

INFLUENCIA DEL NIVEL DE FLUIDO Y VIENTO EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UN TANQUE DE PETRÓLEO EN SITUACIÓN DE INCENDIO

Rossana C. Jaca^a, Horacio D. Calabró^a y Susana N. Espinosa^a

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén,
Argentina. rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar, danycalabro@yahoo.com.ar,
susana.espinosa@fain.uncoma.edu.ar*

Palabras clave: Fuego, tanques de petróleo, elementos finitos, pandeo térmico, comportamiento poscrítico.

Resumen. Los escenarios de incendio en baterías de tanques metálicos de petróleo o derivados dependen de muchos factores como tipo de fluido, distancia entre tanques, dimensiones de los tanques, viento actuado durante el incendio, nivel de fluido en los tanques, entre otros aspectos. El fuego iniciado en un tanque puede propagarse a los adyacentes con la posibilidad de un efecto dominó. En este trabajo se analiza el comportamiento estructural de un tanque con techo cónico expuesto a fuego proveniente de otro tanque de iguales dimensiones en condición de incendio, con una separación entre sí equivalente a un diámetro. En un trabajo previo se determina la distribución de temperaturas sobre la superficie del tanque en estudio mediante un análisis de transferencia de calor, al llegar al estado estacionario. Para el análisis se modela el tanque por elementos finitos mediante un código de propósitos generales (ABAQUS) y se realiza un análisis de bifurcación lineal para determinar las temperaturas críticas de inicio de pandeo en el tanque para los diferentes escenarios. Se considera en el estudio la influencia del nivel de fluido contenido y del viento actuando simultáneamente con el fuego, explorando las situaciones más desfavorables y los modos de falla asociados. La situación más comprometida para la envolvente cilíndrica del tanque corresponde a fuego actuando sobre el tanque sin fluido y llama vertical en ausencia de viento.

1 INTRODUCCIÓN

Los tanques de almacenamiento de fluidos son parte de la infraestructura que da soporte a la industria petroquímica, formando parte de refinerías o dispuestos en baterías de almacenamiento de petróleo y/o derivados. Almacenar fluidos combustibles es muy diferente a almacenar otros fluidos por su potencial contaminación en un evento de falla y su alta combustibilidad en caso de incendio. La magnitud de los riesgos y la sensibilidad a lo largo de todo el mundo hacen de ésta una de las actividades más críticas en lo referido a accidentes, sobre todo en eventos que involucren fuego y explosiones. Nolan (2014) presenta un detalle de los principales eventos de incendios desde el inicio de la industria del petróleo hasta la actualidad, mencionando que debido al crecimiento de esta industria se ha producido un incremento de la magnitud y cantidad de los incidentes. Entre los más emblemáticos de los últimos tiempos menciona BP Texas City (2005), Buncefield, UK (2005), Puerto Rico (2009) y Deepwater Horizon/ British Petroleum (2010), que han demostrado el impacto que producen estos accidentes representado por pérdidas de vidas, impacto ambiental, daño en las propiedades y costos financieros asociados no solamente a la recuperación de las propiedades sino también los vinculados a la no operación de las instalaciones. Otros incidentes más cercanos son los que se produjeron en Venezuela (2012), Rio de Janeiro (2013) y en nuestro país los registrados en una destilería de YPF en Ensenada, La Plata, en 2013 y en Marlagüe, Mendoza, en 2014.

Chang y Lin (2006) identificaron causas de accidentes de 242 tanques de hidrocarburos en el mundo, de los cuales 85% presentaron incendios. Esencialmente, las fallas de tanques son debidas a falla en la integridad de la estructura del tanque, fallas de funcionalidad, defectos localizados como fisuras, pérdidas de espesor o soldaduras defectuosas. Las causas principales que producen estos accidentes son la acción del viento, fuego, explosiones y sismos, las que pueden acoplarse entre sí. Estas acciones generan consecuencias estructurales que, en general, se producen repentinamente y están asociadas al pandeo de la envoltura cilíndrica y/o pérdida de integridad del techo. Como estos tanques están dispuestos en baterías, un incendio iniciado en un tanque puede extenderse por efecto dominó a gran parte o a la totalidad de la planta. La Figura 1 muestra incendios en baterías de tanques ocurridos durante el 2015 en Francia y en China, en este último incidente (Figura 1(b)) el incendio se propagó a varios tanques de la planta mientras que en el de Francia (Figura 1(a)) todavía está limitado a un tanque pero el viento es una amenaza para la propagación del fuego.



Figura 1: Incendios en baterías de tanques, (a) Francia 2015, (b) China 2015

El estudio del comportamiento de estructuras bajo fuego en general se concentra en estructuras de tipo pórtico formadas por vigas y columnas. La respuesta de estructuras

formadas por cáscaras es muy diferente ya que el principal mecanismo de colapso está asociado a pandeo. La acción del fuego sobre los tanques produce grandes deformaciones en el cuerpo cilíndrico y el techo, pudiendo llegar en su etapa final al colapso total. Landucci et al. (2009) realizaron una evaluación cuantitativa de riesgo en diferentes escenarios de incendio para tanques de almacenamiento considerando el efecto dominó en la propagación del fuego, en función del tiempo de falla de cada tanque. Una investigación numérica destinada a evaluar la seguridad de tanques de almacenamiento de combustibles a altas temperaturas generadas por incendio fue realizada por Da Silva Santos y Landesman (2014), pero no tiene en cuenta la respuesta estructural de los tanques. Liu (2011) llevó a cabo una exploración para fuego equivalente a la de tanques bajo viento. 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 en estudio, obteniendo la distribución de temperatura sobre la pared del tanque y analizando también la respuesta estructural del tanque.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento estructural de un tanque sometido a una carga térmica proveniente de otro tanque de igual tamaño en situación de incendio. Se realiza un análisis secuencial, para lo cual, en un trabajo previo, se determinan los perfiles de temperatura sobre el tanque en estudio a través de un modelo de transferencia de calor y posteriormente se estudia el pandeo de las cáscaras que componen el tanque al ser sometido a ese campo térmico. Se incluye en el análisis térmico la velocidad del viento que cambia la posición de la llama y la existencia de combustible en el interior del tanque, ambos aspectos modifican los perfiles de temperatura sobre el tanque en estudio y en consecuencia afectan los resultados del análisis de bifurcación lineal implementado sobre el tanque.

2 CASO DE ESTUDIO

El tanque estudiado presenta un diámetro (D) de 11.44m, la altura de la envolvente cilíndrica (H) es de 11.44m y presenta un techo cónico de altura (h) de valor 1.40m, resultando una altura total del tanque de valor 12.84m. El espesor de la cáscara cilíndrica (t) es de 0.0064m (1/4"), diseñado en base a la norma API 650 (2010), y el techo presenta el mismo espesor. Las principales dimensiones del tanque se muestran en la Figura 2(a). En este tipo de tanque suele disponerse un conjunto de vigas radiales y circunferenciales para otorgarle mayor rigidez a la cáscara cónica; estos elementos no son considerados en la modelación y para representar ese aporte de rigidez en el techo se modela el techo con una cáscara equivalente de mayor espesor. Un trabajo previo de los autores (Burgos et al., 2015) demostró que modelos con techo equivalente de espesor entre 2 y 5 veces el espesor de la cáscara tiene formas de modos similares a modelos con las vigas rigidizadoras en el techo. El material constitutivo del tanque es acero A36 con un módulo de elasticidad (E) de valor 201MPa y un coeficiente de Poisson (ν) de 0.3. Como condición de apoyo se consideran apoyos fijos, con restricción de desplazamientos.

