

Inestabilidad de tanques de almacenamiento de petróleo con techo cónico durante un incendio

Horacio D. Calabro¹, Luis A. Godoy² y Rossana C. Jaca³

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis del comportamiento estructural de tanques de almacenamiento de petróleo con techo bajo temperaturas procedentes de fuego adyacente a la estructura. En la simulación numérica se modela la cáscara con elementos finitos de doble curvatura utilizando el código de propósitos generales ABAQUS. Se determinan 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 (GNA) y análisis no lineal geométrico con imperfecciones (GNIA). Para el análisis se modelan dos geometrías de tanques de almacenamiento de petróleo con techo fijo en su parte superior (representativas de diferentes volúmenes de almacenamiento) expuestas a una distribución de temperatura externa y una carga hidrostática interna, a fin de evaluar la influencia de las diferentes relaciones de esbeltez altura-diámetro 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 70°C a 150°C, con modos de pandeo que afectan la cara directamente expuesta al fuego. La inestabilidad se produce en régimen elástico del material.

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

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Doctorando, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar

² Profesor Titular Plenario, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, e Investigador Superior, CONICET, Argentina. lgodoy@efn.uncor.edu

³ Profesora Titular, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina, rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar

1 Introducción

Un escenario 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. Durante la primera década del Siglo XXI ocurrieron casos emblemáticos de incendio de granjas de tanques en Guam, Océano Pacífico en 2002; Buncefield, Inglaterra en 2005; Texas City, Estados Unidos en 2005; y Bayamón, Puerto Rico en 2009. A continuación se hace una breve revisión de estos cuatro accidentes a fin de ilustrar los mecanismos en cada evento y su importancia.

Accidente de Guam, 2002: Este accidente tuvo dos etapas: la primera ocurrió en Julio de 2002 con el paso del tifón Chata'an que afectó la pequeña planta de almacenamiento de combustible de la isla de Guam (Estados Unidos) en el Océano Pacífico. Uno de los tanques con techo fijo externo y flotante interno sufrió pandeo por acción del viento, con deformaciones que bloquearon el techo flotante. Este tanque no fue reparado, de manera que el techo flotante podía trabarse con facilidad. En Diciembre de 2002 la isla se vio afectada por un segundo tifón llamado Pongsona; en esta ocasión, la arena que transportaba el viento produjo fricción contra las paredes del tanque, generándose electricidad estática que comenzó el proceso de ignición dentro del tanque. El fuego se propagó a otros tanques de la planta.

Accidente de Texas City, 2005: Texas City alberga varias granjas de tanques; en particular este accidente ocurrió en la Refinería de British Petroleum en Marzo de 2005, afectando unos 50 tanques, con muerte de 15 operarios y decenas de heridos. El origen del accidente fue el sobrellenado rápido de uno de los tanques, en el que no funcionaron adecuadamente el medidor de nivel de combustible en el interior y el sistema de alarma que produce corte del ingreso de fluido ante la eventualidad de llenado. La consecuencia fue el derrame de combustible al exterior, con formación de una nube de vapor que se propagó a nivel de la superficie de la planta. El mecanismo de ignición fue el encendido del motor de uno de los camiones que estaban en la planta.

Accidente de Buncefield, Inglaterra, 2005: Este es el accidente mejor estudiado y comprendido, debido a que en Gran Bretaña estos casos se tratan de manera abierta y sus resultados se publican como informes oficiales de agencias de gobierno (Buncefield 2008; Atkinson 2011; Batista-Abreu y Godoy 2009). La investigación de este caso concluyó que un sensor de nivel falló en un tanque que estaba siendo cargado y permitió que se superara la capacidad de hermeticidad del techo interno flotante. El combustible empujó el techo y fluyó por los bordes hasta llenar el tanque por encima del nivel del techo flotante. A continuación se desbordó el combustible del tanque lleno a través de los ventiladores en el techo del tanque. El combustible llegó hasta una estación de bombas cercana al tanque, donde hizo contacto con chispas provenientes de motores, generando la ignición.

Accidente de Bayamón, Puerto Rico, 2009: (Batista-Abreu y Godoy 2011) El evento ocurrido en Bayamón presenta similitud con el accidente de Buncefield: ambos ocurrieron a medianoche, el tiempo de extinción fue similar y se asemejan en la cantidad de tanques. Los investigadores pudieron determinar que la falla en los dispositivos del sistema de seguridad de un tanque que estaba siendo llenado desató una cadena de eventos que culminaron en la catástrofe. Ni los sensores de medición ni las alarmas de seguridad se activaron. Previo a los últimos momentos antes de la explosión, personal de la planta se percató de que el tanque que estaba siendo llenado había llegado a su capacidad máxima de contención y que habían comenzado a emanar gases combustibles. Finalmente el combustible derramado por el sobrellenado del tanque halló una fuente de ignición en el área de la planta de tratamiento. Varias posibles fuentes de ignición de origen eléctrico se convirtieron en objeto de investigación, entre ellas destaca una lámpara de luz fluorescente que pudo generar una chispa eléctrica, que resultaría suficiente para encender el vapor combustible.

Accidentes recientes en Sudamérica: En el contexto sudamericano, ejemplos recientes de fuego en tanques con graves consecuencias han ocurrido en Amuay, Venezuela, en 2012 y en Río de Janeiro, en 2013 en una pequeña planta de almacenamiento ubicada en zona urbana poblada. En Argentina se han registrado 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 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, Río 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. Recientemente (Marzo 2014) se produjo un incendio en un tanque de la planta de YPF de Malargüe, Mendoza, con explosión de un tanque y afectando a varios otros en la planta.

De manera que no se trata de eventos extraordinarios sino que ocurren incendios de manera frecuente y en países con diferentes características de desarrollo y de respeto por las reglamentaciones de seguridad. El factor común en los accidentes de Texas City, Buncefield y Bayamón fue la falla del sensor que corta el ingreso de combustible a un tanque, permitiendo un derrame al exterior del nivel de contención primario (que es el tanque mismo). La salida de combustible líquido fuera del nivel de contención secundario (que son diques de contención) depende de las características de cada caso, pero si se ha formado una nube de vapor en la vecindad del tanque, su salida no tiene obstáculos. Los mecanismos de ignición varían en cada accidente, pero en general se producen por el encendido de un motor, tanto de un vehículo como de un generador.

Desde el punto de vista estructural, 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.

En todos los casos de accidentes por fuego se generan fuertes conflictos entre las partes involucradas, incluyendo al propietario de la planta, las compañías de seguro, el gobierno local, agencias de protección ambiental, ciudadanos afectados de manera directa o indirecta por el accidente. En estos casos interesa identificar las causas del accidente, los mecanismos por los cuales el fuego llegó a los tanques, para lo cual es necesario correlacionar las deformaciones que se observan en los tanques al final del accidente con la secuencia de eventos que condujo a la situación final que se observa una vez concluido el incendio. En el accidente de Buncefield existían tres compañías diferentes que almacenaban combustibles en la misma granja de tanques, de manera que resultó imprescindible identificar responsabilidades y reconstruir la secuencia de propagación de fuego que en definitiva produjo la destrucción de veinte tanques.

