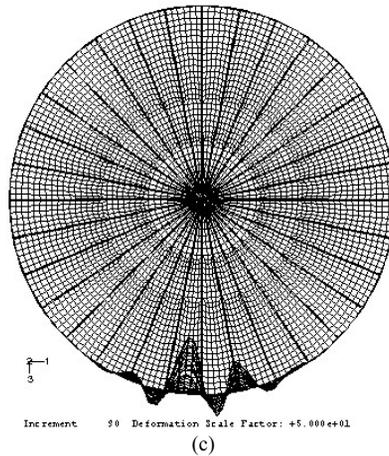
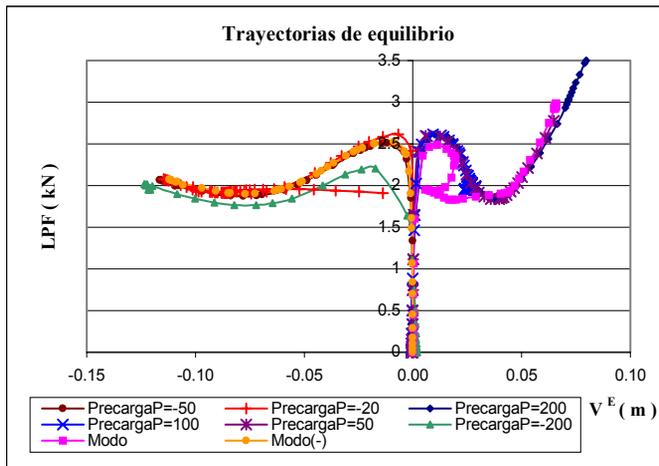
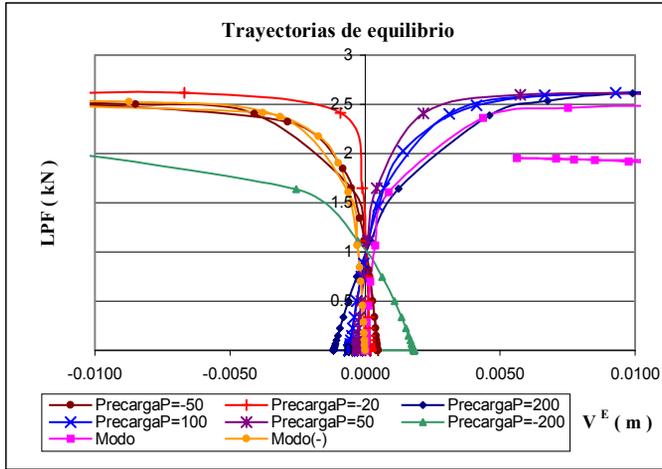


Figura 16: Deformadas para precarga en sentido del modo crítico.

Para todos los casos analizados se construyó la curva carga-desplazamiento relacionando el factor de proporcionalidad de carga (LPF) con el desplazamiento de los nodos indicados anteriormente. Se analizó el comportamiento de los nodos en el sentido Y(V). En Figuras 17.a y 17.b se muestran los desplazamientos del nodo E considerando en cada gráfico diferentes escalas para observar el comportamiento con mas detalle y la Figura 18 el desplazamiento del nodo D.



(17.a): Desplazamiento V entre [-0.15 , 0.1]



(17.b): Desplazamiento V entre [-0.01 , 0.01].

Figuras 17: Trayectoria de equilibrio en Nodo E.

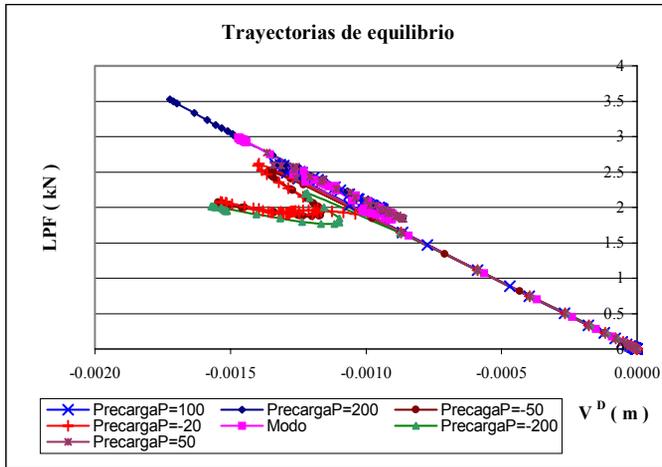


Figura 18: Trayectoria de equilibrio en Nodo D.

Teniendo en cuenta la no-linealidad de la trayectoria fundamental el cambio de trayectoria se produce para un nivel de carga del orden del 82-97 % de la carga crítica hallada considerando una trayectoria fundamental lineal. También en este caso se observa que la trayectoria poscrítica es altamente no lineal, con un cambio de trayectoria hacia una

trayectoria de equilibrio secundaria inestable al llegar el nivel de carga al correspondiente a la carga crítica y posteriormente un nuevo cambio de trayectoria hacia una estable.