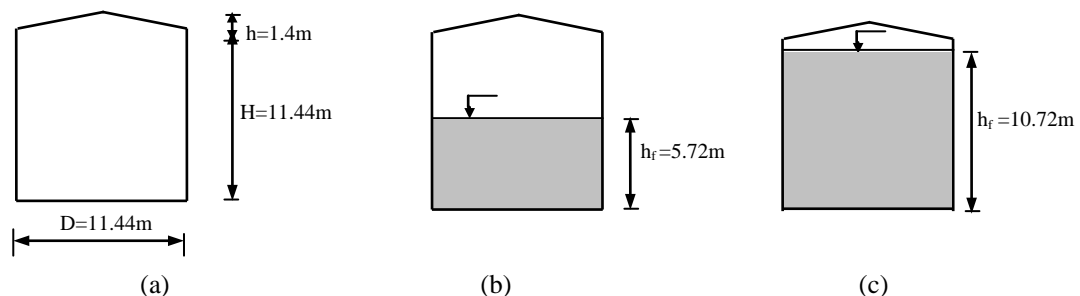


Figura 2: Tanques en estudio, (a) Vacío, (b) Fluido nivel medio, (c) Fluido nivel lleno

Se simulan dos tanques idénticos separados un diámetro entre sí (entre caras exteriores), representando al tanque donde se origina la llama, identificado como tanque fuente, y al tanque objetivo que recibe la radiación. Se supone que la llama se produce por combustión de gasolina. La incidencia del viento sobre la posición y geometría de la llama y su posterior efecto sobre las temperaturas de la superficie del tanque objetivo se comparan con aquellas resultantes de una llama radiando en ausencia de viento. El tanque objetivo está vacío o contiene gasolina. Se analizan dos niveles diferentes del combustible dentro del tanque objetivo, a mitad de altura del cilindro ($h_f=5.72\text{m}$) y altura completa del tanque menos una revancha ($h_f=10.72\text{m}$), como se esquematiza en la Figura 2(b) y (c). La Figura 3(a) muestra el tanque objetivo y el tanque fuente con llama en la parte superior sin considerar la acción del viento, mientras que en la Figura 3(b) se representa el caso en que la acción del viento inclina la llama sobre el tanque estudiado.

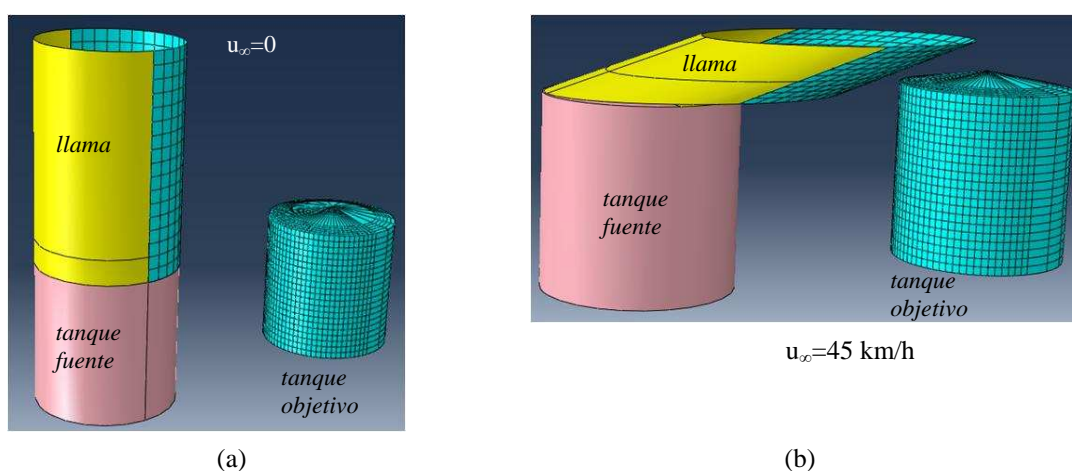


Figura 3: Simulación de situación de incendio, (a) Llama Vertical, sin viento, (b) Llama inclinada por el viento

Se considera la influencia de viento con velocidad promedio (u_∞) de 45km/h , ya que en la región patagónica estas velocidades presentan una alta frecuencia de ocurrencia. Ambas situaciones mostradas en la Figura 3 pueden producirse en un mismo evento de incendio en una batería de tanques. Sin la presencia de viento la llama asciende verticalmente hacia arriba del tanque fuente y con viento la llama se inclina, considerando la situación más desfavorable, que ocurre cuando la llama se inclina en dirección al tanque objetivo.

3 CARGA TÉRMICA

La evaluación del campo de temperaturas aplicado sobre la superficie del tanque objetivo se realiza en un trabajo previo de los autores en etapa de revisión (Espinosa y Jaca, 2016). Para ello es necesario realizar una modelación de la llama, en una primera etapa, y posteriormente desarrollar un modelo de transferencia de calor que permita obtener las temperaturas en el tanque en estudio, para llevar a cabo el análisis estructural.

En el modelo de la llama se tiene en cuenta que el efecto de la llama sobre los tanques adyacentes en una granja de tanques depende en líneas generales de parámetros geométricos asociados al fuego y a los tanques, materiales de construcción, tipo y volumen de combustibles almacenados, condiciones ambientales y del tiempo requerido para extinguir el incendio. La combustión de hidrocarburos produce una llama con dos zonas diferenciadas, una inferior en la base del fuego con llama clara y otra en la parte superior de llama oscura con humo denso y llamas intermitentes como puede verse en la Figura 1(b). El modelo usado

para caracterizar la llama se denomina *llama sólida bicapa*, representada como un cilindro vertical en ausencia de viento o inclinado por el viento, diferenciando dos capas que representan la llama clara inferior donde la combustión es más eficiente y la llama oscura superior de menor eficiencia con la presencia de humo. El cilindro que representa la llama tiene el mismo diámetro que el tanque fuente y la altura de la misma se calcula en función de parámetros empíricos asociados a la velocidad de combustión del combustible, del diámetro de la llama y la velocidad del viento, entre otros.

En cuanto al modelo de transferencia de calor se consideraron las siguientes contribuciones para el tanque objetivo: conducción a través del acero, convección natural y forzada según el caso, intercambio de radiación entre llama-tanque-ambiente, y radiación interna a través del aire interior. En este último aporte se consideró que el combustible líquido es opaco a la radiación y que el aire interno es transparente, lo que implica que no interfiere en la transferencia por radiación. De esta manera, el intercambio de energía radiante entre el techo y las paredes internas del tanque se modifica según se encuentre vacío (lleno de aire) o contenga diferentes niveles de combustible líquido. La temperatura del aire dentro del tanque se supone igual a la temperatura atmosférica (20°C) y para el combustible líquido, se consideró una variación de su temperatura promedio entre 20°C y 80°C , según el tiempo de exposición al fuego. Se consideran dos posiciones de la llama, llama actuando desde el tope del tanque (Figura 4(a)) y llama actuando desde la base, para tener en cuenta la posibilidad de derrame del combustible encendido (Figura 4(b)).



Figura 4: Fuego en tanques, (a) Desde la parte superior del tanque, (b) Desde la base del tanque

Las Figuras 5 y 6 muestran las características resultantes de la llama vertical e inclinada, como la longitud total de la llama sobre el tanque fuente (L), la longitud de llama clara (L_c), el desplazamiento de la llama por el viento (D), las temperaturas de la llama clara ($T=933^{\circ}\text{C}$) y de la llama oscura ($T=622^{\circ}\text{C}$) y la inclinación de la llama correspondiente a una velocidad de viento de 45km/h .