En este trabajo se considera el análisis no lineal geométrico de tanques de almacenamiento de petróleo con techo cónico, bajo efectos térmicos causados por fuego. No se modela la fuente de fuego, que pertenece al campo de la ingeniería de fuego y ya ha sido considerado por otros investigadores (Liu 2011), sino que el fuego se tiene en cuenta a través del cambio de temperatura que se produce en diferentes zonas de los tanques, ya sea para un tanque aislado o para un grupo de tanques.

Se presentan resultados numéricos para 12 estudios, que son dos geometrías con dos estados de carga cada una, y tres tipos de análisis en cada caso.

2 Configuraciones de tanques estudiados

Varios autores han caracterizado geometrías típicas de tanques en la industria del petróleo. Noret et al. (2012) consideraron cuatro tanques que serían representativos de los que se usan en Francia a los efectos de estudiar explosiones. En un estudio de viento, Zhao et al. (2014) investigaron seis geometrías para representar tanques en China. Sin embargo, esas geometrías no reflejan configuraciones frecuentes sino extremas, incluyéndose las mayores dimensiones que se han construido en cada país, con diámetros de 100 metros. Tales dimensiones no se encuentran con frecuencia en el contexto americano. Una revisión de daños causados por huracanes de 2005 en el Golfo de México (Godoy 2007) ilustra geometrías de uso frecuente en Estados Unidos.

Las configuraciones que se investigan en este trabajo surgen de una recopilación de tanques existentes en plantas de tanques de almacenamiento de petróleo en Estados Unidos, Puerto Rico, Argentina y Venezuela, en las que se ha identificado la relación de aspecto entre el radio R y la altura H del cilindro del tanque. De los casos identificados se seleccionaron dos configuraciones con diámetros diferentes y que al mismo tiempo son representativas de configuraciones que se emplean en la práctica.

Para mostrar la gama de geometrías que se está cubriendo en este trabajo, se ha dibujado en la Figura 1 un esquema de las mismas, indicando la relación R/H y R/t para cada tipo de geometría. El menor de los tanques, identificado como Tanque 1, tiene un diámetro de 11.44m y altura de la parte cilíndrica de 11.43m, lo que hace una relación $R/H = 0.5$. El mayor de los tanques, Tanque 2, tiene un diámetro de 25.92m y altura de 12.96m, de modo que tiene relaciones de aspecto $R/H = 1$.

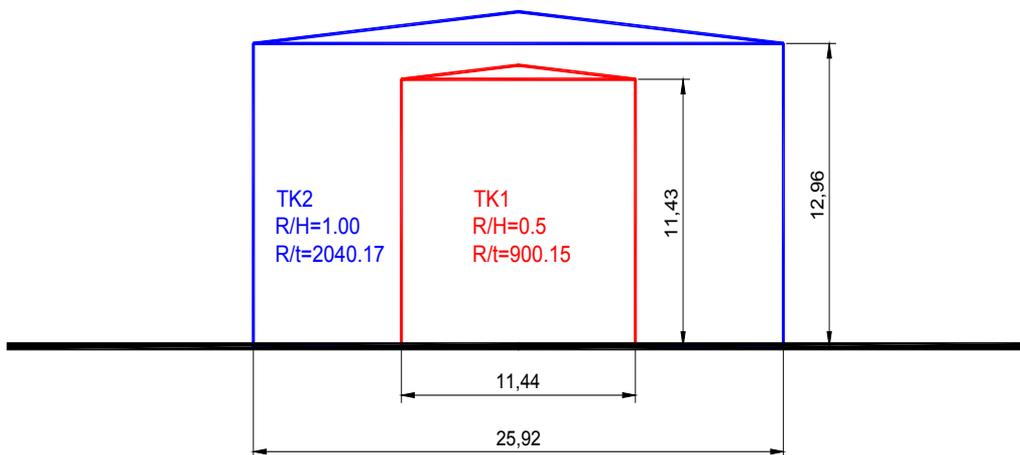


Figura 1: Geometrías de estudio

Para su estudio, los tanques se han dimensionado mediante la norma API 650 (2010), teniendo en cuenta un acero tipo A36, un sobre-espesor por corrosión de 2mm y una altura de virola de 1.5m. Como fluido interior se ha considerado un hidrocarburo con gravedad específica de 0.85 (adimensional). De acuerdo a esta norma API, 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_h) 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. La Tabla 1 detalla los espesores obtenidos para cada tanque en cada virola, V_1 es la virola que se encuentra a mayor altura. El Tanque 1 tiene relación $R/t = 900$, mientras que el Tanque 2 tiene 2040. El espesor del techo se ha supuesto en ambos casos como uniforme e igual a tres veces el espesor del cilindro en la parte inferior, dado que solo interesa ver las diferencias relativas entre ambos casos. Se intenta así enfatizar el comportamiento de la parte cilíndrica del tanque, cuyo pandeo produce los efectos más problemáticos. Para casos en los que se conoce la estructura de soporte del techo se puede llevar a cabo una equivalencia detallada para adoptar un espesor uniforme equivalente, como se reporta en Batista-Abreu et al. (2014)

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

Tabla 1: Tanques estudiados, espesores del cilindro para cada virola y del techo.

3 Efectos térmicos causados por el fuego

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.

Al presente, el estudio más completo de efectos debidos a fuego sobre tanques ha sido la tesis de Liu (2011) en Edimburgo, quien llevó a cabo una exploración para fuego equivalente a la de tanques bajo viento, y constituye el mejor punto de partida 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 cuantificar la distribución de temperatura sobre la pared del tanque.

Se supone que existe una “zona caliente” en la región del tanque a la que llega el efecto debido al fuego de manera directa, y una “zona fría” en el resto del tanque, en la que se mantiene la temperatura ambiente. Si identificamos el meridiano ubicado a menor distancia de la fuente con la coordenada circunferencial $\theta = 0^\circ$, la zona caliente está dada por $-\pi/2 < \theta < \pi/2$, mientras que la zona fría ocupa la mitad posterior de la cáscara. Estudios paramétricos de la incidencia de la amplitud de la zona caliente fueron reportados por Godoy y Batista-Abreu (2013).

En base a la propuesta de Liu (2011), la carga térmica se supone en este trabajo con una variación del tipo $\cos^2\theta$ en coordenadas cilíndricas en sentido de la circunferencia, adoptando un ángulo θ . El modelo tiene una variación térmica en sentido circunferencial pero se supone que la temperatura se mantiene constante verticalmente. La expresión analítica de la temperatura está dada por:

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

donde T_e es la temperatura de la cara externa del tanque y T_a es la temperatura del ambiente.

