

COMPORTAMIENTO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO CON TECHO FLOTANTE FRENTE A ACCIONES TÉRMICAS

Horacio D. Calabro ^a, Luis A. Godoy ^b y Rossana C. Jaca ^c

^aIngeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina,
daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar.

^bInstituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, IDIT CONICET-UNC, Y FCEFyN,
Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

^cGrupo de Métodos Numéricos y Experimentales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del
Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar.

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

Resumen. En este trabajo se presentan modelaciones de la incidencia de la carga térmica en tanques abiertos con anillo rigidizador, simplificado mediante un área equivalente a diferentes altura. Adicionalmente se muestran resultados de tanques con techo cónico en los casos donde las elevadas temperaturas generan una presión interna tan elevada que el techo se despega del cuerpo del tanque, quedando una estructura sin techo. En el estudio se emplea la metodología de elementos finitos utilizando el programa para propósitos específicos ABAQUS. Se realizan análisis de bifurcación lineal (LBA). Se estudia la incidencia de anillos rigidizadores a distintas alturas de un tanque abierto y en un tanque con techo cónico antes y después del despego del techo, tal como los que se colocan para reforzar la estructura frente a viento y frente a presión interna.

1 INTRODUCCION

Los tanques de almacenamiento de petróleo u otros líquidos combustibles son estructuras cilíndricas que cuando se encuentran solicitadas frente a acciones térmicas presentan grandes deformaciones.

Los eventos de incendios ocurridos en yacimientos petrolíferos, donde se encuentran las granjas de tanques de almacenamiento, han generado la necesidad de conocer la respuesta de estas estructuras frente a la acción de fuego. Han ocurrido casos emblemáticos como el de Buncefield, Inglaterra en 2005 (Buncefield, 2008) y en Bayamón, Puerto Rico en 2009 (Batista Abreu y Godoy, 2011) y más recientes en Rio de Janeiro, Brasil 2013, La Plata, Argentina 2013 y Malargüe, Argentina 2014. Conocer estas respuestas posibilita generar diseños más estables para estos estados de carga, pero adicionalmente es necesario este conocimiento para deslindar responsabilidades con posterioridad a un accidente. Por esto es de interés comprender el comportamiento estructural y térmico de tanques de almacenamiento de hidrocarburo frente a incendios en diferentes condiciones.

Generalmente los yacimientos tienen dos tipologías de tanques, los abiertos con techo flotante y los cerrados con techo cónico. Los primeros habitualmente tienen una relación R/H mayor, los segundos son más esbeltos.

Los tanques abiertos en su parte superior en general tienen un anillo rigidizador (denominado wind girder en inglés) que da estabilidad a la parte superior de la cáscara; de otra forma la cáscara es demasiado flexible y padea bajo cargas pequeñas. El efecto estabilizador del anillo superior ha sido considerado por Schmidt et al. (1998), Zhao y Lin (2014) y se diseña para cargas de viento. Otros autores (Chen y Rotter, 2012) ignoran el efecto del anillo superior.

Los tanques cerrados en su parte superior pueden tener un techo fijo con forma de domo, techo plano o techo cónico; en los dos últimos casos generalmente no son techos auto-soportados, por lo que se les agrega una estructura formada por anillos y vigas (denominadas rafters en inglés) que se apoyan en columnas. Debido a que existen anillos, los rafters apoyan en ellos y su número depende del nivel de apoyo que se precise dar a la estructura.

La literatura sobre comportamiento y diseño de estructuras de acero bajo fuego se concentra principalmente en el comportamiento de estructuras de pórticos formadas por vigas y columnas. Sin embargo, ese comportamiento es muy diferente al de estructuras de cáscaras, que tienden a fallar con cambio de forma (fenómeno de pandeo) aun antes de que se agote la capacidad del material. Liu (2011), llevó a cabo una exploración para fuego equivalente a la de tanques bajo viento, consideró en detalle la transferencia de calor entre la fuente (un fuego externo adyacente que transfiere calor a través del aire) y un tanque, llegando a representar la distribución de temperatura sobre la pared del tanque.

El objetivo de este trabajo es poder determinar la influencia de anillos rigidizadores en los tanques abiertos a diferentes alturas y qué influencia genera en tanques cerrados con techo cónico, en la zona superior del tanque.

En relación a los resultados obtenidos, todos están asociados al uso de campos térmicos cuya obtención se presenta en otro trabajo enviado a este Congreso (Espinosa y Jaca, 2016), por lo que su validez debe ser determinada en la revisión de dicho trabajo.

2 GEOMETRIAS ESTUDIADAS

Las geometrías estudiadas surgen de una selección de tipologías estructurales para analizar dos tipos de tanque con particularidades geométricas bien diferenciadas donde la relación R/H entre el radio R y la altura H del cilindro del tanque caracteriza la esbeltez de la estructura.

Para los análisis se considera un acero A36 con un módulo de elasticidad de 209.85 GPa y un módulo de Poisson de 0.3.