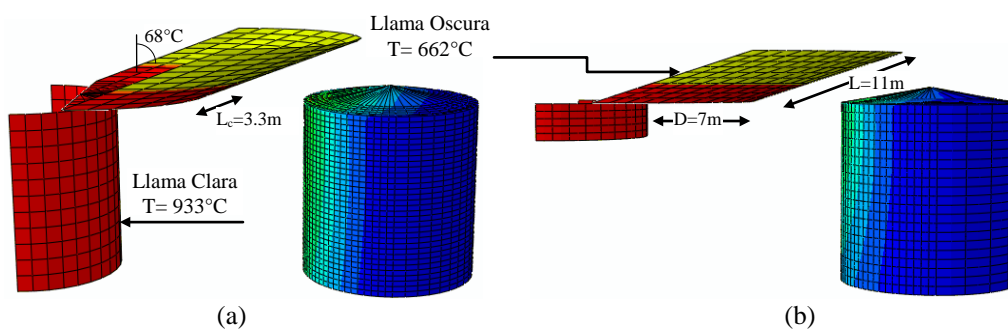


Figura 5: Características de la llama inclinada por el viento, (a) Desde la base del tanque, (b) Desde el tope del tanque

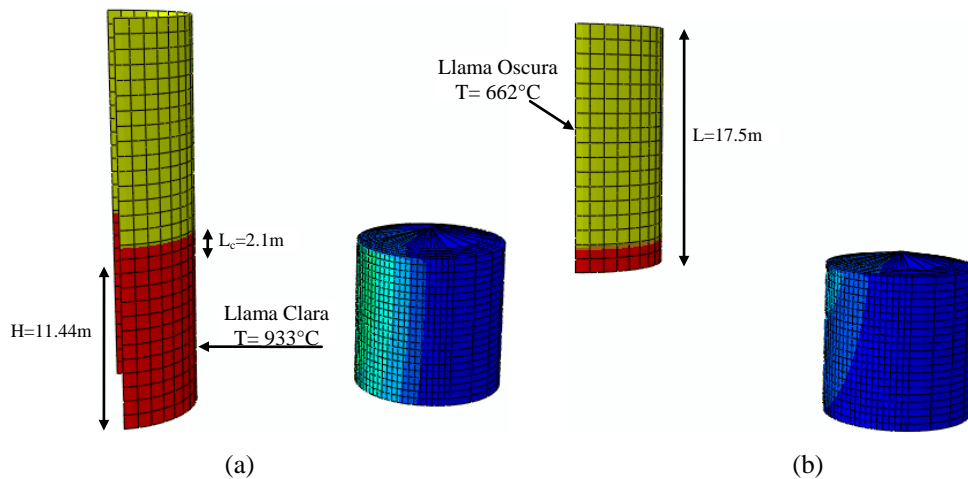


Figura 6: Características de la llama sin viento, (a) Desde la base del tanque, (b) Desde el tope del tanque

Dado que se consideran tres niveles de fluido con altura de fluido (h_f) nula, mitad de altura del tanque y altura total del cilindro menos una revancha, al combinarse con diferentes posiciones de la llama (vertical o inclinada) desde la base del tanque o desde el tope resultan 12 casos para los cuales se halla la distribución de temperatura sobre la superficie del tanque objetivo. La Figura 7 muestra la distribución de temperaturas hallada sobre la superficie del tanque objetivo para todos los casos evaluados. Se observa que las mayores temperaturas sobre el tanque objetivo se obtienen para el caso de viento actuando sobre la llama, las que principalmente se concentran en el techo del tanque y la parte superior del cuerpo del tanque.

	Sin viento		Con viento	
	Llama desde la base	Llama desde el tope	Llama desde la base	Llama desde el tope
$h_f/H=0$				
	$T_{max}=394^{\circ}C, T_{min}=35^{\circ}C$	$T_{max}=227^{\circ}C, T_{min}=24^{\circ}C$	$T_{max}=520^{\circ}C, T_{min}=29^{\circ}C$	$T_{max}=495^{\circ}C, T_{min}=27^{\circ}C$
$h_f/H=0.5$				
	$T_{max}=405^{\circ}C, T_{min}=30^{\circ}C$	$T_{max}=227^{\circ}C, T_{min}=23^{\circ}C$	$T_{max}=518^{\circ}C, T_{min}=29^{\circ}C$	$T_{max}=499^{\circ}C, T_{min}=26^{\circ}C$
$h_f/H=0.94$				
	$T_{max}=381^{\circ}C, T_{min}=20^{\circ}C$	$T_{max}=217^{\circ}C, T_{min}=20^{\circ}C$	$T_{max}=500^{\circ}C, T_{min}=14^{\circ}C$	$T_{max}=484^{\circ}C, T_{min}=15^{\circ}C$

Figura 7: Distribución de temperaturas en la superficie del tanque objetivo enfrentada a la llama, para los 12 escenarios considerados. Las zonas de temperatura máxima se indican en rojo y las de mínima en azul.

La evaluación de las cargas térmicas se realizó en un trabajo previo (Espinosa y Jaca, 2016) mediante un modelado numérico por elementos finitos de la llama y del tanque objetivo (ABAQUS, 2006). Para ello se usaron elementos cuadrangulares y triangulares usados en transferencia de calor, de 6 y 8 nodos denominados DS6 y DS8 respectivamente, que permiten una aproximación cuadrática del campo de temperaturas.

El campo de temperaturas obtenido corresponde al estado estacionario obtenido con el modelo implementado de transferencia de calor.

4 MODELO NUMÉRICO

El tanque objetivo fue modelado por elementos finitos mediante el código de propósitos múltiples ABAQUS (2006), usando elementos de cáscara (STR165 y S8R5) de 6 y 8 nodos respectivamente, con una aproximación cuadrática de los desplazamientos nodales. El trabajo se plantea en forma secuencial; para la evaluación estructural se usa la misma malla que la usada en la evaluación de las temperaturas lo que permite considerar como carga térmica las temperaturas nodales obtenidas como resultado de la modelación de transferencia de calor. El tanque estudiado ya fue estudiado por los autores (Calabró et al., 2014) teniendo en cuenta una distribución circunferencial de carga térmica obtenida por Liu (2011) y constante en altura.

Una primera aproximación a la temperatura que produce inestabilidad del equilibrio se realiza a través de un Análisis de Bifurcación Lineal (LBA) que permite identificar la temperatura crítica y la forma de modo crítico asociado. La temperatura crítica de pandeo se considera como la temperatura a la cual la estructura pandeo, obtenida en base a un análisis de autovalores y autovectores y planteado en la siguiente expresión:

$$\left(\mathbf{K}_0 + \lambda^c \mathbf{K}_G\right) \Phi^c = 0 \quad (1)$$

donde \mathbf{K}_0 es la matriz de rigidez lineal del sistema, \mathbf{K}_G la matriz de carga-geometría, que incluye la parte no lineal de las relaciones cinemáticas, λ^c es la carga crítica (el autovalor) y Φ^c es la forma de modo dada por el autovector. La carga crítica λ^c es el parámetro multiplicador de la carga térmica de referencia. Para cada uno de los casos estudiados se calcula la temperatura crítica (T^c) en función de la temperatura máxima hallada para la distribución de temperaturas correspondiente y del parámetro crítico (λ^c) según la expresión:

$$T^c = \lambda^c T_{\max} \quad (2)$$

La presencia de fluido en el interior del tanque se considera en la simulación actuando como una carga hidrostática, con un nivel equivalente al usado en la modelación de transferencia de calor ($h_f/H=0, 0.5$ y 0.94) representando una condición de tanque vacío, nivel de fluido medio y nivel de fluido lleno, respectivamente. La carga hidrostática genera en la cáscara tensiones de tracción que resultan estabilizantes para el problema de pandeo. Por esta razón, la condición más desfavorable para el pandeo es esperable que se presente si el tanque no tiene fluido interior. Esta característica se suma al hecho de que las temperaturas sobre la pared del tanque resultan menores en la zona donde existe fluido en el interior del tanque, debido a la inercia térmica del fluido. Para el techo se adopta un espesor de dos o tres veces el espesor de la envolvente cilíndrica, para representar el aporte de rigidez que provee la estructura interna de vigas y columnas de soporte del techo cónico.

4.1 Análisis de Bifurcación Lineal (LBA)

Tanques con llama inclinada por viento

La Figura 8 muestra los modos críticos obtenidos para el tanque bajo la acción del campo térmico resultante de llama actuando desde la base del tanque e inclinada por el viento, sin fluido en el interior (vacío) o con fluido a nivel mitad del tanque (nivel medio) o hasta la parte superior del cilindro (nivel lleno). El espesor del techo se toma igual a dos veces el espesor del cilindro ($t_r=2t_c$). En los tres casos considerados, el primer modo involucra deformaciones en el techo del tanque ya que en ese sector se obtienen las mayores temperaturas; además se muestra el primero de los modos superiores donde aparecen desplazamientos en el cilindro. En todos los casos mostrados en la Figura 8 se observa que la presencia de fluido en el interior del tanque aumenta el valor de los autovalores correspondientes y las temperaturas asociadas a cada uno de ellos, obtenidas con la ecuación (2), de manera que el tanque lleno presenta una temperatura asociada al primer modo (153°C), siendo un 35% mayor que aquella asociada al primer modo del tanque vacío (113°C). Además se observa que en los modos que presentan desplazamientos en el cilindro, éstos se concentran en la parte superior del cuerpo del tanque debido al fluido con valores casi nulos en la parte inferior. Las diferencias de temperaturas asociadas a los modos superiores que presentan desplazamientos en el cilindro, muestran un incremento entre el 57% y 30 % respecto al primer modo.