Para la modelación computacional de los tanques se considera un gradiente nulo de temperatura en el espesor del cuerpo cilíndrico del tanque. Esto es un cambio con

respecto a estudios anteriores (Godoy y Batista Abreu 2012) en los que se suponía un gradiente no nulo; sin embargo, tal gradiente no parece significativo en efectos térmicos asociados a incendios debido a que el espesor de pared del tanque es muy delgado y la temperatura se transfiere a través del espesor de manera muy rápida, con lo que se obtiene un gradiente muy bajo (Liu 2011). En la Figura 2 se muestra la variación radial de la carga térmica, que es máxima con un valor unitario en $\theta=0^\circ$ y vale cero entre $\theta=\pi/2$ y $3\pi/2$.

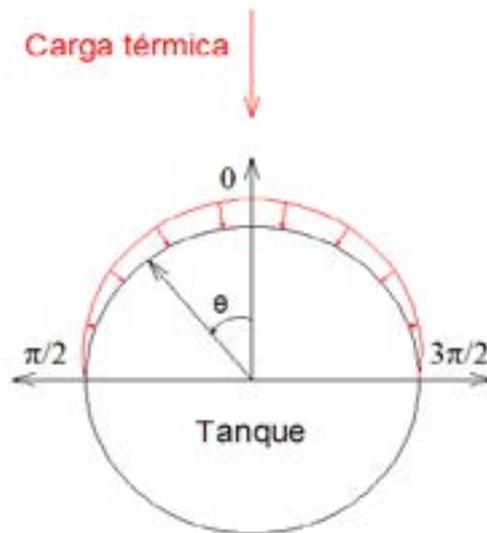


Figura 2: Distribución de la carga térmica

La carga hidrostática considerada es la generada por el almacenamiento de hidrocarburo hasta la mitad de la altura de cada tanque. La ley de variación de la presión es lineal desde la base hasta la altura máxima del fluido:

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

donde $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ es la densidad del fluido almacenado, $g = 9.8\text{m/seg}^2$ la aceleración de la gravedad y h la altura a la que se desea determinar la carga. La carga hidrostática generada por el almacenamiento del fluido es de 56.02 KPa para el Tanque 1 y de 63.48 KPa para el Tanque 2.

Para cada tanque se analiza una condición de tanque vacío, en la que solamente actúa la carga térmica. Además se estudia la posibilidad que simultáneamente actúe una carga térmica y la acción hidrostática del fluido almacenado. Como caso ilustrativo se considera fluido hasta la mitad de la altura del tanque, pero el comportamiento que se obtiene para ese nivel de líquido es representativo del que ocurre para otros niveles.

4 Análisis de bifurcación lineal

Se dice que una estructura llega al estado de pandeo cuando debe cambiar de forma para poder seguir soportando incrementos de carga (Godoy 2000). 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 tanques de almacenamiento de hidrocarburo seleccionados, calculados mediante LBA.

Como antecedentes en esta área, un grupo de ingenieros químicos en Italia (Lan-ducci 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. Sin embargo, sus estudios no estuvieron orientados a evaluar la estabilidad de la estructura sino que solo abordaron la determinación de tensiones en la cáscara.

Contribuciones previas en las que se ha realizado el análisis estructural de un solo tanque fueron presentadas por Liu (2011) para tanques con techo fijo cónico, al igual que Godoy y Batista-Abreu (2013). El único antecedente de tanques totalmente abiertos es Batista-Abreu y Godoy (2013). En ningún caso se ha intentado visualizar de qué manera inciden las características del tanque en la respuesta de la estructura, dado que se concentraron en estudios de un solo caso.

La modelación se realiza en este trabajo usando una discretización de elementos finitos mediante el programa computacional de propósitos generales ABAQUS (2006). De las diversas opciones que tiene el programa, se han realizado inicialmente análisis de pandeo por bifurcación, identificado en la literatura como LBA (Rotter y Schmidt 2008), para determinar la carga térmica crítica, su modo asociado y la zona del tanque que presenta los mayores desplazamientos mediante la solución de un problema clásico de autovalores. En la discretización se usó un elemento cuadrilátero parabólico S8R5 en el casco cilíndrico y un elemento triangular parabólico STRI65 para el techo cónico.

La solución se obtiene resolviendo un problema clásico de autovalores y autovectores, expresado por la ecuación:

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

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, λ_i es la carga crítica (el autovalor) y Φ_i la forma de modo (el autovector).

Las geometrías seleccionadas se estudiaron considerando un acero A36 con módulo de elasticidad $E = 210\text{GPa}$ y módulo de Poisson $\nu = 0.3$. Las condiciones de sustentación de los tanques se supusieron como simplemente apoyadas.

Se realizó un análisis de convergencia para determinar el tamaño adecuado del elemento en la cara expuesta a la carga térmica, adoptándose como tolerancia para la convergencia un 2.5%.

Mediante un análisis de Bifurcación Lineal LBA se determinó la Temperatura Crítica a través del primer autovalor y el modo crítico de deformación a través del autovector asociado. La temperatura crítica para el Tanque 1 fue de 140.3°C sólo con carga térmica y 167.5 °C con carga térmica y carga hidrostática. En la Figura 3 se muestran los modos críticos de deformación para este caso.

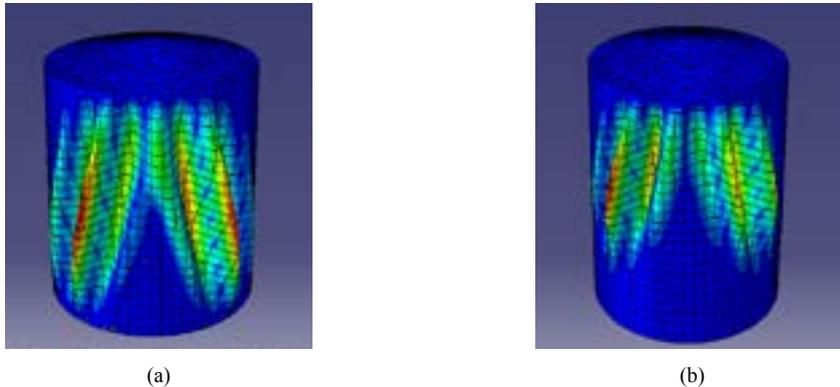


Figura 3: Tanque 1, LBA. Formas de modo crítico bajo (a) Carga térmica, $T_{crítica}=140.3$ °C (b) Carga térmica e hidrostática, $T_{crítica}=167.5$ °C

Como valores de referencia, los resultados que se encuentran son comparables a los obtenidos por Liu (2011), quien determinó una temperatura crítica de 135.2 °C para un tanque de dimensiones comparables y por Batista-Abreu (2011) quien encontró una temperatura crítica de 128 °C para un tanque de dimensiones similares aunque no iguales. Es notable que la temperatura crítica para la que se produce la inestabilidad elástica de la cáscara sea tan baja. Se nota que el fluido hasta la mitad de la altura produce un efecto de estabilización, aumentando la temperatura crítica de pandeo en un 20%. Hay dos efectos que produce el fluido: uno térmico (la zona de contacto con el fluido no eleva la temperatura) y uno mecánico (el fluido estabiliza las deformaciones de la cáscara).

