

## COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO DEBIDO A FUEGO

Horacio D. Calabró<sup>a</sup>, Luis A. Godoy<sup>b</sup> y Rossana C. Jaca<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina, [daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar](mailto:daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar).

<sup>b</sup>Ph.D., Profesor Titular Plenario, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, e Investigador Superior, CONICET, Argentina.

<sup>c</sup>Grupo de Métodos Numéricos y Experimentales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, [rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar](mailto:rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar).

Dirección para correspondencia: [lgodoy@com.uncor.edu](mailto:lgodoy@com.uncor.edu)

**Palabras clave:** Cáscaras, Elementos Finitos, Estructuras metálicas, Fuego, Tanques.

**Resumen.** En este trabajo se presenta un análisis del comportamiento estructural de tanques de almacenamiento de petróleo bajo diferentes representaciones de fuego adyacente a la estructura, que se modelan como acciones térmicas. En la simulación numérica se modela la cáscara con elementos finitos de doble curvatura utilizando un código de propósitos generales. Para comprender la mecánica del comportamiento estructural de esta tipología se estudia la estabilidad de la cáscara bajo acciones térmicas. El estudio se enfoca en determinar las configuraciones deformadas y las temperaturas que identifican el estado crítico de pandeo y también el comportamiento poscrítico, mediante análisis de bifurcación lineal (conocido como LBA), análisis no lineal geométrico (GNLA) y análisis no lineal geométrico con imperfecciones (GNIA) respectivamente. Para el análisis se modela una geometría de tanque de almacenamiento de petróleo (representativa de diferentes volúmenes de almacenamiento) expuesto a una distribución de temperatura externa y una carga hidrostática interna, a fin de evaluar la influencia de las características del tanque en la respuesta y la posible estabilización producida por el fluido almacenado en el interior. Los resultados muestran que la inestabilidad se produce a temperaturas muy bajas, del orden de 150°C, con modos que afectan la cara directamente expuesta al fuego.

## 1 INTRODUCCION

Uno de los escenarios de gran importancia en el comportamiento de tanques metálicos de almacenamiento en industrias petroquímicas es el producido por fuego, con el agravante que un incendio puede propagarse también a otros tanques y construcciones vecinas.

Casos emblemáticos de incendio de granjas de tanques han ocurrido en Buncefield, Inglaterra en 2005 (Buncefield, 2008); en Texas City, USA en 2005; y en Bayamon, Puerto Rico en 2009 (Batista Abreu y Godoy, 2011). En el contexto sudamericano, ejemplos recientes de fuego en tanques con graves consecuencias han ocurrido en Amuay, Venezuela en 2012 y en Rio de Janeiro en 2013. En Argentina se registraron incendios recientes en pozos de gas y tanques de almacenamiento. En Julio de 2013 hubo una explosión en un pozo de gas en Plottier, Neuquén; en Junio de 2013 sucedió un gigantesco incendio de un tanque de petróleo en el área Chihuidos, cerca de Rincón de los Sauces, Neuquén; en Abril de 2013 se produjeron explosiones e incendios en una destilería de YPF en Ensenada en La Plata, Buenos Aires; en Octubre de 2011 se produjo un incendio en cercanías de un pozo petrolero en General Roca, Rio Negro; en Agosto de 2011 hubo un principio de incendio en una pileta situada en un pozo petrolero del yacimiento Sierra Barrosa en Aguada Toledo, Añelo, Neuquén.

El fuego genera grandes deformaciones en la cáscara de un tanque, que pueden llegar hasta la destrucción total. Hay varios motivos por los que interesa evaluar efectos debido a fuego en tanques: por una parte, a fin de establecer la secuencia de eventos que ocurrieron durante un incendio y asignar responsabilidades, y por otra parte para mejorar diseños actuales que permitan retardar la respuesta termo-mecánica.

La literatura sobre comportamiento y diseño de estructuras de acero bajo fuego se concentra principalmente en el comportamiento de estructuras de pórticos formadas por vigas y columnas. Sin embargo, ese comportamiento es muy diferente al de estructuras de cáscaras, que tienden a fallar con cambio de forma (fenómeno de pandeo) aun antes de que se agote la capacidad del material. Por otra parte la literatura sobre pandeo de cáscaras se concentra en otros efectos e ignora los térmicos debidos a fuego o explosiones (Rotter y Schmidt, 2008). Un grupo de ingenieros químicos en Italia (Landucci et al., 2009) modelaron el comportamiento mecánico estructural y el problema de transferencia de calor de manera aproximada, a fin de estimar probabilidades de ocurrencia de efectos tipo dominó. El estudio más abarcador al presente ha sido la tesis de Liu (2011), quien llevó a cabo una exploración para fuego equivalente a la de tanques bajo viento, y constituye el mejor nivel de despegue en la actualidad. Liu consideró en detalle la transferencia de calor entre la fuente (un fuego externo adyacente que transfiere calor a través del aire) y un tanque, llegando a representar la distribución de temperatura sobre la pared del tanque. Sin embargo, la contribución sobre el análisis estructural del tanque debida a Liu parece abierta a discusión, habiendo tomado condiciones de bordes que no son representativas de tanques reales, siendo que las condiciones de borde influyen notoriamente en la respuesta bajo acciones térmicas.