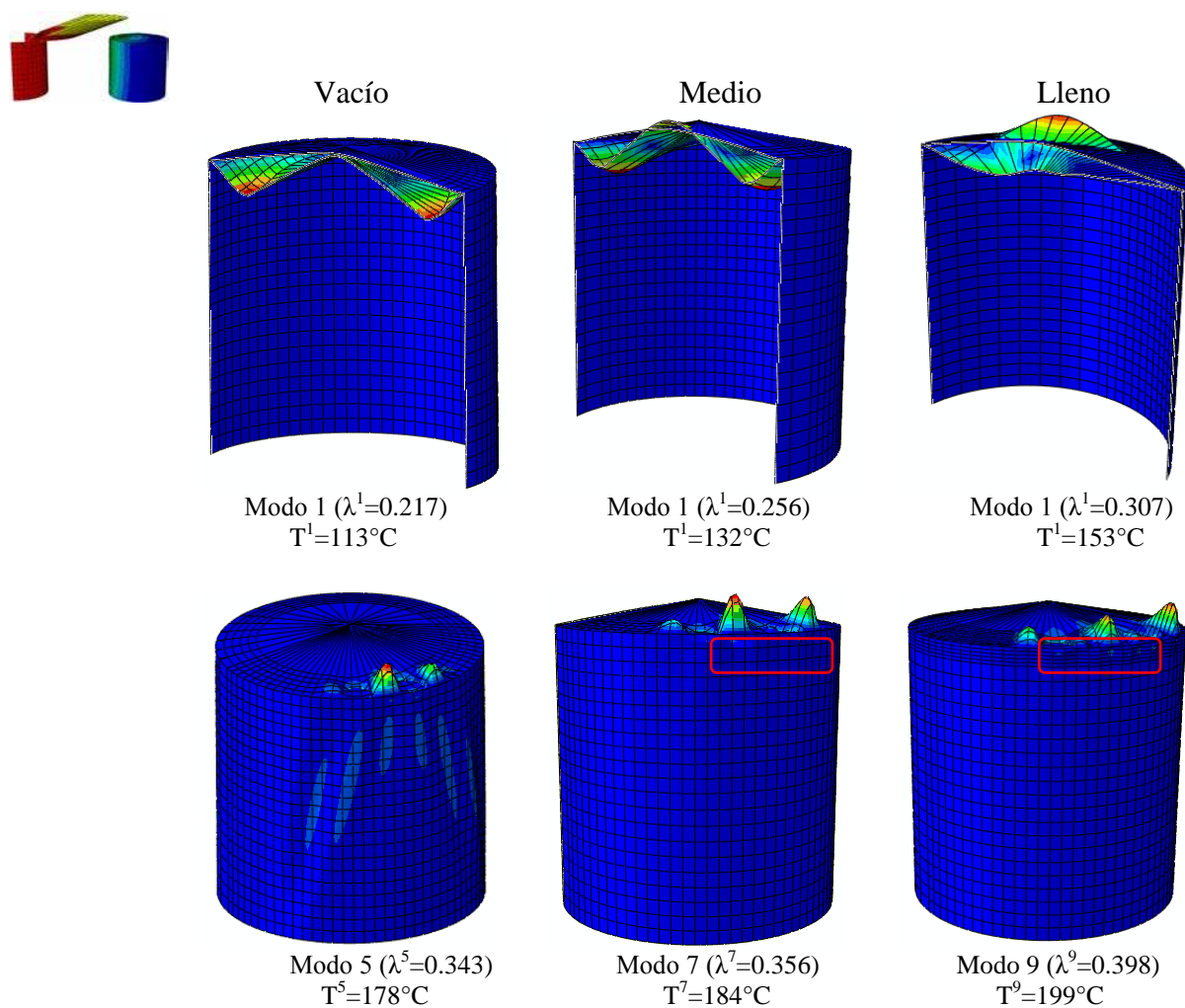


Figura 8: Modos críticos y temperaturas asociadas para llama inclinada sobre el viento actuando desde la base, considerando el tanque vacío, nivel de fluido medio y lleno.

La Figura 9 muestra las formas de modo crítico para el caso de la llama actuando desde el tope del tanque fuente con acción de viento, para nivel de fluido variable en el interior del tanque. Se puede observar un comportamiento similar al obtenido con llama desde la base con primeros modos que afectan al techo y temperaturas asociadas iguales o muy próximas a las que corresponden a llama desde la base. Los primeros modos en el cilindro presentan temperaturas levemente inferiores a las obtenidas con fuego a lo largo de todo el cilindro.

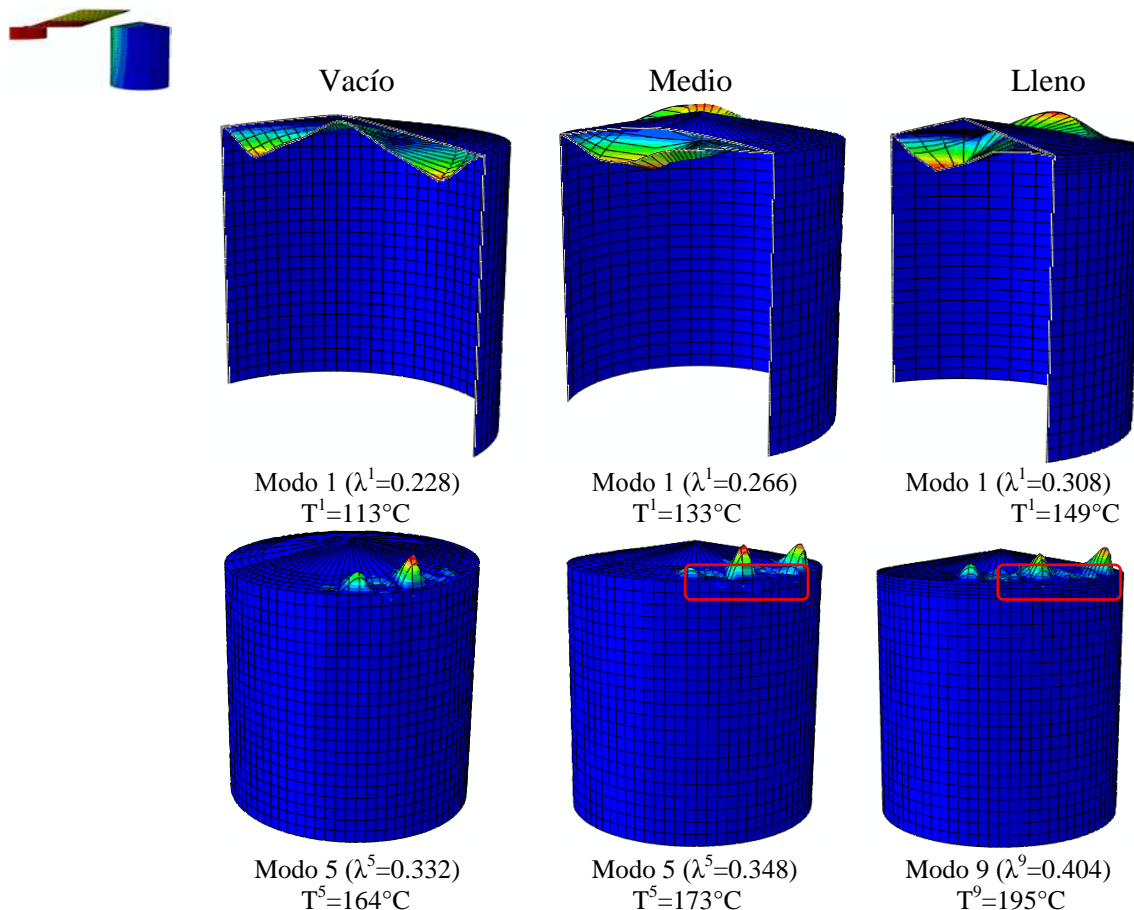


Figura 9: Modos críticos y temperaturas asociadas para llama inclinada sobre el viento actuando desde el tope, considerando el tanque vacío, nivel de fluido medio y lleno.