En el Tanque 2 se encuentran temperaturas de pandeo elástico aún más bajas, con temperatura crítica de 67.7 °C sólo con carga térmica y de 70.8 °C con carga térmica e hidrostática. El efecto del fluido en este caso se limita al 5%. Los modos de deformación crítica se muestran en la Figura 4: tienen la particularidad de que el bulbo de deformación se presenta en forma asimétrica, como también reportaron Godoy y Batista-Abreu (2012).

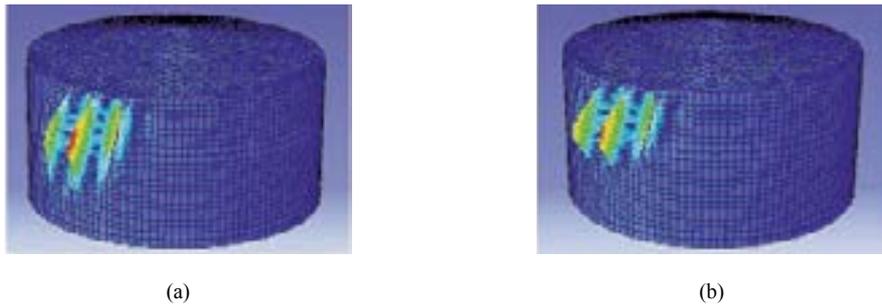


Figura 4: Tanque 2, LBA. Formas de modo crítico bajo (a) Carga térmica, $T_{crítica} = 67.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) Carga térmica e hidrostática, $T_{crítica} = 70.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

En los dos tanques 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 de los cascos cilíndricos, característica que no se observa cuando los tanques están sometidos solamente a efectos térmicos.

Entre los tanques con techo se encuentran diferencias significativas, siendo la temperatura crítica del Tanque 2 el 52% de la del Tanque 1.

5 Análisis no lineal geométrico (GNA)

En general los modelos no lineales GNA dan mejores resultados que los LBA por representar una trayectoria no lineal de equilibrio. A medida que la carga aumenta proporcionalmente con el parámetro escalar λ , se va descubriendo la solución como una trayectoria de equilibrio en el espacio definido por las variables de desplazamiento nodal y el parámetro de carga (en este caso la temperatura).

Para el punto de mayor desplazamiento y para tres puntos en el meridiano de máxima carga térmica, dado en $\theta=0^{\circ}$, se evalúa la trayectoria no lineal geométrica GNA por el método de Riks (1972, 1979) de seguimiento de trayectorias no lineales. Este método permite evaluar soluciones de equilibrio estático inestables, en el que la carga y/o desplazamiento pueden disminuir cuando la solución evoluciona. Se determina así la trayectoria post-crítica de equilibrio en un diagrama de temperatura-desplazamiento, lo que permite encontrar un máximo en temperatura alcanzada, que es la carga límite.

Se han computado las curvas temperatura-desplazamiento que surgen del análisis de los dos tanques estudiados para los dos estados de carga, mostrando la trayectoria en cuatro puntos para cada análisis. El primero de los puntos es donde se encontró la máxima temperatura en el análisis linealizado de bifurcación (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.

Por el análisis de pandeo lineal, en el Tanque 1 se determinó que los nudos N=773 y N=2440 son los que presentaron mayor desplazamiento en vacío y con fluido respectivamente. Luego los nudos sobre la zona de máxima temperatura son en $h_1=1/4h=2.75m$ N=1692; $h_2=1/2h=5.75m$ N=2082; y $h_3=3/4h=8.50m$ N=260.

Para el Tanque 1 vacío, en la Figura 5 se muestran las curvas obtenidas y el modo de deformación antes de la inestabilidad. La temperatura máxima llegó a los 164 °C, en el momento previo a comenzar a descender por la trayectoria. En el caso del tanque vacío, lo que se encuentra es una meseta y luego un descenso.

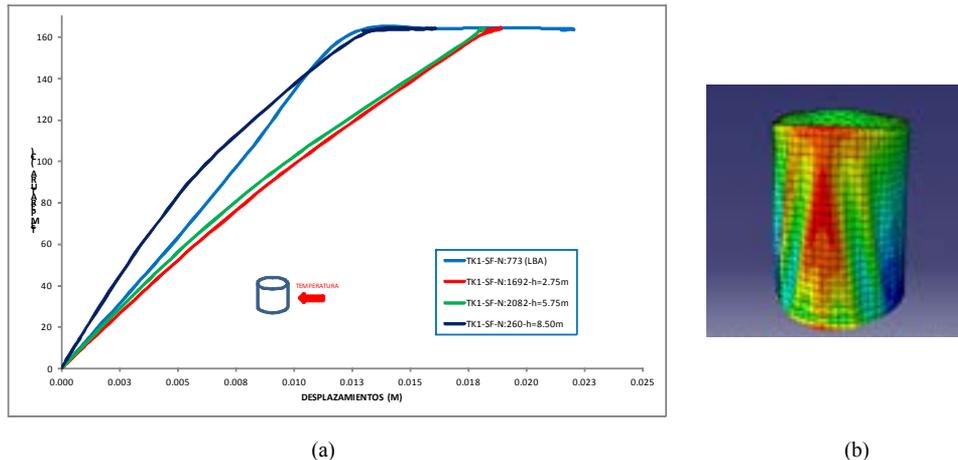
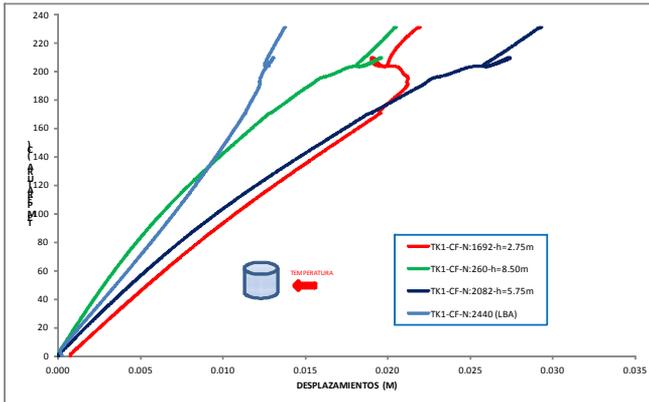
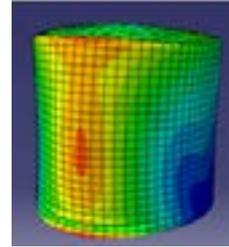


Figura 5: Tanque 1 vacío, GNA. (a) Trayectorias de equilibrio. (b) Modo de deformación asociado a $T_{max}=164.3$ °C

Para el Tanque 1 con fluido, se muestran las trayectorias obtenidas y el modo de deformación antes de la inestabilidad en la Figura 6. Para carga combinada, la máxima temperatura alcanzada antes que la curva pase a una trayectoria inestable es de 209 °C. Las curvas obtenidas para en Tanque 1 con fluido son comparables a las de Batista-Abreu (2011), donde al dejar la trayectoria principal la curva sigue una trayectoria secundaria creciente. Nótese que la diferencia entre las Figuras 5 y 6 no radica solamente en el estado identificado como crítico, sino en la forma de la trayectoria de equilibrio.