En este trabajo, no se modela la fuente de fuego, que pertenece al campo de la ingeniería de fuego y ya ha sido trabajado por otros investigadores (Liu, 2011), sino que el fuego es tenido en cuenta a través del cambio de temperatura que se produce en diferentes zonas de los tanques, ya sea para un tanque aislado o un grupo de tanques. En base a estudios anteriores, se considerará un salto térmico uniforme en el espesor de la pared del tanque.

## 2 GEOMETRIA ESTUDIADA

La elección de la geometría surge de estudiar una recopilación de imágenes de plantas de

tanques de almacenamiento de petróleo en Puerto Rico, Venezuela y Estados Unidos, donde se analiza la relación entre el radio R y la altura H del cilindro del tanque, que caracteriza la esbeltez de la estructura y se seleccionan las cuatro configuraciones consideradas como más representativas tratando de cubrir el mayor espectro de casos posibles. La Figura 1 muestra una síntesis del análisis realizado, donde se observa que la mayor concentración de tanques tiene una relación de esbeltez que varía entre  $0.5 \leq R/H \leq 3.0$ .

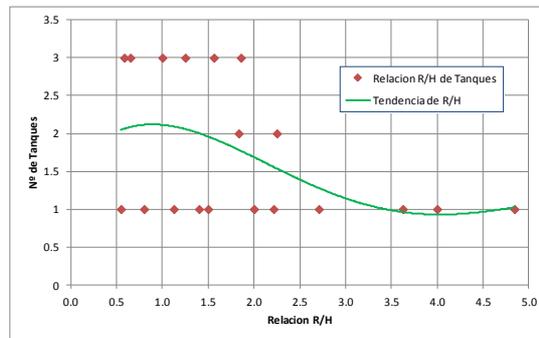


Figura 1: Relación de esbeltez de los tanques analizados.

De acuerdo a esta conclusión, se consideran cuatro tanques con relaciones de esbeltez de  $R/H=0.5$ ,  $1.0$ ,  $2.0$  y  $3.0$  identificadas como tanque 1, tanque 2, tanque 3 y tanque 4 cuyas geometrías se muestran en la Figura 2. Se puede observar que los tanques 1 y 2 tienen techo cónico y los tanques 3 y 4 tienen techo flotante con un anillo rigidizador en la parte superior del casco cilíndrico.

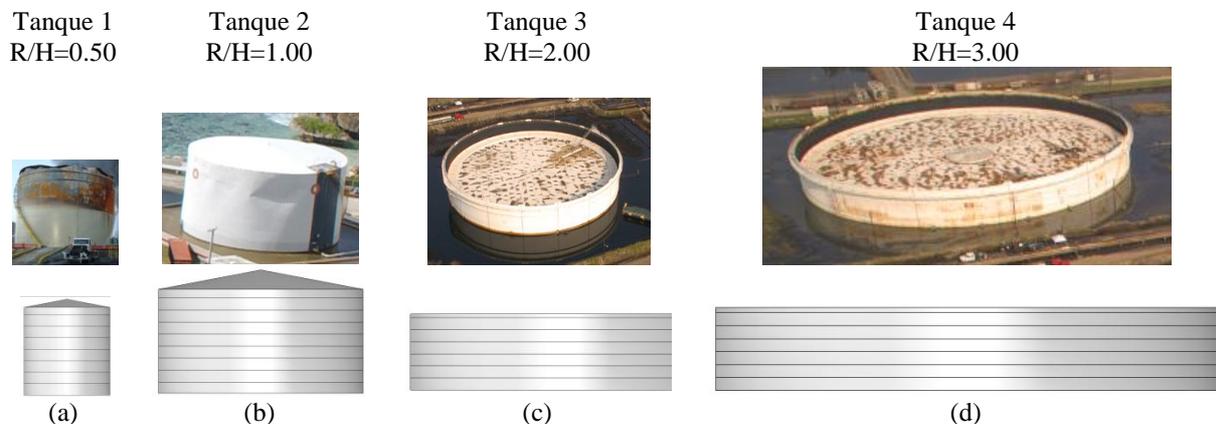


Figura 2: Geometrías seleccionadas para el estudio de tanques ubicados en (a) Guam, USA, (b) Guam, USA, (c) Chalmette Murphy Meraux, Estados Unidos y (d) Chalmette Murphy Meraux, Estados Unidos.

Los tanques a estudiar se dimensionan mediante la norma API 650 (2010), teniendo en cuenta un acero A36, un sobre-espesor por corrosión de 2mm y una altura de virola de 1.5m. Como fluido interior se considera un hidrocarburo con gravedad específica de 0.85 (adimensional) y un nivel del líquido hasta la mitad del tanque. De acuerdo a la norma, el espesor del tanque surge como el valor máximo entre el espesor calculado para el fluido analizado ( $t_d$ ), el espesor de la cáscara por la prueba hidrostática ( $t_r$ ) y el espesor mínimo que depende del diámetro nominal del tanque. Finalmente, se adoptan espesores comerciales compatibles con los que surgen de la aplicación de la norma. Para el techo se adopta un espesor de tres veces el mayor espesor de virola, intentando representar el aporte de rigidez que provee la estructura interna de vigas y columnas de soporte del techo cónico (Godoy y

Batista-Abreu, 2012).