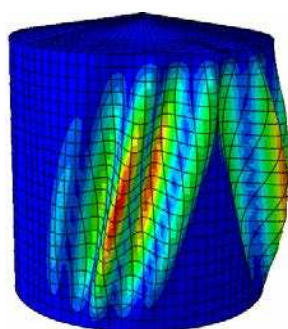
Registros fotográficos de tanques en situación de incendio muestran casos donde los daños están concentrados en el techo y en la parte superior del tanque (Figura 10). En el incendio registrado en India (2009) se puede observar que el tanque ubicado a la izquierda de la Figura 10(a) muestra daño en la parte superior del cilindro y en el techo, mientras que el que está a su lado muestra un daño extendido a toda la envolvente cilíndrica. El tanque de la Figura 10(b) presenta un daño más localizado en la zona próxima al techo; estas configuraciones se presentan cuando el incendio todavía está activo pero pueden cambiar a medida que continúa el mismo. En algunos casos el techo se desprende del cuerpo del tanque por una explosión registrada por acumulación de gases, en estos casos queda la cáscara cilíndrica sin la restricción superior que le aporta el techo.

Los daños que comprometen realmente la integridad del tanque son aquellos que afectan a todo el cuerpo cilíndrico del tanque (tanque a la derecha de Figura 10(a)). En todos los casos analizados con viento los modos mostrados anteriormente presentan daños en el techo y parte superior del cilindro, pero existen modos superiores que se extienden a toda la pared del

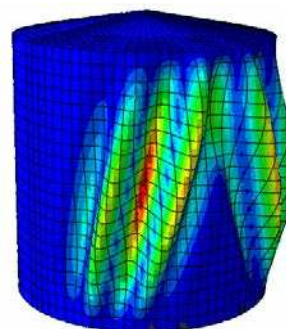
tanque en la zona que enfrenta el fuego. La Figura 11 muestra el modo 11 ($\lambda^{11}=0.375$) con desplazamientos en el cuerpo del tanque para llama desde la base, con viento y sin fluido en el interior. La temperatura asociada a ese modo es de 195°C . También se muestra el modo 18 ($\lambda^{18}=0.496$) cuando la llama actúa desde el tope y no hay fluido en el interior, con una temperatura asociada de 246°C . Con la presencia de fluido de nivel variable no aparecen modos que incluyan desplazamientos en todo el cilindro, si la llama llega a la base del tanque o solamente actúa desde la parte superior del tanque fuente.



(a) (b)
Figura 10: Tanques con daño durante incendios, (a) Indian Oil Corporation, 2009,
(b) Petróleos de Venezuela, 2012



(a) Modo 11, $\lambda^{11}=0.375$
 $T^{11}=195^{\circ}\text{C}$



(b) Modo 18, $\lambda^{18}=0.496$
 $T^{18}=246^{\circ}\text{C}$

Figura 11: Modos representativos de daño en el cuerpo del tanque en condición vacío con viento,
(a) Llama desde la base, (b) Llama desde el tope

Tanques con llama vertical

Una evaluación similar de autovalores y autovectores se realiza para llama vertical sin considerar la acción del viento, la Figura 12 muestra los resultados obtenidos cuando el fuego actúa desde la base y la Figura 13 presenta resultados para llama actuando desde el tope del tanque fuente. Nuevamente se considera un espesor del techo igual a dos veces el espesor del cilindro. En estos casos analizados algunos valores del parámetro multiplicador de la temperatura (λ) resultan mayores a la unidad. Estos valores son descartados ya que como la distribución de temperaturas hallada en el análisis de transferencia de calor corresponde a estado estacionario, no es posible que existan temperaturas mayores sobre el tanque objetivo. Un valor de parámetro λ mayor a la unidad indicaría la posibilidad de temperaturas mayores a las obtenidas en estado estacionario, por esta razón se concluye que no se produce pandeo en esos casos estudiados.

El único caso que presenta desplazamientos extendidos en toda la envolvente cilíndrica es

cuando la llama actúa desde la base del tanque y en condición vacío, con temperatura crítica para el primer modo de valor 182°C . Para esta misma condición de carga de fuego, si el tanque se encuentra en condición lleno de fluido, el primer modo presenta desplazamientos en la parte superior del cilindro pero con una temperatura crítica mayor, de valor 384°C .

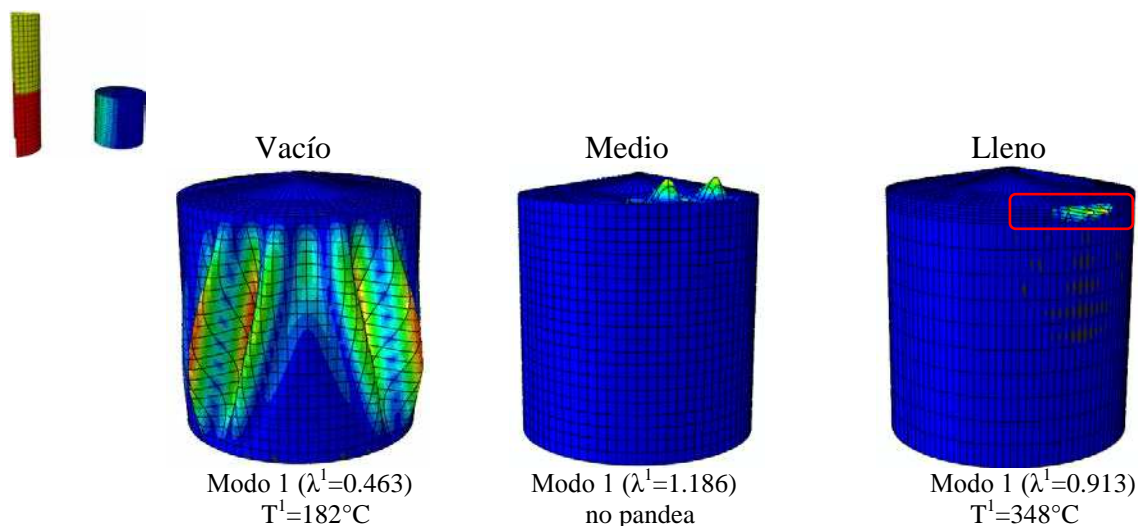


Figura 12: Modos críticos y temperaturas asociadas para llama vertical actuando desde la base, considerando el tanque vacío, nivel de fluido medio y lleno.

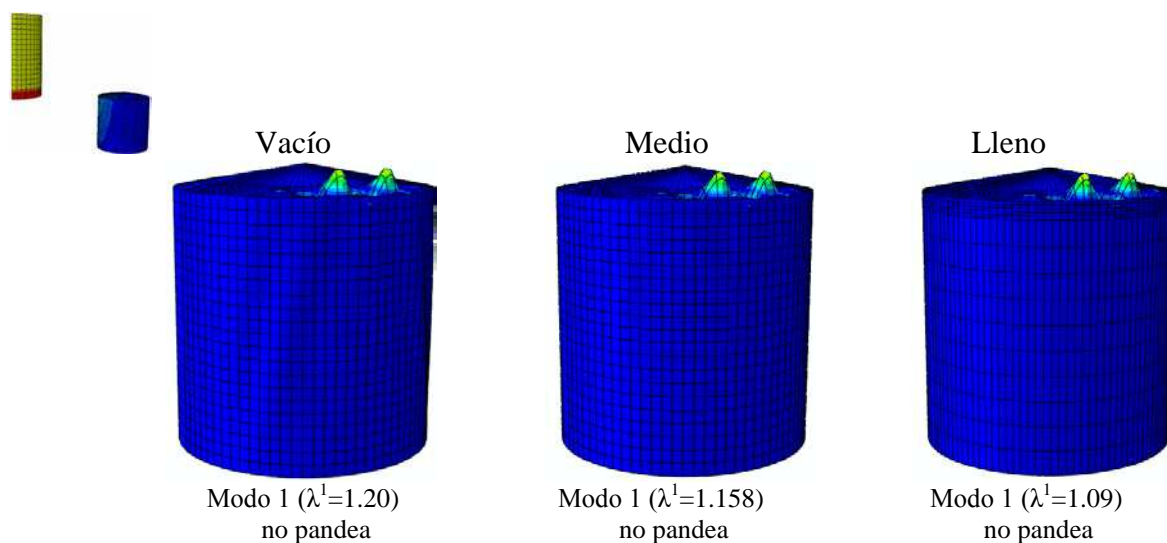


Figura 13: Modos críticos y temperaturas asociadas para llama vertical actuando desde el tope, considerando el tanque vacío, nivel de fluido medio y lleno.