(a)

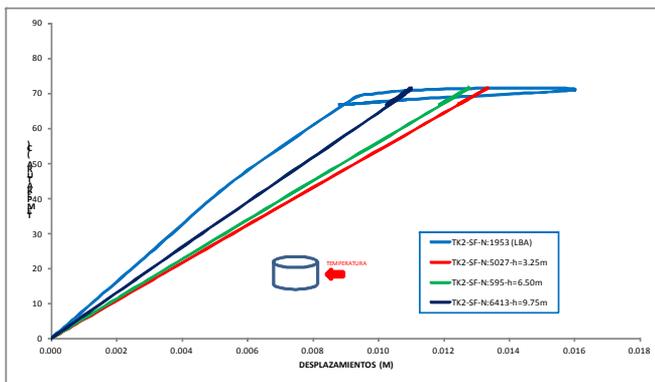


(b)

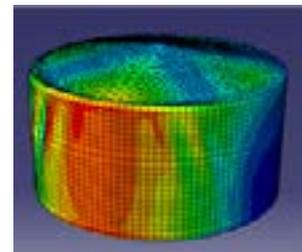
Figura 6: Tanque 1 con fluido, GNA. (a) Trayectorias de equilibrio. (b) Modo de deformación asociado a $T_{\max}=209.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Para el Tanque 2, el análisis de bifurcación lineal determina que los nodos $N=6347$ y $N=1953$ son los que presentan los mayores desplazamientos para la condición de tanque vacío y con fluido respectivamente. Los nudos sobre la zona de mayor carga térmica son $N=5027$ para $h_1=1/4$; $h=3.25\text{m}$; $N=595$ para $h_2=1/2h=6.50\text{m}$; y $N=6413$ para $h_3=3/4h=9.75\text{m}$.

En el Tanque 2 vacío, las trayectorias calculadas según GNA se muestran en la Figura 7. En este caso la temperatura máxima alcanzada fue de $71.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.



(a)



(b)

Figura 7: Tanque 2 vacío, GNA. (a) Trayectorias de equilibrio. (b) Modo de deformación asociado a la $T_{\max}=71.6\text{ }^{\circ}\text{C}$

En el Tanque 2 con fluido, las curvas de equilibrio para los puntos seleccionados y el modo de deformación para la máxima temperatura alcanzada se muestran en la Figura 8: las curvas aumentan en forma casi lineal hasta la máxima temperatura de 77.1 °C y disminuyen repentinamente cambiando su trayectoria.

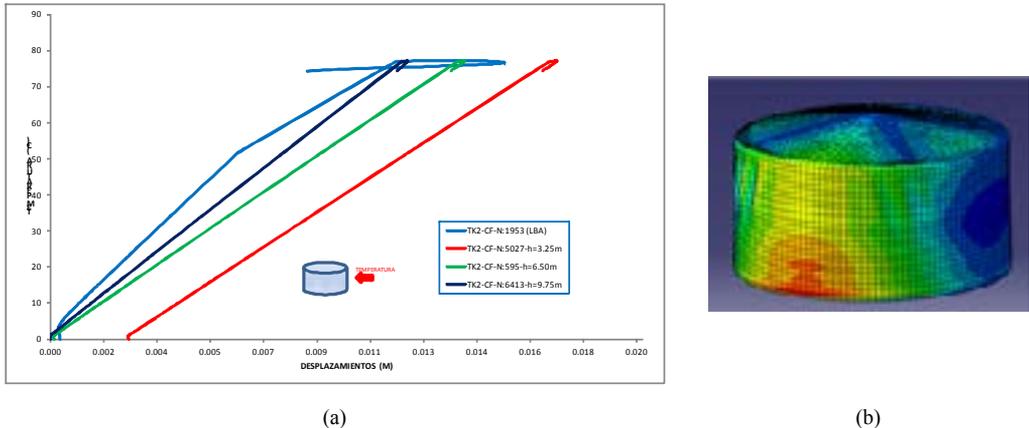


Figura 8: Tanque 2 con fluido, GNA. (a) Trayectorias de equilibrio. (b) Modo de deformación asociado a la $T_{\max}=77.1$ °C

Se observa en las curvas que, para las dos combinaciones de carga, el punto de seguimiento que tiene mayor desplazamiento sobre el meridiano ($\theta = 0^\circ$) es el más bajo y el de menor desplazamiento es el más alto.

El análisis no lineal geométrico sobre una geometría perfecta, GNA, no contribuye a esclarecer el comportamiento de estos tanques, dado que no logra avanzar hacia estados de equilibrio que existan sobre una trayectoria post-crítica y la condición de equilibrio se mantiene siempre en la trayectoria fundamental.

6 Análisis elástico no lineal geométrico con imperfecciones

Finalmente se llevó a cabo un análisis no lineal geométrico con imperfecciones (identificado como GNIA) siguiendo la trayectoria de un punto relevante para determinar las curvas post-críticas temperatura-desplazamiento. El análisis GNIA permite determinar valores de temperaturas más precisas y reales debido a que las estructuras no son geoméricamente perfectas y se induce la posibilidad de un cambio de trayectoria fuera de la trayectoria fundamental. Se incorpora como imperfección en el modelo, el primer modo de deformación que se obtiene del análisis LBA, con diferentes amplitudes de imperfección ξ . Este tipo de imperfección se conoce como “imperfección afín al autovector” y es la que produce un mayor efecto sobre la carga máxima, por lo menos en la vecindad de un estado crítico.

Se representa el desplazamiento horizontal en dirección del eje de mayor carga térmica, correspondiente al nodo que presenta mayor desplazamiento en el primer autovector calculado mediante LBA, porque los que están sobre el meridiano de mayor temperatura dan una trayectoria casi lineal. Para investigar si el comportamiento corresponde a una bifurcación asimétrica o simétrica estable, se consideraron también imperfecciones con la forma de Modo 1 pero modificando la geometría en sentido contrario. El análisis se realizó sobre las dos geometrías seleccionadas y para las dos combinaciones de carga.

A diferencia de los análisis en los que las variables de carga son fuerzas, como presión uniforme o viento, en problemas térmicos bastan pequeñas amplitudes de desviación geométrica (mucho menores que el espesor) para producir cambios de trayectorias y reducciones en la carga máxima.