Habitualmente en zonas donde el efecto del viento es considerable, los tanques se diseñan con anillos rigidizadores en la parte superior. La norma británica BS 2654 (1997) y la API 650 (2010) establecen la misma expresión para calcular el módulo resistente mínimo (Z) del rigidizador, en cm^3 , basado en una expresión empírica y que puede ser fácilmente aplicada en el diseño, dada por la Ecuación (1)

$$Z = \frac{D^2 H_2}{17} \tag{1}$$

donde D es el diámetro del tanque y H_2 la altura del tanque. Esta expresión corresponde a una velocidad de viento de 190 km/h, y para velocidades diferentes se debe afectar por el factor $(V/190)^2$. En este caso se tomó una velocidad de 165 km/h correspondiente a velocidades de la zona patagónica norte, resultando un módulo resistente mínimo requerido de 723cm^3 .

2.1 Tanque con Techo Flotante

La geometría del tanque con techo flotante fue tomada de un tanque localizado en una planta de Chalmette Murphy Meraux, Louisiana, Estados Unidos. Tiene un radio $R= 18.95\text{m}$, una altura $H= 9.47\text{m}$ y una relación $R/H=2.00$. El tanque fue calculado con la norma API 650 (2010), presenta un anillo rigidizador en la parte superior, las virolas son de 1.5m de alto, tienen un espesor las primeras dos virolas inferiores de 12.7mm y las cinco virolas superiores restantes 9.5mm. En la Figura 1 se detallan las características consideradas en este modelo.

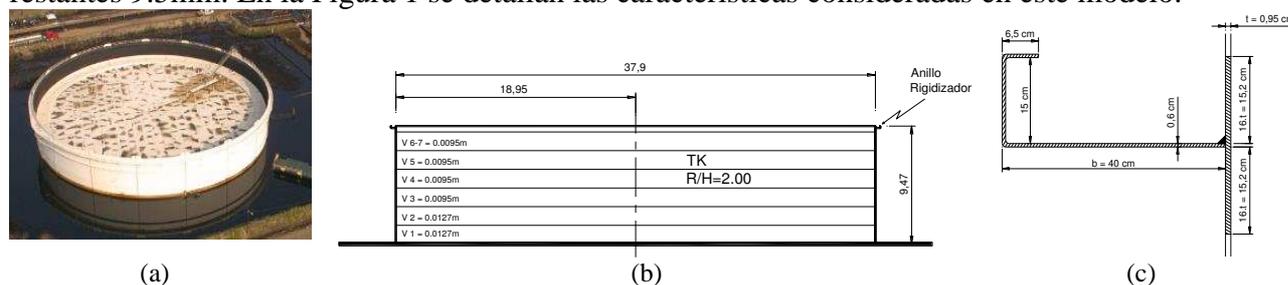


Figura 1: Geometría con Techo Flotante. (a) Chalmette Murphy Meraux, Estados Unidos, (b) Detalle geométrico y (c) Detalle del Anillo rigidizador

Esta estructura fue estudiada considerando una sección equivalente del anillo rigidizador, estudiada por (Burgos et al., 2015), como se muestra en la Figura 2.

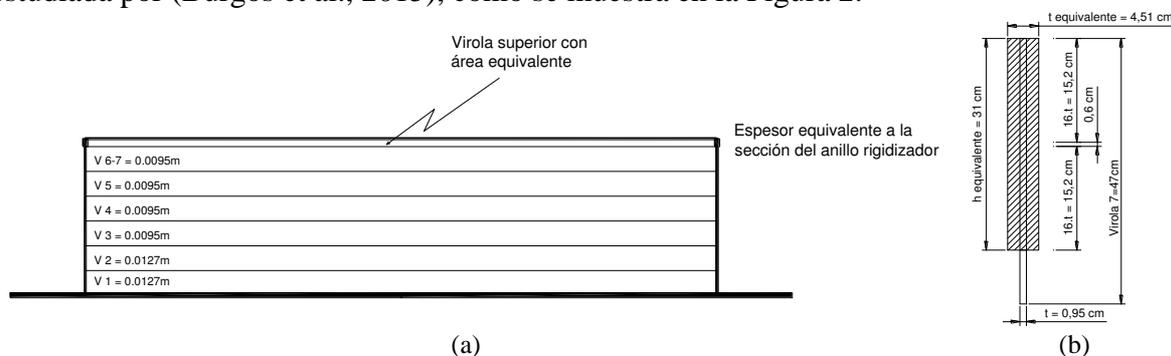


Figura 2: Modelo simplificado con área equivalente al anillo rigidizador en la virola superior del casco cónico (MSE), (a) Vista general, (b) Área equivalente.

2.2 Tanque con Techo Cónico

La geometría del tanque con techo cónico fue tomada de una planta localizada en la isla de Guam, en el Océano Pacífico. Tiene un radio $R= 5.72\text{m}$, una altura en el cuerpo $H_c= 11.44\text{m}$, altura en el techo $H_t=1.4\text{m}$ y una relación $R/H_c=0.50$. El tanque fue calculado con la norma API 650 (2010) y presenta un Anillo Rigidizador en la parte superior, las virolas son de 1.5m de alto con un espesor de 6mm .