Como una alternativa para considerar las cargas térmicas nodales provenientes del análisis de transferencia de calor, se propone un modelo de distribución de temperaturas sencillo teniendo en cuenta una variación circunferencial superpuesta con una distribución de temperaturas en altura. Esta aproximación de temperaturas se plantea para el caso de llama desde la base sin viento que es aquel para el que se registra la temperatura crítica más baja y forma de modo que afectan todo el cuerpo del tanque. Se considera una distribución parametrizada con respecto a la mayor temperatura obtenida ($T_{\max}=394^{\circ}\text{C}$) de manera que el máximo valor para la distribución es 1°C . Para la variación circunferencial se propone una función cosenoidal y para la variación en altura en el cilindro una función lineal, expresadas

en coordenadas cilíndricas. En el techo se considera la misma variación circunferencial y una función cúbica en altura. En ambos casos se toma para la variación circunferencial un ángulo θ medido a partir del meridiano que enfrenta al tanque fuente y z es la coordenada que permite la variación de la coordenada vertical. De esta manera resulta:

$$T(\theta, z) = \begin{cases} \cos^2 \theta * (0.015z + 0.85) & 0 \leq z \leq 11.44\text{m}, -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ \cos^2 \theta * (-0.025z^3 + 1.23z^2 - 18.8z + 92.8), & 11.44\text{m} < z \leq 12.84\text{m}, -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3)$$

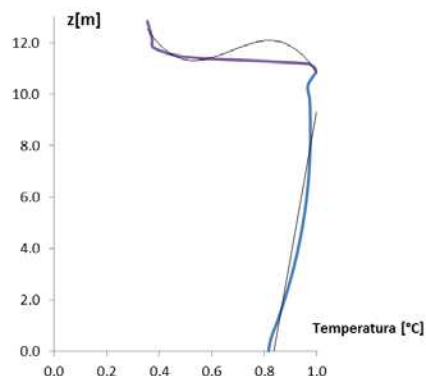


Figura 14: Perfil de temperatura sobre la coordenada vertical en el meridiano que enfrenta la llama, para tanque con llama radiando sin viento desde la base del tanque fuente.

Con esta distribución de temperaturas se obtiene una temperatura crítica de 159°C y una forma de modo similar a la hallada con la distribución de temperaturas nodales. Este valor resulta un 13% inferior al hallado en ese caso, siendo un valor conservador que permite que dicha expresión sea utilizada en otra geometría de tanque.

Un trabajo anterior de los autores (Calabró et al., 2014) muestra que una distribución de temperatura producida por una llama vertical actuando sobre el mismo tanque genera pandeo en la envolvente cilíndrica a una temperatura de 140°C con una forma de modo similar a la hallada en este trabajo. La carga térmica usada en ese caso (Calabró et al., 2014) fue la obtenida por Liu (2011) correspondiente a llama vertical desde la base del tanque y con igual altura que el tanque, con distribución circunferencial según una función cosenoidal y constante en altura. La temperatura crítica obtenida en este trabajo es mayor que la del trabajo precedente ya que las tensiones de compresión (asociadas al pandeo) por carga térmica, en general, son mayores en la parte inferior del tanque y como en esta zona las temperaturas son menores a las de distribución constante, entonces similar modo de pandeo se produce a mayor temperatura.

La comparación con el caso de llama inclinada por el viento muestra que el pandeo se presenta a temperaturas más altas debido a que la transferencia de calor producida por la llama inclinada solicita al tanque en estudio con mayores temperaturas, con valores aproximados a 500°C en la parte superior del cilindro. Por esa razón el pandeo en condición de tanque vacío con viento se produce a temperaturas considerablemente más bajas.

En todos los casos estudiados, la existencia de fluido en el interior del tanque hace que las temperaturas críticas de inicio de pandeo sean mayores que las obtenidas en condición de tanque vacío. Esta característica se observa independientemente de que actúe viento o no sobre la llama. La razón de este comportamiento puede relacionarse con las tensiones circunferenciales que se generan por acción de la carga hidrostática ejercida por el fluido y las menores temperaturas que se producen en la cáscara del tanque al estar en contacto con el

fluido. Este hecho indica que una estrategia para estabilizar las paredes de los tanques en caso de incendio podría ser la incorporación de agua una vez iniciado el mismo.

4.2 Influencia de la rigidez del techo

Si se considera que el espesor del techo es 3 veces el espesor del cilindro ($t_r=3t_c$), las temperaturas correspondientes a los modos críticos se modifican y en algunos casos cambian las formas de modo. Rehaciendo el cálculo de autovalores y autovectores con un espesor de techo tres veces el espesor del cilindro, se obtienen las temperaturas mostradas en la Tabla 1, indicándose en qué zona del tanque se presentan los mayores desplazamientos ya sea en el techo, en la parte superior del cilindro o en el cuerpo del cilindro. Se puede observar que al aumentar el espesor del techo, las temperaturas que producen desplazamientos equivalentes aumentan así como también aumentan cuando crece el nivel del fluido en el interior del tanque.

Si los daños se producen en el techo o en la parte superior del cilindro, el tanque mantiene la forma global en el cilindro y hay menor riesgo de derrame y propagación del incendio. Por esta razón aunque las temperaturas asociadas a formas de modo en el techo o parte superior del cilindro son menores, se considera como condicionante para diseño aquellas que producen daño en todo el cilindro como el mostrado en la Figura 11. La menor temperatura que produce formas de modos de este tipo se presenta para llama vertical y fuego actuando desde la base del tanque, sin fluido en el interior. Los valores hallados en dichos casos son prácticamente iguales, al considerar un techo con dos o tres veces el espesor del cilindro.

U_w [km/h]	Llama	T^c [°C]					
		$t_r=2t_c$			$t_r=3t_c$		
		Vacío	Medio	Lleno	Vacío	Medio	Lleno
45	Tope	113 (Techo)	133 (Techo)	149 (Techo)	235 (Techo)	272 (Techo)	229 (Sup. Cilindro)
		246 (Cilindro)	173 (Sup. Cilindro)	195 (Sup. Cilindro)	253 (Sup. Cilindro)	279 (Sup. Cilindro)	--
	Base	113 (Techo)	132 (Techo)	153 (Techo)	199 (Cilindro)	269 (Techo)	220 (Sup. Cilindro)
		195 (Cilindro)	184 (Sup. Cilindro)	199 (Sup. Cilindro)	--	279 (Sup. Cilindro)	--
0	Tope	--	--	--	--	--	--
	Base	182 (Cilindro)	--	340 (Sup. Cilindro)	183 (Cilindro)	--	403 (Sup. Cilindro)

Tabla 1: Temperaturas asociadas a formas de modo con desplazamientos en el techo, parte superior del cilindro o cuerpo del cilindro para todos los casos estudiados.

4.3 Análisis No Lineal Geométrico con Imperfecciones (GNIA)

Dado que el caso estudiado que más compromete al cuerpo cilíndrico es para llama vertical desde la base sin fluido interior, se realiza un análisis no lineal geométrico con imperfecciones según la forma del primer modo crítico ya que los modelos no lineales dan mejores resultados por aproximarse mejor al comportamiento real de las estructuras. Este

estudio se implementa a través del método de Riks (1972, 1979) que permite realizar seguimiento de trayectorias 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 (λ). El método permite considerar un estado base (P_0) previo a la aplicación de la carga variable que se incrementa desde un valor inicial nulo en función del parámetro λ

$$P = P_0 + \lambda(P_{ref} - P_0) \tag{4}$$

Como estado base se podría considerar el fluido interior y como estado de referencia, que aumenta según el parámetro λ , la distribución de temperaturas obtenidas mediante transferencia de calor. En particular dado que se analiza la condición de tanque vacío, el estado base es nulo.