Para el Tanque 1 vacío, se grafican en la Figura 9 las curvas obtenidas. Para una amplitud de imperfección de $\xi=0.5t$ (que es la mayor amplitud con la que se trabajó) la trayectoria no es lineal y se encuentra alejada de la trayectoria fundamental sin imperfección sin que la trayectoria tenga un máximo, pero a partir de imperfecciones menores a $\xi=0.1t$ las curvas se acercan entre ellas y comienzan a ser lineales. A unos 100 °C las trayectorias con imperfecciones positivas comienzan a inclinarse hacia la derecha del gráfico y las que tienen imperfecciones negativas ($\xi=-0.05t$ y $\xi=-0.005t$) 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 °C se observa un cambio en las trayectorias, que tienden a hacerse horizontales.

En resumen, las amplitudes positivas tienden a incrementar los desplazamientos en la dirección del modo, mientras que las negativas deforman la cáscara en sentido contrario. Independientemente del valor de amplitud ξ de imperfección, el cambio de trayectoria se produce para el mismo nivel de temperatura, alrededor de 160 °C. Este tipo de comportamiento es característico de una bifurcación simétrica estable.

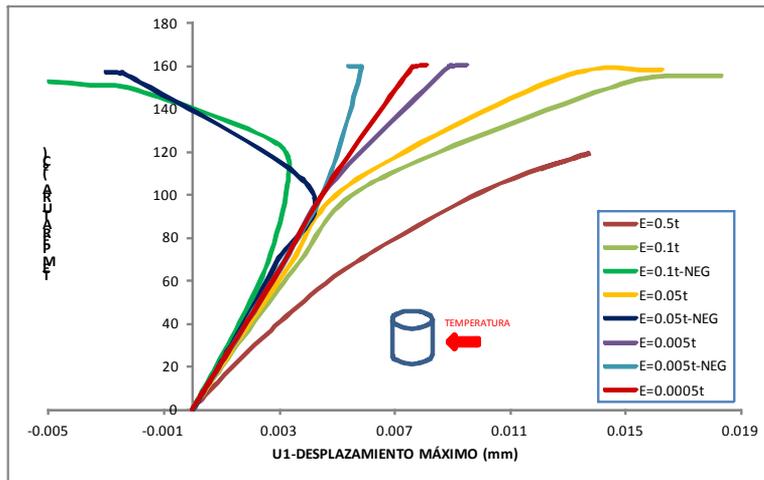


Figura 9: Tanque 1 vacío, GNIA. Trayectorias para distintos niveles de imperfección, para el punto de mayor desplazamiento en LBA.

La Figura 10 muestra los modos de deformación para una amplitud de imperfección de $\xi=0.005t$. En Figura 10 (a) se muestra la deformada para tanque vacío antes del cambio de trayectoria a $68.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que Figura 10 (b) corresponde a una temperatura de $159.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ para un estado representativo luego del cambio de trayectoria.

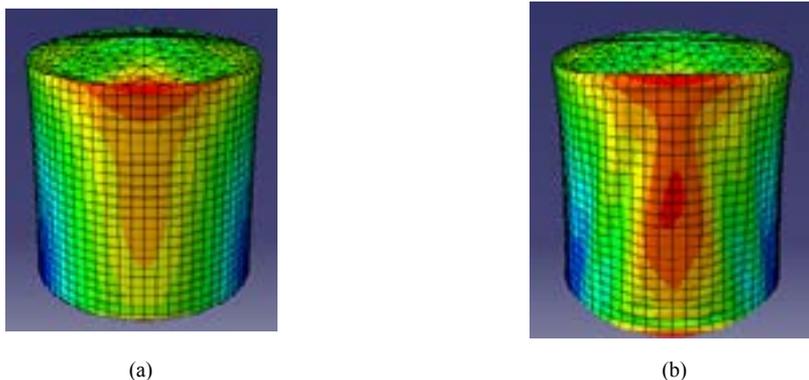


Figura 10: Tanque 1 vacío, GNIA. Deformadas para $\xi=0.005t$, para temperaturas (a) $T = 68.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $T = 159.3\text{ }^{\circ}\text{C}$

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 11. En la Figura 11 (a) se muestra la deformada para $68.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, en la Figura 11 (b) para $104.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en la Figura 11 (c) para $154.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las deformadas muestran un cambio en la geometría asociado al fenómeno de pandeo.

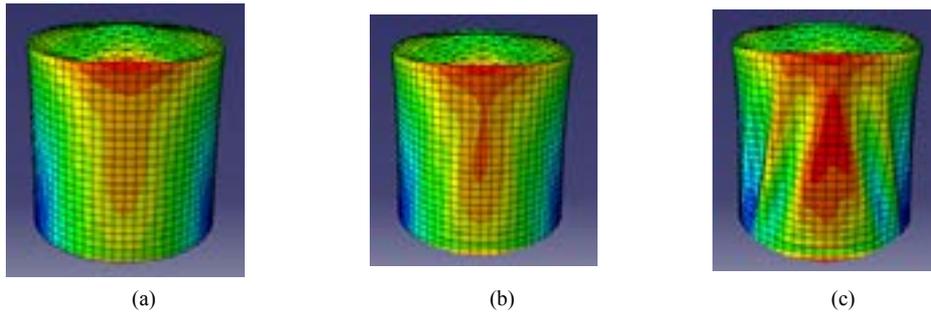


Figura 11: Tanque 1 vacío, GNIA. Deformadas para $\xi=0.05t$, para temperaturas (a) $T= 68.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $T= 104.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $T= 154.6\text{ }^{\circ}\text{C}$

Para el Tanque 1 con fluido, las curvas de trayectorias de equilibrio se grafican en la Figura 12. Las curvas muestran que, para los valores mayores de amplitud de imperfección (entre $\xi=0.9t$ y $\xi=0.5t$), las trayectorias de equilibrio con imperfección dejan de ser lineales 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 del gráfico y luego siguen creciendo las temperaturas. Este cambio se presenta a los $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente en las curvas de equilibrio con $\xi < 0.09t$. Por ejemplo para una amplitud de imperfección de $\xi=0.05t$ la temperatura que se alcanza es de $190.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al considerar amplitudes de imperfección negativas ($\xi=-0.09t$ y $\xi=-0.005t$) 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.