Para el techo se adopta un espesor de tres veces el mayor espesor de virola, intentando representar el aporte de rigidez que da la estructura interna de vigas y columnas de soporte del techo cónico (Godoy y Batista-Abreu, 2012).

Cuando la presión interna en el tanque es elevada y la junta entre el cuerpo y el techo es frangible, el techo se despegga del cuerpo comenzando a comportarse como un tanque abierto de altura $H_c= 11.44\text{ m}$ con anillo rigidizador.

En la Figura 3 se muestran dos casos donde el techo se desprendió del cuerpo del tanque, posiblemente debido a un exceso de presión interna de los gases, quedando una estructura abierta en la parte superior.



Figura 3: Tanques con Techo desprendido. (a) India 2016 y (b) Samoa 2016

En la Figura 4 se detallan las características consideradas en este modelo, cuando el tanque está inalterado y luego del desprendimiento del techo. También se muestran los detalles geométricos del anillo calculado para este caso.

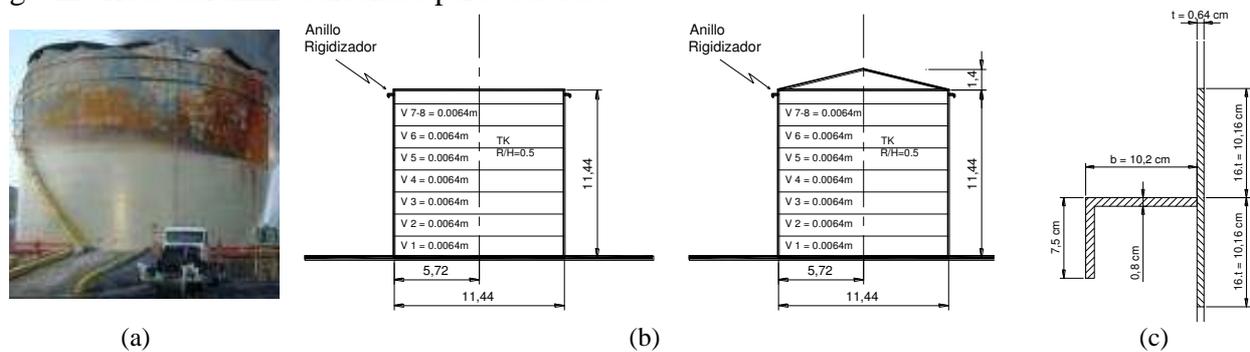


Figura 4: Geometría con Techo Cónico. (a) Guam, USA, (b) Detalle geométrico y (c) Detalle Anillo Rigidizador

3 ESTADOS DE CARGA

El estado de carga estudiado es la carga térmica derivada de eventos de incendio sobre tanques vecinos. En la Figura 5 se muestra este estado de carga en los dos tanques de estudio.

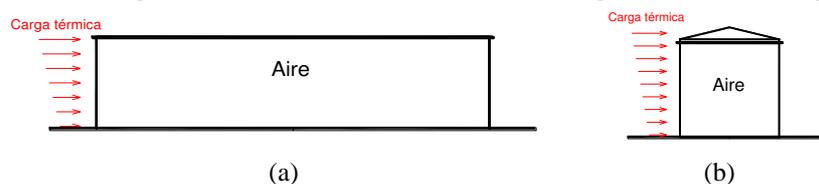


Figura 5: Estados de carga. (a) Tanque con techo flotante con carga térmica, (b) Tanque con techo cónico con carga térmica

El campo de temperatura sobre el área del tanque fue determinado mediante un análisis de transferencia de calor (Espinosa y Jaca, 2016). En la simulación se consideran dos tanques idénticos separados un diámetro entre sí (entre caras exteriores), representando el tanque donde se origina la llama, identificado como tanque fuente, y el tanque objetivo que recibe la radiación. Se supone que la llama se produce por combustión de gasolina. Se realiza una modelación de la llama, en una primera etapa, y posteriormente se implementa un modelo de transferencia de calor que permite obtener las temperaturas en el tanque en estudio, para llevar a cabo el análisis estructural. En dicho trabajo se considera 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. Como situación más desfavorable se concluye que resulta la de fuego actuando desde la base del tanque en ausencia de viento que produce una llama vertical y un tanque sin fluido en el interior.

En este trabajo el campo de temperatura considerado es el que corresponde a la situación de incendio descripta anteriormente y se aproxima por una variación del tipo coseno cuadrado sobre el radio del tanque, lineal en altura sobre el cuerpo y cúbica sobre la altura en el techo. Esto se muestra en la Figura 6.