La Tabla 1 detalla los espesores obtenidos para cada tanque en cada virola, V1 es la virola que se encuentra a mayor altura.

Tanque	Espesores de virolas y techo (mm)									
	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6	V 7	V 8	V 9	Techo
1	6	6	6	6	6	6	6	6	-	19
2	6	6	6	6	8	8	10	13	13	38
3	10	10	10	10	13	13	-	-	-	-
4	10	10	10	13	16	19	-	-	-	-

Tabla 1: Espesores de tanques estudiados.

El volumen de almacenamiento de estos tanques es de 1174 m<sup>3</sup> para el tanque 1, 6838 m<sup>3</sup> para el tanque 2, 10678 m<sup>3</sup> para tanque 3 y 24920 m<sup>3</sup> para tanque 4.

De los cuatro tanques identificados, en este trabajo se reportan resultados para el tanque 1, mientras que los otros tres se estudiarán en un trabajo futuro. El tanque 1 tiene un radio de 5.72 m. una altura de 11.43 m y el espesor de las virolas corresponde a lo indicado en la Tabla 1.

### 3 ESTADOS DE CARGA

Los estados de carga que se consideran en este estudio son la carga térmica que simula la acción del fuego sobre el tanque y la carga hidrostática que genera el fluido almacenado sobre la pared del tanque.

La carga térmica incorporada, solo en la zona del casco cilíndrico, presenta una variación del tipo  $\cos^2\theta$  en coordenadas cilíndricas (Liu, 2011). La variación térmica se presenta en sentido radial pero se mantiene constante verticalmente, su expresión analítica está dada por:

$$T(\theta) = \begin{cases} \cos^2\theta, & \text{si } \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} \\ 0, & \text{si } \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (1)$$

Para la modelación computacional del tanque se considera un gradiente de temperatura nulo en el espesor del casco cilíndrico del tanque. Esto es un cambio con respecto a estudios anteriores (Godoy y Batista Abreu, 2012) en los que se suponía un gradiente; sin embargo, tal gradiente no parece ocurrir en incendios (Liu, 2011).

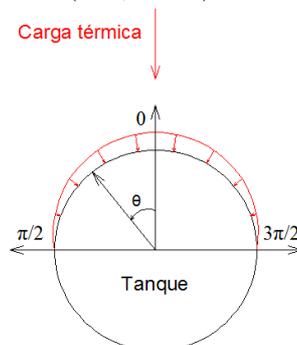


Figura 3: Distribución de la carga térmica.

En la Figura 3 se muestra la variación radial de la carga térmica, que es máxima con un valor unitario en  $\theta=0^\circ$  y vale cero en  $\theta=\pi/2$  y  $3\pi/2$ . La carga hidrostática considerada es la generada por el almacenamiento de hidrocarburo hasta la mitad de la altura del tanque. La ley de variación es lineal desde la base hasta la altura máxima del fluido, como se indica en la ecuación 2.

$$P(h) = \rho \cdot g \cdot h \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido almacenado igual a  $1000\text{kg/m}^3$ ,  $g$  la aceleración de la gravedad igual a  $9.8\text{m/seg}^2$  y  $h$  la altura a la que se desea determinar la carga.

La Figura 4 muestra las dos combinaciones de estados de carga estudiados. Para el tanque se analiza una condición de tanque vacío y actuando solamente la carga térmica como se muestra en el esquema de la Figura 4(a). Además se estudia la posibilidad que simultáneamente actúe una carga térmica y la acción hidrostática del fluido almacenado hasta la mitad de la altura del tanque, como se puede ver en Figura 4(b).



Figura 4: Combinaciones de estados de carga. (a) Tanque con techo cónico con carga térmica, (b) Tanque con techo cónico con carga térmica y carga hidrostática.

## 4 PANDEO EN TANQUE DE PETROLEO DEBIDO A FUEGO

Una estructura llega al estado de pandeo cuando cambia de forma para poder seguir soportando carga. La carga a la cual cambia de forma se denomina carga crítica y la forma adoptada es el modo crítico asociado. En esta sección se muestran los modos de pandeo para las combinaciones de carga y para los cuatro tanques de almacenamiento de hidrocarburo seleccionados. La modelación se realiza usando la técnica de elementos finitos con el programa computacional de propósitos generales ABAQUS (2006). Este programa permite determinar, mediante un análisis de pandeo por bifurcación (LBA), la carga térmica crítica, su modo asociado y la zona del tanque que presenta los mayores desplazamientos. Luego, para el punto de mayor desplazamiento y para tres puntos en el meridiano de máxima carga térmica, dado en  $\theta=0^\circ$ , se hace un seguimiento de trayectoria no lineal geométrica por el método de Riks (1972, 1979) para determinar la curva post pandeo de temperatura-desplazamiento, que nos permite encontrar la máxima temperatura alcanzada. Finalmente se hace un análisis no lineal geométrico con imperfecciones (GNIA) siguiendo la trayectoria del punto más relevante, determinando las curvas de post pandeo temperatura-desplazamiento.