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. Se incorpora como imperfección en el modelo, el primer modo de deformación que se obtiene del análisis de pandeo lineal (LBA), con diferentes amplitudes de imperfección ξ .

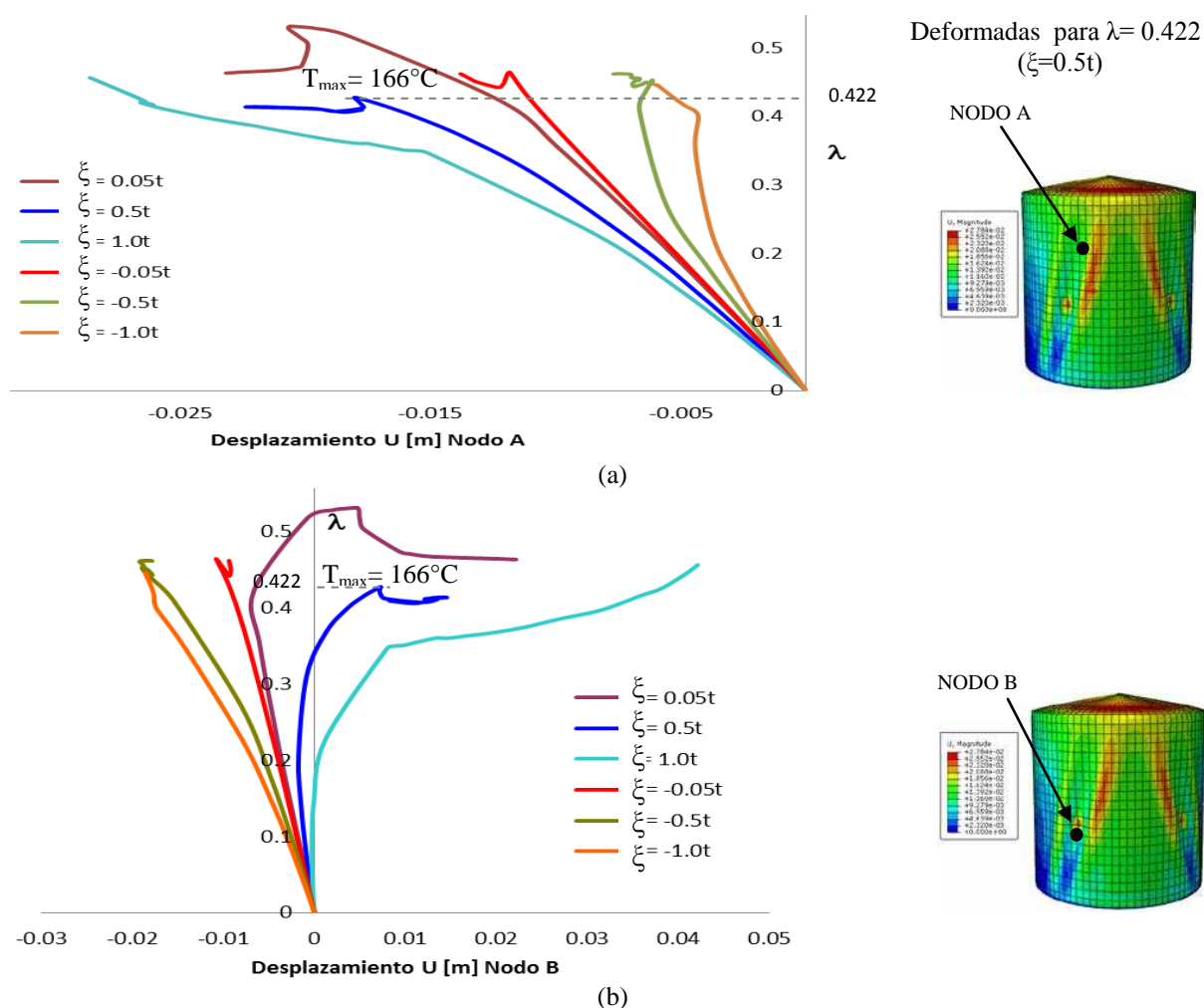


Figura 15: Trayectorias de equilibrio para el tanque vacío con llama vertical desde la base, (a) Nodo A, (b) Nodo B

Se representa el desplazamiento de los nodos A y B indicados en la Figura 15, en función del parámetro λ . Los nodos considerados presentan desplazamientos importantes en la primera forma de modo. La Figura 15 muestra las trayectorias de equilibrio obtenidas para amplitudes de imperfección (ξ) de valor 0.05t, 0.5t y 1.0t en el sentido del modo y -0.05t, -0.5t y -1.0t en sentido contrario. Para una imperfección de amplitud (ξ) de valor 0.5t, el parámetro alcanza la mayor disminución con el mismo tipo de deformada. Este valor ($\lambda=0.422$) corresponde a una temperatura de 166°C; a partir de esa temperatura y ese nivel de imperfección geométrica el tanque tiene una trayectoria inestable y posteriormente sigue tomando levemente más carga térmica con aumento de los desplazamientos. Se observa que el problema de inestabilidad del equilibrio comienza a una temperatura un 9% menor a la temperatura crítica obtenida en el análisis de bifurcación lineal.

En este caso de estudio es posible aplicar el método de Riks ya que la primer forma de modo corresponde a pandeo en la pared del tanque y entonces el método permite seguir la trayectoria de equilibrio con desplazamientos en el cilindro, brindando información útil sobre el comportamiento asociado a inestabilidad del equilibrio en el cuerpo del tanque. En los casos donde los primeros modos afectan al techo, este método seguiría trayectorias de equilibrio inestables asociadas al pandeo del techo que no influye necesariamente en la estabilidad de todo el tanque.

Una evaluación de las tensiones circunferenciales (S11) y axiales (S22) a lo largo de la trayectoria de equilibrio se muestra en la Figura 16 para el nodo A, que es el que presenta mayores desplazamientos, y en la Figura 17 se muestra para un nodo C ubicado sobre el meridiano con mayor carga térmica.

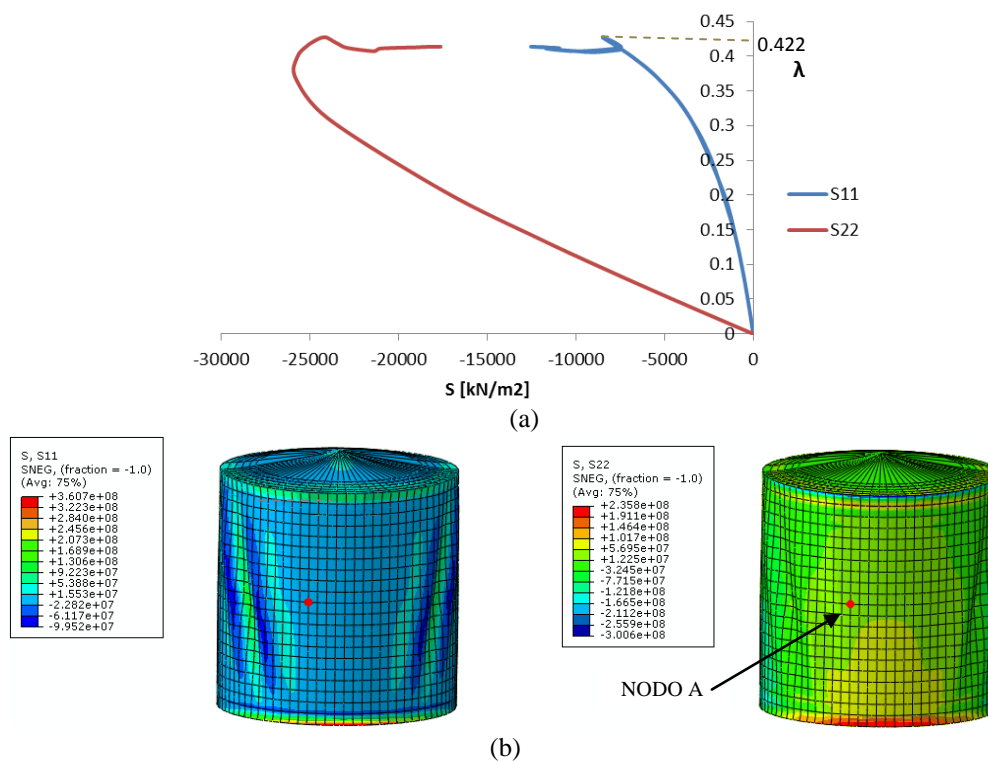


Figura 16: Tensiones circunferenciales (S11) y axiales (S22) para el tanque vacío con llama vertical desde la base en Nodo A, (a) en función de parámetro λ , (b) distribución de tensiones para $\lambda=0.422$