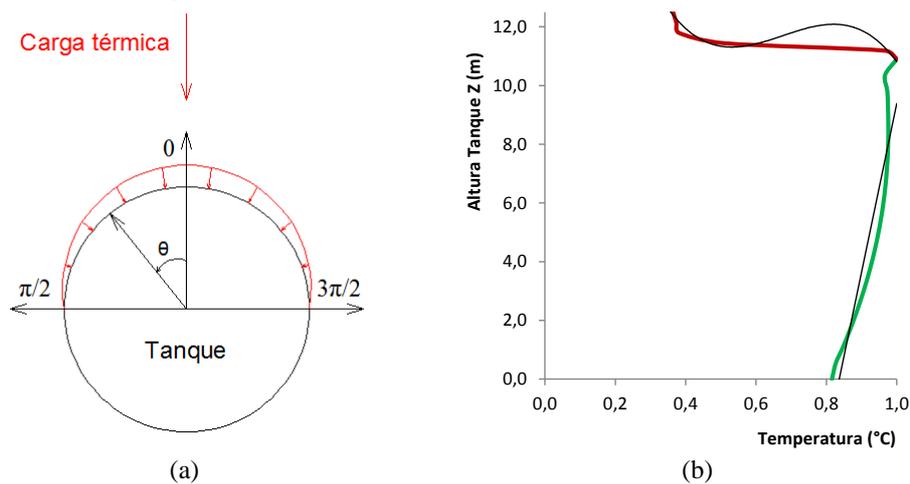


Figura 6: Geometría con Techo Cónico. (a) Distribución en Planta,(b) Distribución en Altura

En la Ecuación 2 se detalla analíticamente el campo térmico utilizado en los modelos computacionales.

$$T(\theta, z) = \begin{cases} \cos^2 \theta.(0.015 z + 0.085), & 0 \leq z \leq 11.44\text{m}, -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ \cos^2 \theta.(-0.025 z^3 + 1.23z^2 - 18.8z + 92.8), & 11.44\text{m} < z \leq 12.84\text{m}, -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & 0\text{m} < z \leq 12.84\text{m}, \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq -\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2)$$

A modo de comparación con un trabajo realizado anteriormente por (Calabro et al., 2014), se considera para cada tipología de tanque estudiada mediante una distribución térmica con variación constante en altura y coseno cuadrado en sentido circunferencial.

4 MODELOS

Las modelaciones se realizan usando la técnica de elementos finitos con el programa

computacional de propósitos generales ABAQUS (2006).

En la discretización se utilizan dos tipos de elementos. En el tanque con techo flotante y anillo rigidizador en la parte superior del casco, se utiliza un elemento cuadrilátero parabólico S8R5. En el casco cilíndrico del tanque con techo cónico se usa un elemento cuadrilátero parabólico S8R5 y en el techo un elemento triangular parabólico STRI65.

El primer modelo estudiado es el caso de un tanque abierto en la parte superior, de relación $R/H= 2.00$, con las características geométricas descritas anteriormente. En este modelo se analiza el caso del tanque con el anillo rigidizador en la parte superior, diseñado según la norma API 650 (2010), a continuación el mismo caso pero en lugar del anillo rigidizador se utiliza una sección equivalente. La siguiente variante de este modelo es colocar la sección equivalente a la mitad de altura del tanque y finalmente se analiza la combinación de la sección equivalente en la parte superior y a mitad de altura del tanque. Estos modelos son mostrados en la Figura 7.