### 4.1 Análisis de Bifurcación Lineal

Cuando la respuesta precrítica es aproximadamente lineal se puede hacer un análisis lineal elástico para estimar el valor de la carga crítica. El programa ABAQUS (2006) permite estimar el pandeo elástico mediante la obtención de autovalores, LBA. Estos son múltiplos del estado de carga que se incorpora a la estructura, considerando al primero como la carga crítica para la que se alcanza la inestabilidad del equilibrio. La solución se obtiene resolviendo un problema de autovalores y autovectores expresado por la ecuación 3.

$$(K_0 + \lambda_i \cdot K_G) \Phi_i = 0 \quad (3)$$

donde  $K_0$  es la matriz de rigidez lineal del sistema,  $K_G$  la matriz de carga-geometría, que incluye la parte no lineal de las relaciones cinemáticas,  $\lambda_i$  es la carga crítica (el autovalor) y  $\Phi_i$  la forma de modo (el autovector).

El material considerado es un acero A36 con un módulo de elasticidad de 209.85 GPa y un módulo de Poisson de 0.3. Como condición de sustentación del tanque se supone simplemente apoyado en la base.

En la discretización se utilizan dos tipos de elementos. En el casco cilíndrico del tanque con techo cónico se usa un elemento cuadrilátero parabólico S8R5 y en el techo un elemento triangular parabólico STRI65. El tamaño de los elementos es de un metro para el techo y la parte del casco no expuesta a la carga térmica y se realiza un análisis de convergencia para determinar el tamaño adecuado del elemento en la cara expuesta a la carga térmica. Se adopta como tolerancia para la convergencia un 2.5%. De acuerdo a este análisis se adopta una longitud de elemento de 0.6m para la zona expuesta al fuego.

Mediante un análisis de Bifurcación Lineal, LBA, se determina la Temperatura Crítica a través del primer autovalor y el modo crítico de deformación asociado, dado por el autovector correspondiente. La temperatura crítica obtenida para el tanque estudiado es de 140.28°C sólo con carga térmica y 167.46°C con carga térmica y carga hidrostática. En la Figura 5 se muestran los modos críticos de deformación para este caso.



Figura 5: Formas de modo crítico para el Tanque 1, (a) Carga térmica, (b) Carga térmica y carga hidrostática.

Los resultados hallados son comparables a lo obtenido por Liu (2011) quien determinó que la temperatura crítica de un tanque de dimensiones comparables es de 135.2°C y por Batista-Abreu (2011) que encontró una temperatura crítica de 128°C para un tanque de dimensiones similares pero no iguales.

En el tanque considerado se observa en sus modos de deformación crítica que la participación del fluido como carga hidrostática genera un aumento de la temperatura crítica y una localización de los lóbulos de deformación en la mitad superior del casco cilíndrico, característica que no se observa cuando el tanque está sometido solamente a carga térmica.

#### 4.2 Análisis No lineal Geométrico

En general, los modelos no lineales dan mejores resultados por aproximarse mejor al comportamiento real de las estructuras. El método de Riks (1972, 1979) de seguimiento de trayectorias no lineales da soluciones de equilibrio estático no lineales para problemas inestables, en el que la carga y/o desplazamiento pueden disminuir cuando la solución evoluciona. A medida que la carga aumenta proporcionalmente con un parámetro escalar, se va descubriendo la solución como una trayectoria de equilibrio simple en el espacio definido

por las variables nodales y el parámetro de carga.

Se describen las curvas temperatura-desplazamiento que surgen del análisis del tanque estudiado para los dos estados de carga, mostrando la trayectoria de cuatro puntos. El primero es donde se obtiene la máxima temperatura en el análisis de pandeo lineal (LBA) y los tres restantes están ubicados sobre el meridiano de temperatura máxima ( $\theta=0^\circ$ ) a tres alturas:  $1/4h$ ,  $1/2h$  y  $3/4h$ .

Para el tanque estudiado se determina por el análisis de pandeo lineal que los nudos  $N=773$  y  $N=2440$  son los que presentan mayor desplazamiento sin fluido interno y con fluido interno respectivamente. Luego los nudos sobre la zona de máxima temperatura son en  $h_1=1/4h=2.75\text{m}$   $N=1692$ ,  $h_2=1/2h=5.75\text{m}$   $N=2082$  y  $h_3=3/4h=8.50\text{m}$   $N=260$ . En la Figura 6 se muestran las curvas obtenidas y el modo de deformación antes de la inestabilidad para el tanque 1 con fluido interno, denominado como TK1-CF.