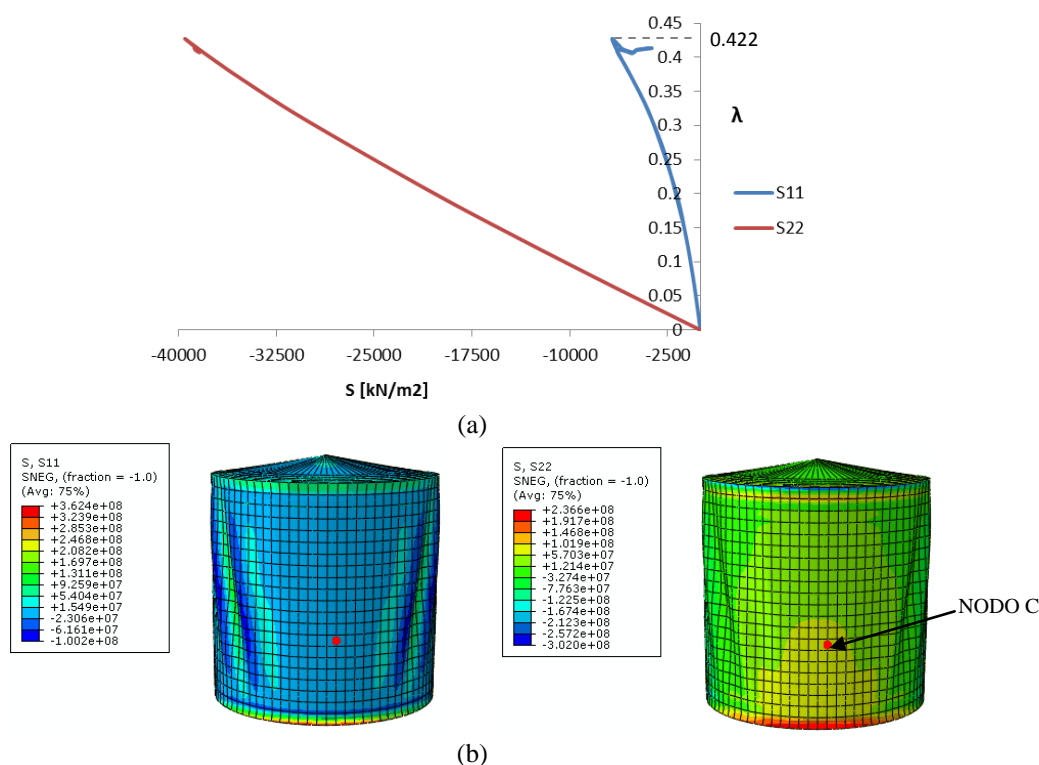


Figura 17: Tensiones circunferenciales (S_{11}) y axiales (S_{22}) para el tanque vacío con llama vertical desde la base en Nodo C, (a) en función de parámetro λ , (b) distribución de tensiones para $\lambda=0.422$

Se puede observar que en el Nodo A y en el Nodo C las tensiones circunferenciales y axiales son de compresión, como en casi toda la zona que enfrenta el fuego, lo que favorece el pandeo. En el nodo con mayores desplazamiento (Nodo A), el mayor valor de tensión axial de compresión se obtiene previamente al llegar al máximo valor del parámetro (etapa precritica).

Las tensiones de compresión que se presentan en gran parte de la cáscara son las responsables del pandeo que se presenta en el cilindro, principalmente las compresiones axiales que presentan el mayor valor. En este estudio no se ha incorporado la variación del módulo de elasticidad del acero por efecto del incremento de la temperatura. Este aspecto será incorporado en trabajos posteriores.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio de la respuesta estructural de un tanque metálico de almacenamiento de petróleo considerando las cargas térmicas provenientes de otro tanque, en situación de incendio, de igual diámetro y separados entre sí un diámetro. Se analiza en particular la influencia de viento, que inclina la llama o la mantiene vertical, y la existencia de fluido en el interior del tanque con nivel variable considerando desde la condición de vacío a tanque lleno. Para el tanque con fuego se evalúan dos posibilidades: que la llama actúe desde la parte superior del tanque o desde el nivel de terreno. Se implementa un análisis de bifurcación lineal (LBA) para estudiar las diferentes combinaciones que pueden presentarse en un mismo evento y posteriormente para el caso más desfavorable se realiza un análisis no lineal geométrico con imperfecciones geométricas (GNIA).

La inclinación de la llama por el viento genera mayores temperaturas en el techo y en la parte superior del tanque, produciendo un pandeo localizado en ese sector a temperaturas relativamente bajas. Ese efecto es mayor si el tanque no contiene fluido en el interior.

Bajo la acción simultánea de viento y cargas térmicas, no existen grandes diferencias en

las temperaturas de inicio de pandeo si la llama actúa desde el nivel del terreno o desde el tope del tanque.

Fuego actuando desde la base del tanque en ausencia de viento produce una llama vertical que genera sobre el tanque en estudio un pandeo global en el cuerpo cilíndrico del tanque en condición de vacío. Esta situación es la más comprometida para la estabilidad del tanque ya que puede conducir al colapso de todo el tanque, aunque no contribuye a la propagación del incendio debido a la ausencia de fluido. La presencia de imperfecciones geométricas en el tanque contribuye a una disminución de la temperatura máxima que resiste el tanque y al inicio de un comportamiento inestable.

En los casos estudiados, una llama vertical actuando desde el tope del tanque no produce pandeo para ninguna condición de fluido interior.

La presencia de fluido es estabilizante en todos los casos estudiados, ya que las temperaturas críticas son mayores a las correspondientes a tanque vacío y además los daños se concentran en la parte superior del tanque o en el techo.

Todos estos escenarios pueden presentarse en un mismo evento de incendio, y la diferente respuesta observada puede contribuir a una explicación sobre la propagación del incendio y las posibles estrategias de atenuación del mismo.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Comahue por el apoyo para esta investigación.

REFERENCIAS

- ABAQUS. *Simulia. Unified FEA*. Dassault Systemes. Warwick, Rhode Island. USA, 2006
- API 650. Welded steel tanks for oil storage. *American Petroleum Institute*, 2010.
- Burgos, C., Batista Abreu, J., Calabró, D., Jaca, R.C. and Godoy, L.A., Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of Simplified modelling of de roof and wind girder. *Thin Walled Structures*, 91:29-37, 2015.
- Calabró, D., Godoy, L.A. and Jaca, R.C., Inestabilidad de tanques de almacenamiento de petróleo con techo cónico durante un incendio. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 11(1):7-28, 2014.
- Chang, J.I. and Lin,Ch., A study of storage tanks accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18:51-59, 2006.
- Da Silva Santos, F. and Landesmann, A., Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire. *Fire Safety Journal*, 69:57-68, 2014.
- Espinosa, S.N. y Jaca, R.C., Transferencia de calor entre tanques de almacenamiento de combustibles expuestos a fuego. En etapa de evaluación, ENIEF 2016.
- Landucci, G., Gubinellia, G., Antonioni and G., Cozzani, V., The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Analysis and Prevention*, 41:1206–1215, 2009.
- Liu, Y., *Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire*. Ph.D. Thesis, Institute for Infrastructure and Environment, University of Edinburgh, Scotland, 2011.
- Nolan, D., *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles, for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*, 3° Edition, Elsevier, 2014.
- 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.