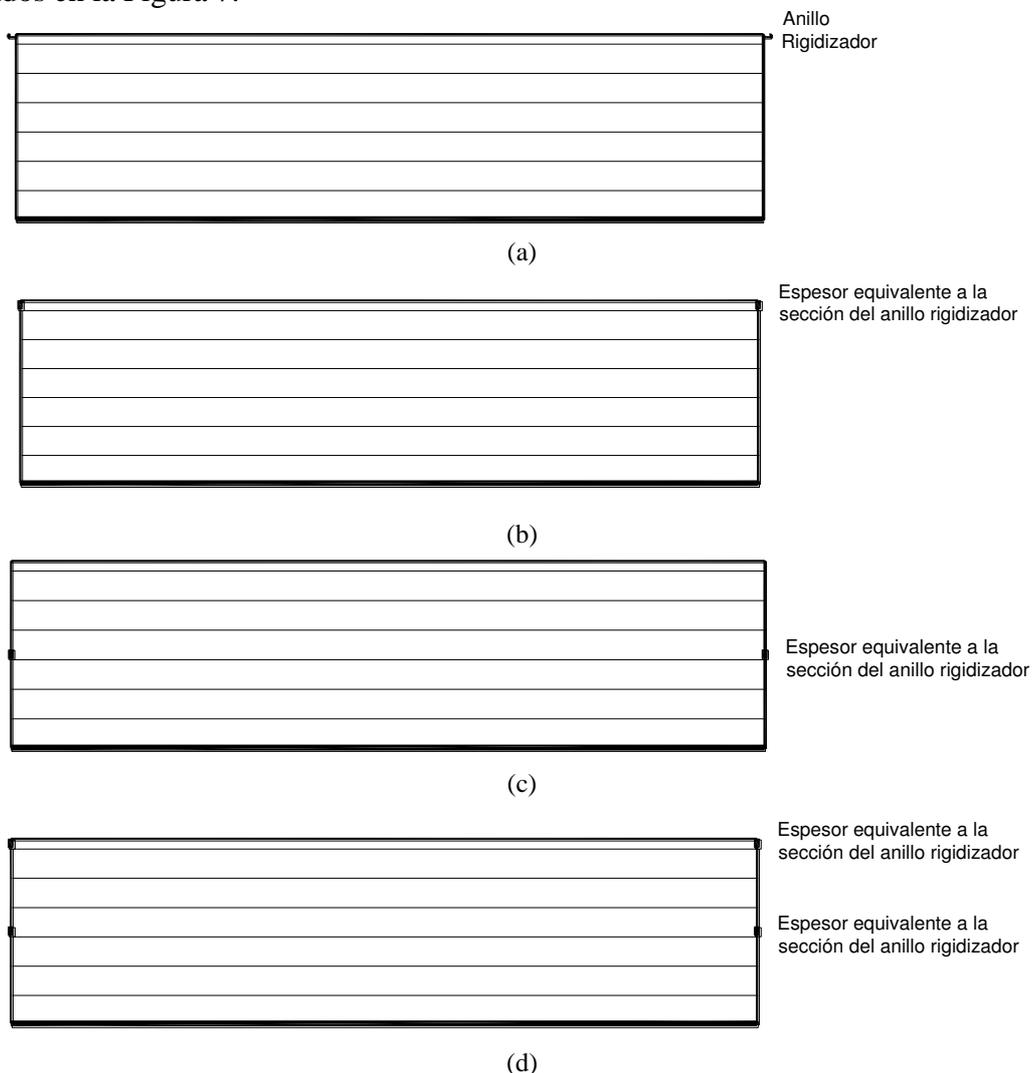


Figura 7: Variantes estudiadas de los Tanque Abierto. (a) Con Anillo Rigidizador en $H=9.47\text{m}$, (b) Con Sección Equivalente $h= H= 9.47\text{m}$, (c) Con Sección Equivalente $h= 1/2H= 4.73\text{m}$ y (d) Con Sección Equivalente $h= H= 9.47\text{m}$, $h= 1/2H= 4.73\text{m}$.

El caso (a) de la Figura 7, se analiza con variación constante y lineal en altura de la carga térmica y el resto de los casos con variación lineal en altura y coseno cuadrado radialmente.

El segundo modelo estudiado es un tanque con techo cónico, de relación de esbeltez $R/H=$

0.5, con los detalles dados en 2.2. Se analizan tres situaciones, la primera es el tanque con techo cónico sin anillo rigidizador la segunda igual pero con anillo rigidizador y por último el tanque sin techo cónico con anillo rigidizador. Estos casos se muestran en la Figura 8.

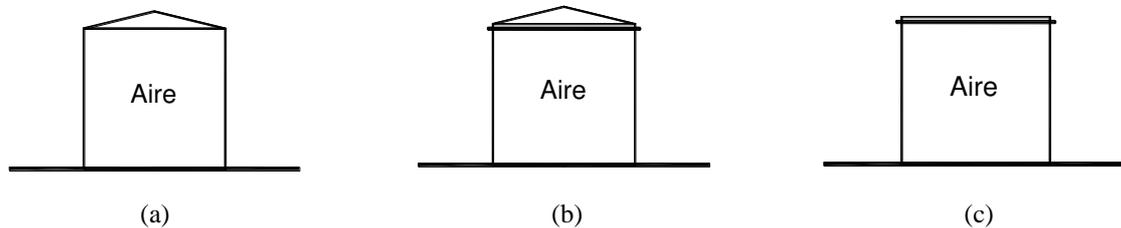


Figura 8: Variantes estudiadas de los tanques cerrados. (a) Tanque con techo cónico, (b) Tanque con techo cónico y anillo rigidizador y (c) Tanque sin techo cónico y anillo rigidizador

El caso (a) de la Figura 8, se analiza con variación constante y lineal en altura de la carga térmica y el resto de los casos con variación lineal en altura y coseno cuadrado radialmente.

5 PANDEO EN TANQUE DE PETROLEO DEBIDO A FUEGO

Una estructura llega al estado de pandeo cuando cambia de forma para poder seguir soportando carga. La carga a la cual cambia de forma se denomina carga crítica y la forma adoptada es el modo crítico asociado. En esta sección se muestran los modos de pandeo térmico para los modelos seleccionados.

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

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

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

Los modos de deformación mostrados en las Figuras 9 a 11 se muestran sin escala, son solo representativas.

5.1 Tanque Abierto, con Anillo Rigidizador en H=9.47m

Se considera para este modelo una carga térmica del tipo coseno cuadrado sobre el radio del tanque y constante en altura y simplemente apoyado en el contacto con el suelo (impedido los tres desplazamiento y libre los giros). Se obtiene una $T_c = 266.9^\circ\text{C}$ con un modo de deformación asociado con simetría respecto a la dirección de incidencia de la carga térmica, localizada en la parte inferior del cuerpo del tanque. Cuando se considera una variación lineal de la distribución térmica en altura la $T_c = 314.03^\circ\text{C}$ y el modo de deformación asociado presenta las mismas características de deformación solo que menos pronunciados, como lo muestra la Figura 9.