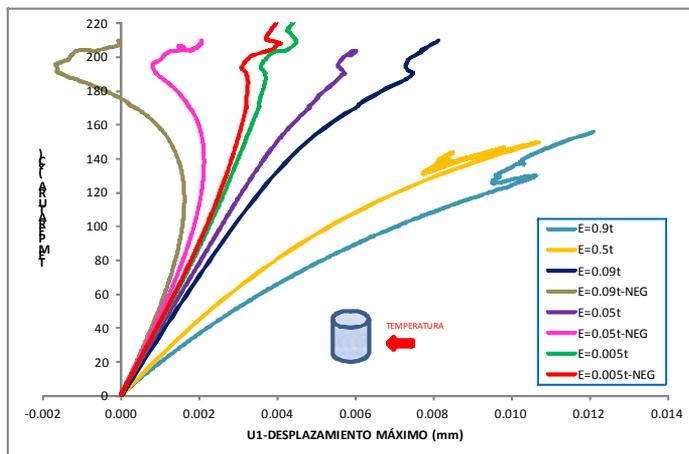


Figura 12: Tanque 1 con fluido. Trayectorias GNIA con distintas amplitudes de imperfección, para el punto de mayor desplazamiento en LBA

Para el Tanque 2 vacío, las trayectorias con imperfección se muestran en la Figura 13 y resultan de forma más clásica que en el Tanque 1. Las curvas con imperfecciones pequeñas ($\xi=0.01t$) presentan un comportamiento lineal muy cercano a la trayectoria fundamental sin imperfecciones. En este caso la temperatura máxima es de 72 °C aproximadamente, luego las curvas muestran un comportamiento descendente, para las amplitudes de imperfección positivas y negativas ($\xi=-0.05t$ y $\xi=-0.01t$) generando una bifurcación con trayectoria post-crítica levemente descendente. Este comportamiento puede identificarse con una bifurcación simétrica inestable con poca sensibilidad ante imperfecciones.

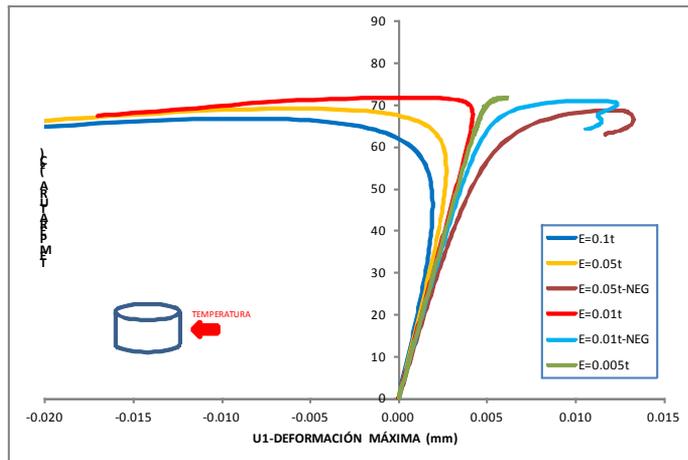


Figura 13: Tanque 2 vacío, GNIA. Trayectorias con distintos niveles de imperfección para el punto de mayor desplazamiento en LBA

Para el caso del Tanque 2 con fluido, las curvas de seguimiento de trayectoria, que se observan en la Figura 14 muestran que para imperfecciones $\xi > 0.1t$, las trayectorias con imperfecciones se despegan de la curva sin imperfecciones, dejando de ser lineales. Pero para amplitudes de imperfección $\xi < 0.1t$, por ejemplo para $\xi = 0.05t$ y $\xi = 0.01t$, las trayectorias con imperfecciones se acercan a la curva fundamental perfecta, como es de esperar. A una temperatura de 77 °C se da un cambio brusco en las trayectorias con imperfección, desviándose a la izquierda las curvas con imperfecciones positivas y a la derecha las curvas con imperfecciones negativas ($\xi = -0.05t$ y $\xi = -0.01t$). En este caso se puede establecer un máximo a los 77 °C aproximadamente y luego decrecen generando una bifurcación simétrica inestable con trayectoria levemente descendente. Para niveles de imperfección menores a $\xi = 0.05t$ las trayectorias con imperfección se asemejan a la fundamental perfecta.

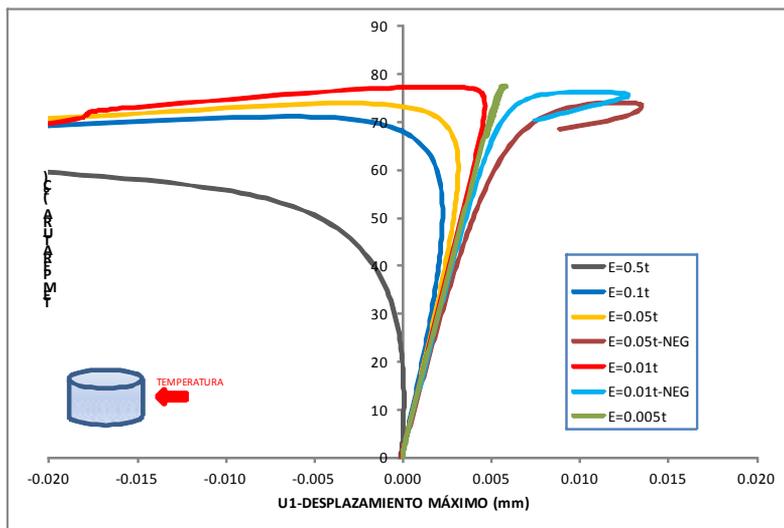


Figura 14: Tanque 2 con fluido, GNIA. Trayectoria con distintos niveles de imperfección para el punto de mayor desplazamiento en LBA

Cuando se comparan los resultados que se reportan en este trabajo con los de Liu (2011), se aprecia que los de Liu tienen una brusca caída post-crítica, con considerable sensibilidad frente a imperfecciones. Estas trayectorias son compatibles solamente con lo que se espera 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 parece ocurrir en tanques reales, como los analizados en este trabajo, en los que las trayectorias post-críticas son estables o levemente inestables.

7 Conclusiones

En este trabajo se presenta la modelación de tanques bajo efectos térmicos que simulan un fuego externo al tanque, y se consideraron las trayectorias de equilibrio y estados críticos elásticos para análisis de bifurcación LBA, trayectoria no-lineal geométrica GNA, y trayectoria no lineal geométrica con imperfecciones GNIA. Las principales conclusiones pueden resumirse de la siguiente manera:

- Con respecto a la modelación, los análisis GNA 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 post-críticos, este tipo de análisis permanece caminando sobre la misma trayectoria fundamental sin salirse de ella.
- Para lograr seguir estados post-críticos se ha encontrado necesario incluir imperfecciones en la geometría de la cáscara GNIA, que inducen a entrar en una trayectoria secundaria de equilibrio.
- Bajo presiones o viento, LBA y GNA dan valores de cargas críticas casi idénticos; en este caso hay diferencias de entre 17% y 25%, siendo superiores las obtenidas por GNA.
- Para análisis bajo presiones o viento se encuentra que los resultados de LBA son un límite superior con respecto a GNIA; tal cosa no ocurre para carga térmica, dando resultados de LBA menores que los de GNIA.
- Se estudiaron dos tanques, uno pequeño con $R/H = 0.5$ y $R/t = 900$ (Tanque 1); el Tanque 2 es más grande, con $R/H = 1$ y $R/t = 2040$. El tanque grande conduce a temperaturas críticas un 50% menores que las del pequeño, debido a las diferentes rigideces que impiden la libre deformación de la cáscara. Nótese que cuanto mayor es la restricción a deformaciones en un tanque, menores son las temperaturas críticas que se obtienen.
- Las trayectorias post-críticas son estables (Tanque 1) o levemente decrecientes (Tanque 2) pero en ningún caso muestran máximos sensibles a imperfecciones.
- La influencia del fluido es estabilizante, pero su incidencia depende de la geometría. En el tanque pequeño la temperatura crítica sube un 20%, mientras que en el tanque grande solo sube un 5%.
- Se aprecia que los resultados que se reportan en este trabajo son consistentes con un comportamiento bajo presiones laterales, con leve sensibilidad ante imperfecciones. Esto es consistente con los resultados obtenidos por Batista-Abreu y Godoy (2013).