Se hizo un análisis de sensibilidad de imperfección mostrado en la Figura 19. Se representó el factor proporcionalidad de carga máximo hallado para los diferentes estados de precarga, adimensionalizado respecto a la carga crítica, en función del desplazamiento  $V$  inicial en el nodo E para la precarga respectiva, adimensionalizado respecto el espesor medio de la cáscara cilíndrica. Se observa que el tanque con techo presenta baja sensibilidad a imperfecciones.

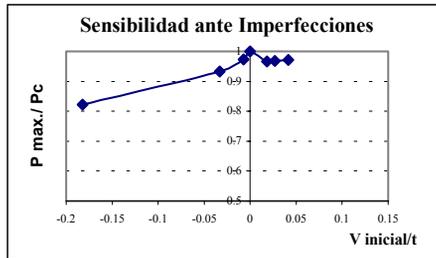
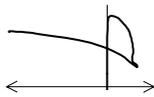


Figura 19: Sensibilidad a imperfecciones.

## 6 ANALISIS COMPARATIVO

En los casos analizados, tanque sin techo y con techo cónico, el comportamiento de la respuesta en el proceso de aumento de carga difiere con la forma de la imperfección, según ésta sea hacia el interior del tanque o hacia el exterior del mismo. En Tabla 2 se presenta un resumen del comportamiento en el proceso de seguimiento de la trayectoria carga-desplazamiento.

Tipo de Imperf.	Tanque sin techo	Tanque con techo
Meridiano a barlovento hacia el interior del tanque	 <p>1- Desplazamiento hacia el exterior del tanque, tratando de recuperar su forma original y continuando a partir de la bifurcación en ese sentido. 2- Cambia en comportamiento con desplazamientos hacia el interior del tanque, siguiendo el sentido de la presión del viento.</p>	 <p>1- Desplazamiento hacia el exterior del tanque, tratando de recuperar su forma original y continuando a partir de la bifurcación en ese sentido. 2- El techo impide el desplazamiento hacia el interior y continúan los desplazamientos hacia el exterior.</p>

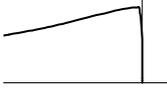
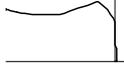
		
Meridiano a barlovento hacia el exterior del tanque	1-Desplazamiento hacia el interior del tanque, tratando de recuperar su forma original y continuando a partir de la bifurcación en ese sentido. 2- Continúan los desplazamientos hacia el interior.	1-Desplazamiento hacia el interior del tanque, tratando de recuperar su forma original y continuando a partir de la bifurcación en ese sentido. 2-El techo limita los desplazamientos hacia el interior y comienza a desplazarse hacia afuera.
Tendencia poscrítica	Desplazamientos hacia el interior del tanque del meridiano a barlovento.	Desplazamientos hacia el exterior del tanque del meridiano a barlovento.

Tabla 2: Resumen comportamiento poscrítico.

En general, en los dos casos analizados se observa que, a partir de la forma de imperfección inicial, la estructura tiende a recuperar su forma original. En el tanque sin techo el comportamiento general en estados poscríticos avanzados es desplazarse hacia el interior del tanque, en el sentido de la presión del viento. En el tanque con techo el comportamiento en las proximidades del estado crítico es similar al del tanque sin techo, pero la presencia del techo impide o limita esa tendencia a desplazarse hacia el interior generando una tendencia a desplazarse hacia el exterior en el meridiano de incidencia del viento.

Para estudiar el comportamiento de las tensiones en los tanques se usó el criterio de fluencia de Von Mises considerando una tensión de fluencia de  $2.156 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ . Este valor es superado en los casos indicados con una flecha en las Figuras 20, en coincidencia con esos incrementos.

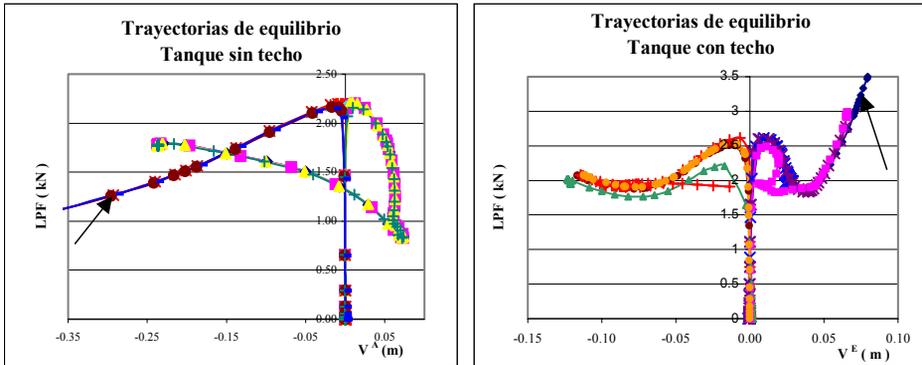


Figura 20: Trayectorias de equilibrio.