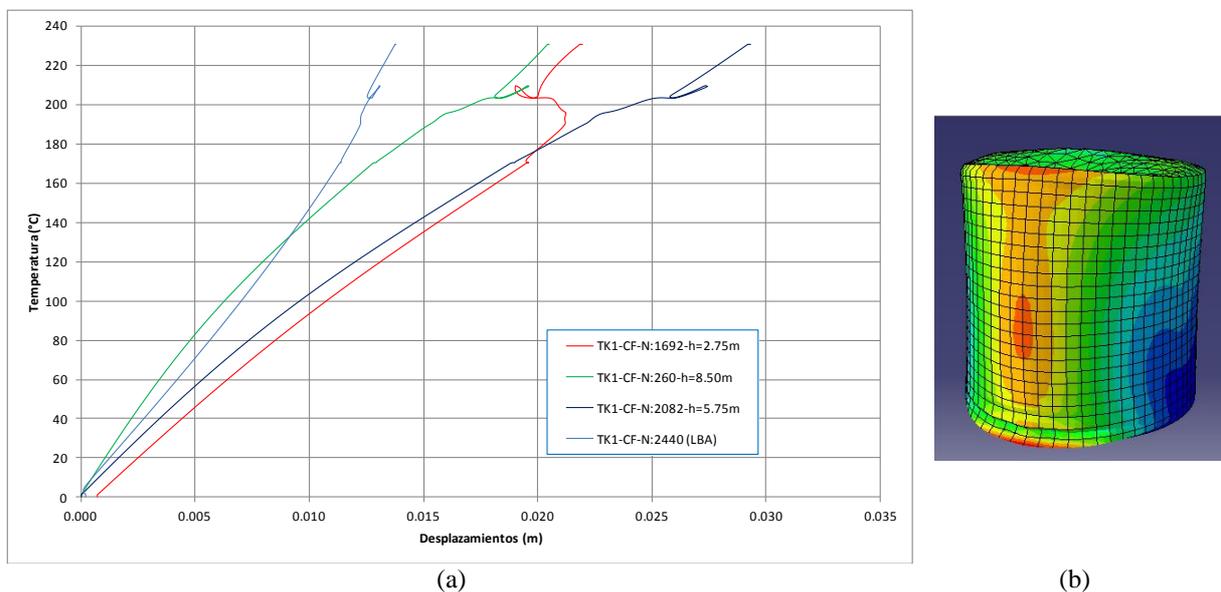


Figura 6: Tanque 1 con fluido interno, (a) Curvas de seguimiento de trayectoria. (b) Modo de deformación asociado a la  $T_{max}=209.52^\circ\text{C}$

La máxima temperatura alcanzada antes que la curva pase a una trayectoria secundaria es de  $209.52^\circ\text{C}$ . En la Figura 7 se muestran las curvas obtenidas y el modo de deformación previo a la inestabilidad para el tanque 1 sin fluido interno, denominado como TK1-SF.

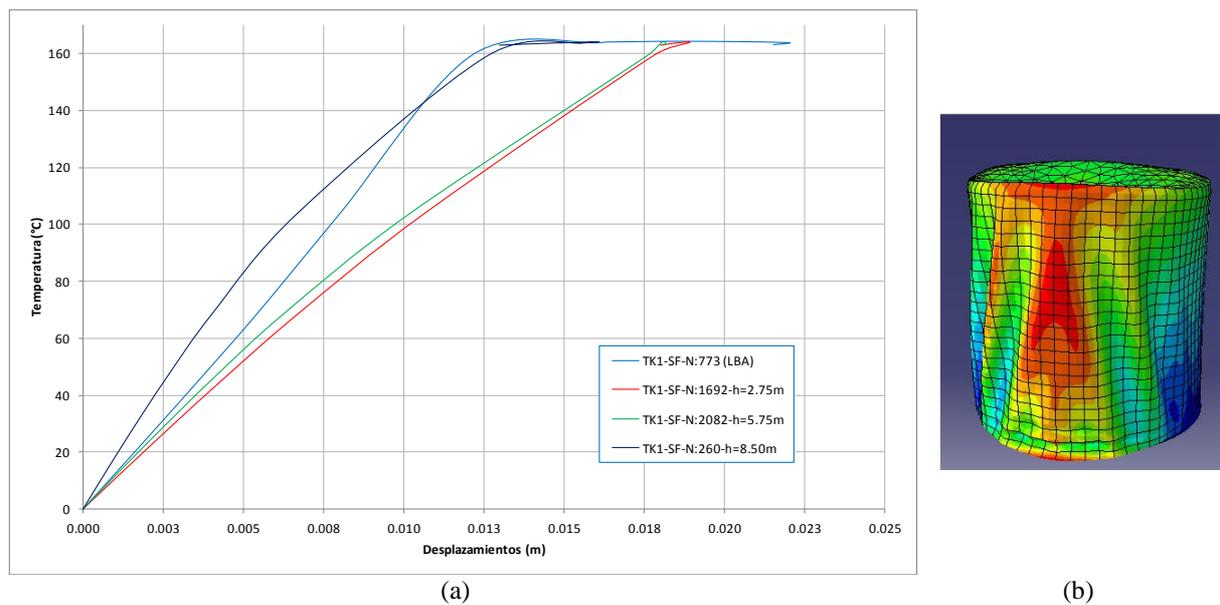


Figura 7: Tanque 1 sin fluido interno, (a) Curvas de seguimiento de trayectoria. (b) Modo de deformación asociado a la  $T_{max}=164.32^{\circ}\text{C}$

La temperatura máxima alcanza los  $164.32^{\circ}\text{C}$  y posteriormente comienza a descender.

Las curvas obtenidas para el tanque 1 con fluido interno son comparables a las de Batista-Abreu (2011), donde al dejar la trayectoria principal la curva sigue una trayectoria secundaria creciente. En el caso del mismo tanque sin fluido, lo que se encuentra es una meseta y luego un descenso.