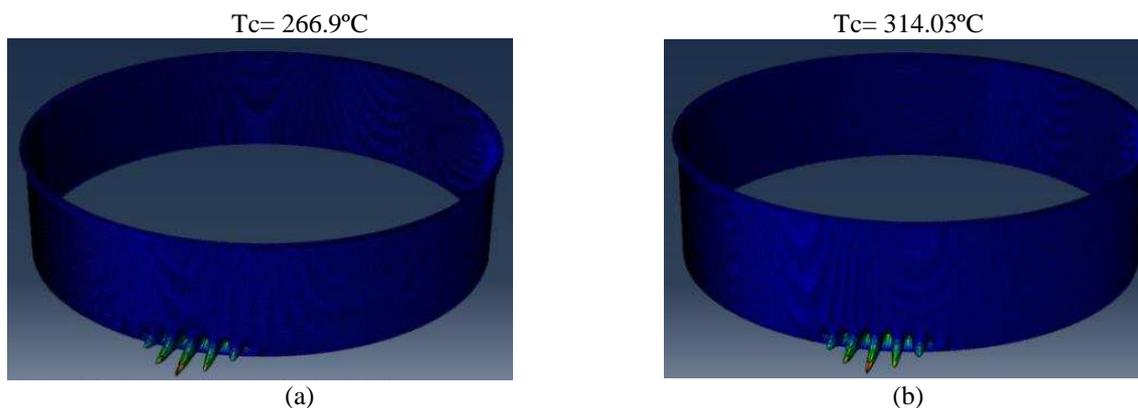


Figura 9: Tanque Abierto, Anillo Rigidizador (AR) en 9.47m. (a) Carga térmica constante en altura y (b) Carga térmica lineal en altura

De los resultados se observa que la ubicación del anillo rigidizador en la parte superior del tanque, le proporciona mayor rigidez a esta zona, favoreciendo que las deformaciones importantes se localicen en la zona inferior.

Por otro lado el uso de un campo térmico con variación lineal en altura, Figura 9 (b), donde la máxima carga térmica se encuentra aplicada en la parte superior del tanque, zona del anillo rigidizador, provoca que la temperatura crítica aumente a 314.03°C, comparando con el caso de distribución de temperatura constante en altura.

5.2 Tanque Abierto, con Sección Equivalente simulando Anillo Rigidizador

En este caso el tanque presenta una sección equivalente al anillo rigidizador simulando su efecto en $h = H = 9.47\text{m}$, como se indicó en la Figura 7 (b), la carga térmica es del tipo coseno cuadrado radialmente y con variación lineal en altura según la Ecuación 2. Las condiciones de vínculo son simplemente apoyado en el contacto con el suelo, obteniendo una temperatura crítica de $T_c = 314.05^\circ\text{C}$. El modo de deformación presenta simetría respecto a la dirección de incidencia de la carga térmica y se encuentra localizada en la parte inferior del cuerpo del tanque. Esto se muestra en la Figura 10 (a).

En una segunda situación se plantea el tanque con una sección equivalente al anillo rigidizador a media altura, $h = 1/2H = 4.73\text{m}$, como lo muestra la Figura 7 (c). La distribución de carga térmica y las condiciones de sustentación son iguales al caso anterior. El modo de deformación asociado que se obtiene es nuevamente localizado en la zona inferior y simétrica respecto a la dirección de incidencia, según se indica en la Figura 10 (b).

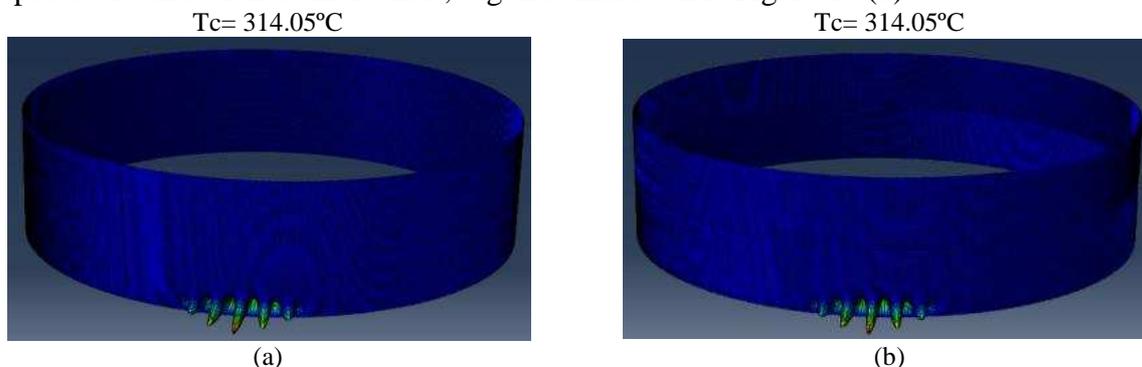


Figura 10: Tanque Abierto, con Sección Equivalente. (a) Sección Equivalente en $h = H = 9.47\text{m}$, (b) Sección Equivalente en $h = H/2 = 4.73\text{m}$ y (c) Sección Equivalente en $h = H = 9.47\text{m}$ y $h = 1/2H = 4.73\text{m}$