8 Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo dado a este proyecto a través de subsidios de la Universidad Nacional del Comahue, de la Universidad Nacional de Córdoba, y de CONICET. LAG es Investigador Superior de CONICET y agradece el apoyo de esa institución.

Referencias bibliográficas

- ABAQUS (2006). Simulia. Unified FEA. Dassault Systemes. Warwick, Rhode Island. USA.
- API 650 (2010). Welded steel tanks for oil storage. American Petroleum Institute.
- Atkinson, G. (2011). Blast damage to storage tanks and steel clad buildings. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 89, p. 382-390.
- Batista-Abreu, J. y Godoy, L.A. (2011). Investigación de causas de explosiones en una planta de almacenamiento de combustible en Puerto Rico. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, v. 11(2), p. 109-122.
- Batista-Abreu, J. y Godoy, L.A. (2009). Investigación de causas de explosiones en plantas petrolíferas: El accidente de Buncefield. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, v. 9(1-2), p. 187-202.
- Batista-Abreu, J. (2011). Comportamiento de tanques de almacenamiento de petróleo en presencia de fuego. Tesis. Recinto Universitario de Mayagüez, Universidad de Puerto Rico.
- Batista-Abreu, J. and Godoy, L.A. (2013). Thermal buckling behavior of open cylindrical oil storage tanks under fire. *ASCE J. Performance of Constructed Facilities*, v. 27(1), p. 89-97.
- Batista-Abreu, J., Burgos, C., Calabró, H.D., Godoy, L.A. y Jaca, R. (2014). Simplificaciones en el tratamiento computacional de condiciones en la parte superior de tanques de almacenamiento de fluidos. *Mecánica Computacional*, v. 33.
- Buncefield Major Incident Investigation Board (2008), *The Buncefield Incident, 11 December 2005, Final report.* The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, UK.
- Godoy, L. A. (2000). *Theory of Elastic Stability: Analysis and Sensitivity.* Taylor and Francis, Philadelphia, PA, USA.
- Godoy, L.A. (2007). Performance of Storage Tanks in Oil Facilities Following Hurricanes Katrina and Rita. *ASCE Journal of the Performance of Constructed Facilities*, v. 21 (6), p. 441-449.
- Godoy, L.A. and Batista-Abreu, J. (2012). Buckling of fixed roof aboveground oil storage tanks under heat induced by an external fire. *Thin Walled Structures*, v. 52, p. 90-101.
- Landucci, G., Gubinellia, G., Antonioni, G. and Cozzani, V. (2009). The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Analysis and Prevention*, v. 41, p. 1206–1215.
- Liu, Y. (2011). Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire. Tesis, Institute for Infrastructure and Environment, The University of Edinburgh, Escocia.
- Noret E., Prod'homme G., Yalamas T., Reimeringer M., Hanus J.L. and Duong D.H. (2012). Safety of atmospheric storage tanks during accidental explosions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 16(9), p. 998–1022.
- Riks, E. (1972). The application of Newton's method to the problem of elastic stability. *Journal of Applied Mechanics*, v. 39, p. 1060-1065.
- Riks, E. (1979). An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. *International Journal of Solids and Structures*, v. 15, p. 529-551.
- Rotter, J. M., Schmidt, H. (Eds.) (2008). *Buckling of Steel Shells: European Design Recommendations, ECCS Technical Committee 8 on Structural Stability, Eurocode 3, Part 1-6.*
- Zhao Y. and Lin Y. (2014). Buckling of cylindrical open-topped steel tanks under wind load. *Thin-Walled Structures*, v. 79, p. 83-94.

Instability of oil storage tanks with conical roof during fire

Abstract

This paper presents an analysis of the structural behavior of oil storage tanks with fixed roof under thermal loads due to fire adjacent to the structure. In the numerical simulations, the shell is modeled with doubly curved finite elements using the general purpose code ABAQUS. The deflected configurations, together with critical temperatures and post-buckling behavior are obtained. Linear bifurcation LBA, geometrically nonlinear GNA, and geometrically nonlinear analysis with imperfections GNIA, have been performed. Two geometric configurations of tanks have been investigated, which are representative of different storage capacities, with fixed roof. The loads include an external temperature and hydrostatic pressures. The study considers the influence of aspect and slenderness ratios, and the stabilization effect due to the fluid stored. The results show that instability occurs for low temperatures, in the order of 70 to 150°C, with buckling modes that affect the region of the shell that is most directly exposed to fire. Instability occurs under elastic material behavior.

Keywords: Finite elements, Fire, Steel structures, Shells, Tanks with roof

Conclusions

Modeling of tanks under thermal effects that represent a fire external to the tank has been reported in this work. Equilibrium paths and critical states are evaluated using linear bifurcation analysis LBA; geometrically nonlinear analysis GNA; and geometrically nonlinear analysis with imperfections GNIA. The main conclusions may be summarized as follows:

- Regarding modeling aspects, GNA that only includes geometric nonlinearity on the perfect shell leads to equilibrium paths which are basically linear until a critical state is reached, but instead of progressing into a post-buckling path, the analysis stays along the fundamental path without leaving it.
- To obtain post-critical paths it is necessary to include geometric imperfections in the shell via GNIA, which allows progress into a secondary post-buckling path.
- Under pressure or wind, LBA and GNA provide almost identical critical values; however, under temperature loads as in this case there are differences ranging between 17% and 25%, with higher values computed via GNA.
- LBA under pressure or wind are an upper bound with respect to GNIA; this does not occur in the present case, with LBA values being lower than GNIA.
- Two tanks were investigated, Tank 1 is smaller with $R/H = 0.5$ and $R/t = 900$; Tank 2 is larger, with $R/H = 1$ and $R/t = 2040$. For the large tank, the critical temperatures are 50% lower than those in the small tank, due to the differences in stiffness which restrain free deformations of the shell. Notice

that increasing the deformations constraints in a tank induces higher stresses and thus lower critical temperatures.

- Post-critical equilibrium paths are stable (Tank 1) or slightly decreasing (Tank 2), but they never show maximum points that are sensitive to imperfections.
- The influence of the fluid is stabilizing, but its influence depends on the geometry: in the small tank the critical temperature increases by 20%, whereas only 5% increase is obtained in the large tank.
- The results of this work are consistent with the buckling under lateral pressure, with moderate imperfection-sensitivity. This is consistent with results obtained by Batista-Abreu and Godoy (2013).