### 4.3 Análisis Elástico No lineal Geométrico con Imperfecciones

El análisis no lineal geométrico con incorporación de imperfecciones (GNIA) permite determinar valores de temperaturas más precisas y reales debido a que las estructuras no son geoméricamente perfectas y se facilita el cambio de trayectoria fuera de la trayectoria fundamental. Se incorporó como imperfección en el modelo, el primer modo de deformación que se obtiene del análisis de pandeo lineal (LBA), con diferentes amplitudes de imperfección  $\xi$ . Se representa el desplazamiento horizontal en dirección del eje de mayor carga térmica, correspondiente al nodo que presenta mayor desplazamiento en el Modo 1 calculado mediante LBA, porque los que están sobre el meridiano dan una trayectoria casi lineal. Para investigar si el comportamiento corresponde a una bifurcación asimétrica o simétrica estable, se consideran también imperfecciones con la forma de Modo 1 pero en sentido contrario.

Las curvas de equilibrio obtenidas para el tanque 1 con fluido interior se muestran en la Figura 8. Las curvas muestran que, para las mayores amplitudes de imperfección (del orden de  $\xi=0.9t$  y  $\xi=0.5t$ ), las trayectorias de equilibrio con imperfección abandonan su linealidad y se separan de la trayectoria fundamental sin imperfección, pero a medida que la amplitud de imperfección disminuye ( $\xi=0.005t$ ) las curvas se acercan tendiendo a la trayectoria que se obtiene sin imperfección. Las curvas no muestran un máximo sino un cambio de trayectoria cerrado y curvo hacia la izquierda y luego siguen creciendo las temperaturas. Este cambio se presenta a los  $190^{\circ}\text{C}$  aproximadamente en las curvas de equilibrio con imperfección menor a  $\xi=0.09t$ . Por ejemplo para una amplitud de imperfección de  $\xi=0.05t$  la temperatura que se alcanza es de  $190.53^{\circ}\text{C}$ . Al considerar amplitudes de imperfección negativas ( $\xi=0.09t\text{-NEG}$  y  $\xi=0.005t\text{-NEG}$ ) el comportamiento de las curvas tiende a ser simétrico respecto a las imperfecciones positivas, dando un cambio de trayectoria hacia la derecha y creciente

obteniendo una trayectoria secundaria bien cerrada simétrica y estable.

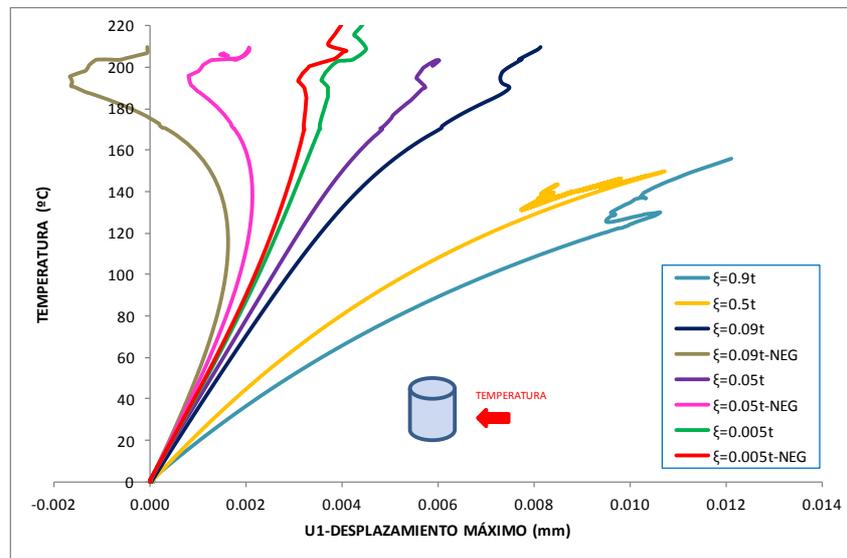


Figura 8: Curvas de seguimiento de trayectoria para el punto de mayor desplazamiento en LBA para TK1 con fluido interior con distintas amplitudes de imperfección.

La Figura 9 muestra los modos de deformación para una amplitud de imperfección de  $\xi=0.005t$ . En Figura 9(a) se muestra la deformada antes del cambio de trayectoria correspondiente a una temperatura de 184.46°C, mientras que Figura 9(b) corresponde a una temperatura de 198.55°C para un estado representativo posterior al cambio de trayectoria.



Figura 9: Deformadas del tanque 1 para  $\xi=0.005t$ , (a) Temperatura 184.46°C, (b) Temperatura 198.55°C.

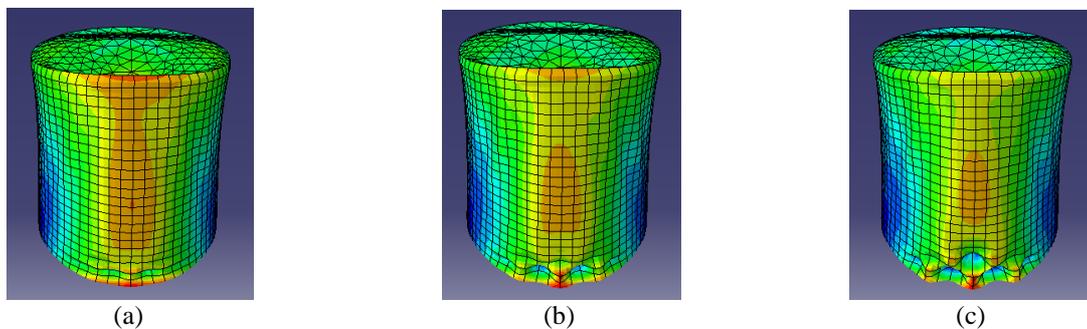


Figura 10: Deformadas para  $\xi=0.05t$ , (a) Temperatura 170.60°C, (b) Temperatura 190.53°C, (c) Temperatura 203.40°C.