Finalmente el último caso analizado es con una sección equivalente al anillo rigidizador en

$h = H = 9.47\text{m}$ y $h = 1/2H = 4.73\text{m}$, según lo detalla la Figura 7 (d). El tanque es estudiado bajo las mismas condiciones de carga y vinculación que los dos casos anteriores. Los resultados muestran que la $T_c = 314.05^\circ\text{C}$ y el modo crítico es igual a los dos casos anteriores, como se muestra en la Figura 11.

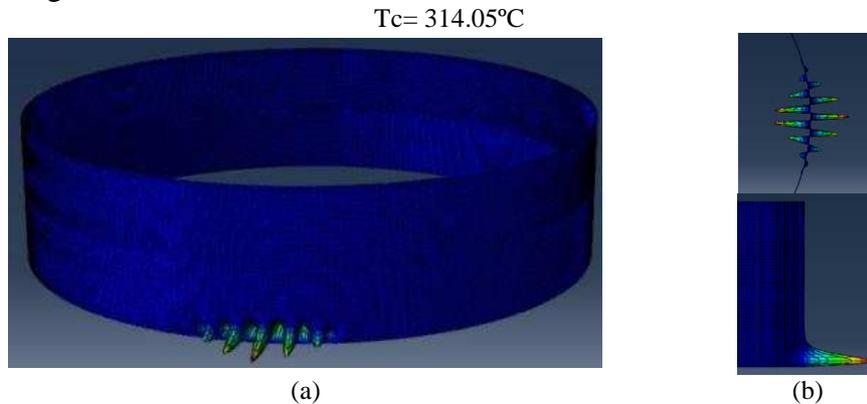


Figura 11: Tanque Abierto, con Sección Equivalente en $h = H = 9.47\text{m}$ y $h = 1/2H = 4.73\text{m}$.
(a) Perspectiva, (b) Detalles en vista superior y lateral de deformación en borde inferior.

Las Figuras 10 y 11 muestran que no hay un cambio significativo en el comportamiento del tanque para la posiciones plateadas de la sección equivalente al anillo rigidizador. Las temperaturas críticas son idénticas para los tres casos de la misma forma que el modo de deformación asociado.

5.3 Tanque con Techo Cónico

En este modelo el tanque no tiene anillo rigidizador, es estudiado con una distribución de carga térmica del tipo coseno cuadrado sobre el radio del tanque y constante en altura. Se encuentra simplemente apoyado en el contacto con el suelo. La temperatura crítica es $T_c = 140,28^\circ\text{C}$ y su modo de deformación asociado son lóbulos inclinados en toda la altura y simétrica respecto a la dirección de incidencia de la carga. Estos resultados se pueden ver en la Figura 11 (a) y (b). Este caso fue estudiado en un trabajo previo por (Calabro et al., 2014).

En una variante de este modelo, el mismo tanque con techo cónico, sin anillo rigidizador se estudió con una carga térmica del tipo coseno cuadrado radialmente, con variación lineal en el cuerpo del tanque y cúbica en el techo según la Ecuación 2, se encuentra vinculada al suelo a través de un vínculo fijo, impedido los tres desplazamiento y libre los giros. De esa manera la $T_c = 159,81^\circ\text{C}$ y su modo de deformación son lóbulos inclinados en toda la altura y simétrica respecto a la dirección de la carga.





Figura 12: Tanque con Techo Cónico. (a) Modo Crítico de Deformación, Temperatura Constante en altura, $T_c = 140,28^\circ\text{C}$, (b) Corte en Planta a 11.43m del piso del modo crítico, (c) Modo Crítico de Deformación, Temperatura Variable en altura, $T_c = 159.81^\circ\text{C}$, (d) Corte en Planta a 11.43m del piso del modo crítico

La variación en la distribución térmica en la altura del tanque de constante a lineal provocó un aumento de la temperatura crítica y los modos de deformación levemente más localizados en la parte superior del cuerpo de tanque para el caso de la distribución lineal. Estos resultados se observan en la Figura 12 (c) y (d).

5.4 Tanque con Techo Cónico y Anillo Rigidizador

En este caso el modelo es un tanque con techo cónico y Anillo Rigidizador en la parte superior del cuerpo, con una carga térmica del tipo coseno cuadrado radialmente y con variación lineal en el cuerpo del tanque y cúbica en el techo según la Ecuación 2, la condición de sustentación es simplemente apoyado en el contacto con el suelo (impedido los tres desplazamientos y libre los giros).