En el tanque sin techo las deformaciones plásticas aparecen en la zona superior del meridiano a barlovento y en el tanque con techo en la zona próxima al nodo E. Se puede observar en estas figuras que la superficie de fluencia es alcanzada en la trayectoria poscrítica por lo tanto la estructura experimenta primero inestabilidad elástica y la plasticidad limita la reserva de carga poscrítica.

## 7 CONCLUSIONES

En los dos casos analizados de tanque sin techo y con techo cónico se realizó un análisis estático no lineal geométrico evaluando el comportamiento de los desplazamientos producidos por un incremento de la distribución de carga aplicada en las proximidades de la carga crítica y en estados poscríticos. Al aproximarse la carga al valor crítico se observó en ambos casos un cambio de trayectoria por la presencia de una bifurcación simétrica inestable y al avanzar en el comportamiento poscrítico exhibe otro cambio a una trayectoria estable.

La respuesta de la estructura en el proceso de carga depende de la forma de la imperfección inicial variando según que el meridiano de incidencia del viento presente desplazamientos hacia el interior del tanque o hacia el exterior del mismo.

Al comenzar el proceso de aumento de carga se presenta en ambos casos una tendencia de la estructura a recuperar su forma original. El comportamiento posterior está influenciado por la presencia del techo. En el tanque sin techo la tendencia en estados poscríticos avanzados es a presentar desplazamientos hacia el interior del tanque en la zona de incidencia del viento, siguiendo el sentido de la presión del mismo. En los tanques con techo, su presencia impide o limita este desplazamiento hacia adentro generando configuraciones deformadas con meridiano a barlovento desplazamientos hacia el exterior o hacia el interior con menores desplazamientos.

Los estudios realizados usando análisis estático con no linealidad geométrica muestran que el fenómeno poscrítico es altamente no lineal y requiere algoritmos adecuados para seguir trayectorias no lineales geométricas y de material. ABAQUS ha resultado una herramienta adecuada para realizar esos análisis.

### **Agradecimientos**

Este trabajo fue financiado con apoyo de la Universidad Nacional del Comahue, la Agencia Córdoba Ciencia, y CONICET.

## 8 REFERENCIAS

- [1] Flores, F.G. y Godoy, L.A., “Buckling of short tanks due to hurricanes”, *Engineering Structures*, vol. 20 (8), pp.752-760 (1998).
- [2] Godoy, L.A. y Flores, F.G., “Imperfection sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks”, *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 13 (5), pp. 533-542 (2002).
- [3] Godoy, L.A. y Méndez, J.C., “Buckling of aboveground storage tanks with conical roof”, *Thin-Walled Structures*, Elsevier Science, Oxford, pp. 661-668 (2001).

- [4] Rössinger, F. y Greiner, R., “Buckling of wind loaded cylindrical shells- Application to unstiffened and ring-stiffened tanks”, en *Buckling of Shells* ( Ed.E. Ramm ), Springer Verlag, Berlin, pp. 305-331 (1982).
- [5] Megson, T.H., Harrop, J. y Miller, M., “The Stability of large diameter thin-walled steel tanks subject to wind loading”, *Coloquium on Stability of Plate and Shell Structures*, Ghent University, pp.529-538 (1987).
- [6] Greiner, R. y Derler, P., “Effect of Imperfections on wind loading cylindrical shells”, *Thin-Walled Structures*, vol 23, pp. 271-399 (1995).
- [7] Schmidt, H., Binder, B., Lange, H., “Post-Buckling strenght design of thin-walled cylindrical tanks under wind load”, *Thin Walled Structures*, vol.31, pp.203-220, (1998).
- [8] Maher,F.J., “Wind loads on dome-cylinder and dome-cone shapes”, *ASCE J. Struct.Div.*, **92**(5), 79-96, (1966).
- [9] Purdy,D.M., Maher,F.J. y Frederick,D., “Models Studies of winds loads on flat-top cylinders”, *ASCE J. Struct.Div.*, **93**(2), 379-395, (1967) .
- [10]Esslinger M., Ahmed S. and Schroeder H., “Stationary wind loads of open topped and roof-topped cylindrical silos”, *Journal of Structural Division*, ASCE, (1971).
- [11]Greiner R., “Cylindrical Shells: wind loading”, Chapter 17 in: *Silos*, Ed. C.J.Brown& L.Nilssen, EFN Spon, pp.378-399, (1998).
- [12]Abaqus, Abaqus/Standard Version 6.2, *Hibbitt, Karlsson & Sorensen,Inc.*, USA, (1999).
- [13]Algor , Linear and nonlinear static and dynamic finite element stress analysis, *ALGOR Inc*, Pittsburgh, PA, USA, (1999).
- [14]Godoy L.A. *Theory of Elastic Stability: Analysis and Sensitivity*, Taylor and Francis, Philadelphia (2000).