Si la amplitud de imperfección es  $\xi=0.05t$ , los modos de deformación antes, durante y

después de la temperatura que genera la bifurcación ( $190.53^{\circ}\text{C}$ ) son como se muestran en la Figura 10. En la Figura 10(a) se muestra la deformada para  $170.60^{\circ}\text{C}$ , en la Figura 10(b) para  $190.53^{\circ}\text{C}$  y en la Figura 10(c) para  $203.40^{\circ}\text{C}$ .

La Figura 11 presenta las curvas obtenidas para el tanque 1 sin fluido interior. Para una amplitud de imperfección de  $\xi=0.5t$  la trayectoria no es lineal y se encuentra alejada de la trayectoria fundamental sin imperfección pero a partir de imperfecciones menores a  $\xi=0.1t$  las curvas se acercan entre ellas y comienzan a ser lineales. A unos  $100^{\circ}\text{C}$  las trayectorias con imperfecciones positivas comienzan a inclinarse hacia la derecha y las que tienen imperfecciones negativas ( $\xi=0.05t\text{-NEG}$  y  $\xi=0.005t\text{-NEG}$ ) hacia la izquierda, sin encontrar un máximo pero estableciendo una bifurcación simétrica estable. Esto se observa para amplitudes de imperfección entre  $\xi=0.1t$  y  $\xi=0.005t$ . Para imperfecciones menores a  $\xi=0.005t$  las curvas tienden a la trayectoria fundamental sin imperfecciones recuperando la linealidad. Desde  $160^{\circ}\text{C}$  se observa un nuevo cambio en las trayectorias donde tienden a hacerse horizontales.

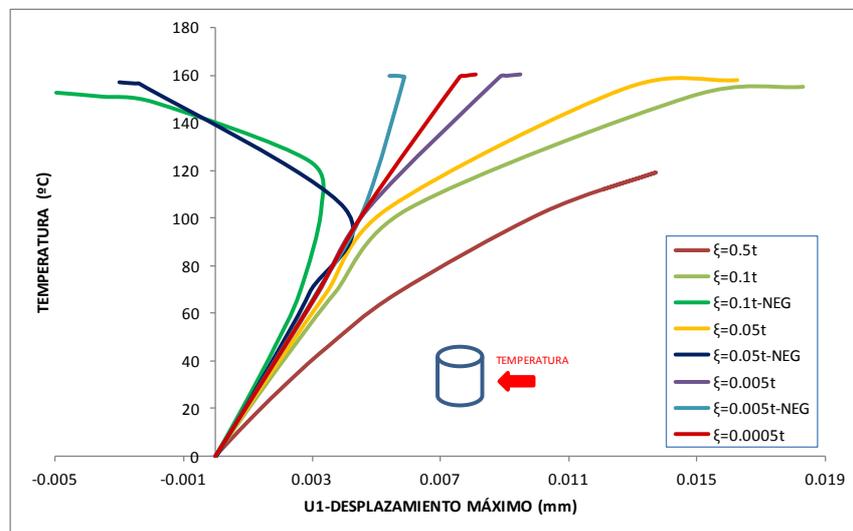
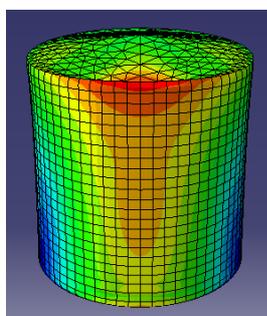
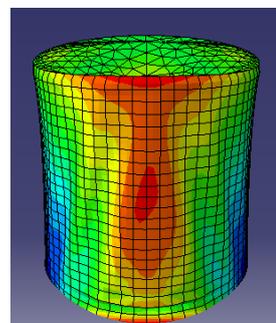


Figura 11: Curvas de seguimiento de trayectoria para el punto de mayor desplazamiento en LBA para TK1 sin fluido interior con distintos niveles de imperfección

La Figura 12 muestra los modos de deformación para una amplitud de imperfección de  $\xi=0.005t$ . En Figura 12(a) se muestra la deformada antes del cambio de trayectoria a  $68.80^{\circ}\text{C}$ , mientras que Figura 12(b) corresponde a una temperatura de  $159.31^{\circ}\text{C}$  para un estado representativo luego del cambio de trayectoria.



(a)



(b)

Figura 12: Deformadas para  $\xi=0.005t$ , (a) Temperatura  $68.80^{\circ}\text{C}$ , (b) Temperatura  $159.31^{\circ}\text{C}$ .

Cuando la amplitud de imperfección es  $\xi=0.05t$ , los modos de deformación antes, durante y

después de la temperatura que genera la bifurcación son como se muestran en la Figura 13. En la Figura 13(a) se muestra la deformada para 68.80°C, en la Figura 13(b) para 104.21°C y en la Figura 13(c) para 154.56°C.

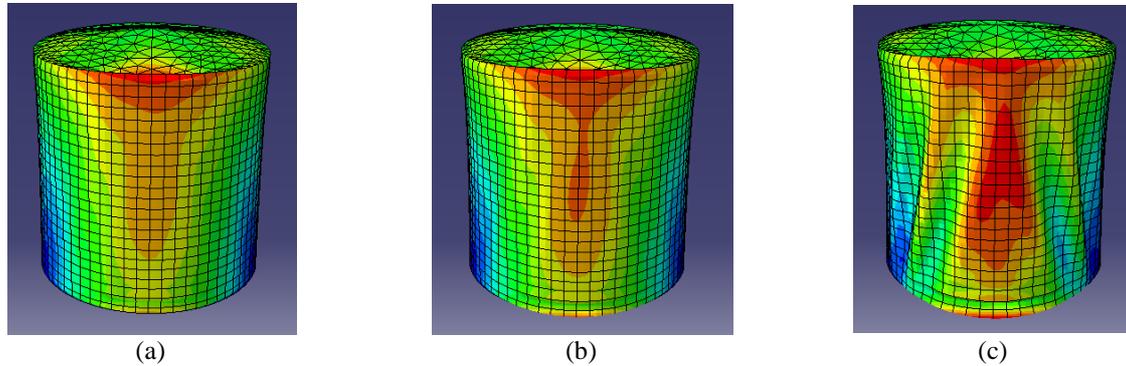


Figura 13: Deformadas para  $\xi=0.05t$ , (a) Temperatura  $T= 68.80^{\circ}\text{C}$ , (b) Temperatura  $T= 104.21^{\circ}\text{C}$ , (c) Temperatura  $154.56^{\circ}\text{C}$ .

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo una modelación de tanques bajo efectos térmicos que simulan un fuego externo al tanque, y se consideran las trayectorias de equilibrio y estados críticos elásticos para análisis de bifurcación, LBA, trayectoria no lineal geométrica, NLGA y trayectoria no lineal geométrica con imperfecciones, GNIA. Como resultado relevante, los análisis NLGA que solo incorporan no linealidad geométrica pero consideran la geometría perfecta de la cáscara conducen a trayectorias lineales de equilibrio hasta alcanzarse un estado crítico, pero en lugar de permitir avanzar hacia estados poscríticos, este tipo de análisis permanece caminando sobre la misma trayectoria fundamental sin salirse de ella. Para lograr seguir estados poscríticos se ha encontrado necesario incluir imperfecciones en la geometría de la cáscara GNIA, que inducen entrar en una trayectoria secundaria de equilibrio.

Cuando se comparan los resultados que se reportan en este trabajo (y también los obtenidos por Batista-Abreu y Godoy 2013), con los de Liu (2011), se aprecia que los resultados que se reportan en este trabajo son consistentes con un comportamiento bajo presiones laterales, mientras que los de Liu serían compatibles solamente con los que se esperan para cargas axiales en un cilindro. Sin embargo, el tipo de comportamiento bajo cargas térmicas en un cilindro impone condiciones de compresión circunferencial en la cáscara cilíndrica, que es similar a lo que ocurre en la misma cáscara bajo presión lateral. Por el contrario, para tener el tipo de respuesta que se reporta en Liu (2011) es necesario restringir axialmente los desplazamientos, de manera de generar una compresión en sentido axial. Tal cosa no ocurre en tanques reales, pero al parecer ha sido la condición de borde supuesta para obtener las curvas reportadas en Liu.

Como trabajo a realizar en un futuro, se van a estudiar los cuatro tanques que se identificaron como representativos en la Sección 2, a fin de comparar las respuestas de pandeo térmico en función de la geometría de la estructura.

## REFERENCIAS

- ABAQUS.Simulia. *Unified FEA*. Dassault Systemes. Warwick, Rhode Island. USA, 2006  
 API 650. *Welded steel tanks for oil storage*. American Petroleum Institute, 2010.  
 Batista-Abreu J., Godoy L. A., Investigación de causas de explosiones en una planta de

- almacenamiento de combustible en Puerto Rico, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 11(2):109-122, 2011.
- Batista-Abreu, J., Comportamiento de tanques de almacenamiento de petróleo en presencia de fuego. *Recinto Universitario de Mayagüez*, Universidad de Puerto Rico, 2011.
- Batista-Abreu, J., Godoy, L.A. Thermal buckling behavior of open cylindrical oil storage tanks under fire. *ASCE J. Performance of Constructed Facilities*, 27(1): 89–97, 2013.
- Buncefield Major Incident Investigation Board, The Buncefield Incident, 11 December 2005, Final report, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom, 2008.
- Godoy, L.A., Batista-Abreu, J. Buckling of fixed roof aboveground oil storage tanks under heat induced by an external fire. *Thin Walled Structures*, 52:90-101, 2012.
- Landucci, G., Gubinellia, G., Antonioni, G., Cozzani, V., The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Analysis and Prevention*, v. 41: p. 1206–1215, 2009.
- Liu, Y., Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire. *Institute for Infrastructure and Environment*, The University of Edinburgh, Scotland, 2011.
- Riks, E., An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, *International Journal of Solids and Structures*, 15:529-551, 1979.
- Riks, E., The application of Newton's method to the problem of elastic stability, *Journal of Applied Mechanics*, 39:1060-1065, 1972.
- Rotter, J. M., Schmidt, H. (Eds.), *Buckling of Steel Shells: European Design Recommendations*, ECCS Technical Committee 8 on Structural Stability, Eurocode 3, Part 1-6, 2008.