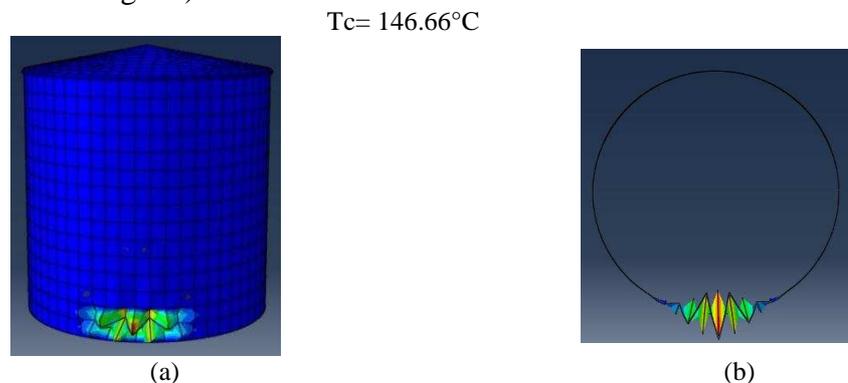


Figura 13: Tanque con Techo Cónico y Anillo Rigidizador. (a) Modo Crítico de Deformación, Temperatura con variación lineal en altura y (b) Corte en Planta a 0.75m del piso del primer modo de deformación

La temperatura a la cual cambia su modo de deformación es a $T_c = 146.66^\circ\text{C}$, este se encuentra localizado en la parte inferior en forma de punta, simétrica respecto a la carga, sin suavidad, como lo muestra la Figura 13.

5.5 Tanque sin Techo Cónico y Anillo Rigidizador

En los eventos de incendio suele ocurrir, en los tanques con junta frangible, que el techo se desprende del cuerpo por la presión interna generada, quedando el tanque abierto en su parte superior.

En este caso se modela un tanque sin techo cónico y anillo rigidizador en la parte superior del cuerpo del tanque, con una carga térmica del tipo coseno cuadrado sobre el eje radial, con

variación lineal en el cuerpo del tanque según la Ecuación 2, la condición de sustentación es simplemente apoyado en el contacto con el suelo (impedido los tres desplazamiento y libre los giros). De esta manera se obtiene una $T_c = 623.31^\circ\text{C}$, con un modo de deformación asociado localizado en la parte inferior en forma de punta, simétrica respecto a la dirección de incidencia de la carga, sin suavidad, como lo muestra la Figura 14.

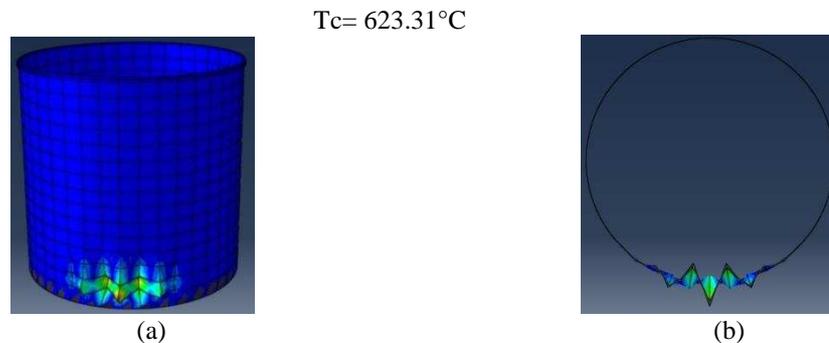


Figura 14: Tanque sin Techo Cónico y Anillo Rigidizador. (a) Modo Crítico de Deformación, Temperatura con variación lineal en altura y (b) Corte en Planta a 1.00m del piso del primer modo de deformación

Los resultados muestran que la incorporación de un anillo rigidizador en este tipo de tanques provoca un aumento significativo de las temperaturas críticas y una localización en la parte inferior de las deformaciones.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado como afecta el posicionamiento de los anillos rigidizadores en estructuras de tanques para una distribución térmica determinada. Se han modelado dos tipos de tanques geoméricamente bien diferenciados por su relación de esbeltez, el primero un tanque abierto con relación $R/H = 2.00$ y el segundo un tanque con techo cónico con una reacción $R/H = 0.50$. En el primer caso se estudió la influencia del anillo en H , $H/2$ y H más $H/2$. En el segundo se analizó el comportamiento del tanque con techo cónico sin anillo y con anillo en la parte superior. Por último se analizó qué ocurre cuando el techo del tanque se despega del cuerpo cilíndrico, quedando una estructura completamente abierta con anillo rigidizador.

En los dos casos de estudio, la carga térmica utilizada es una aproximación a un campo térmico determinado por un análisis de transferencia de calor, para tanques sin fluido, en un trabajo previo (Espinosa y Jaca, 2016).

Los análisis de pandeo para el tanque abierto muestran poca sensibilidad al cambio de posición del anillo rigidizador, en temperatura crítica y modo de deformación asociado. La $T_c = 304.05^\circ\text{C}$ para la tres variantes estudiadas y los modos de deformación se encuentran localizados en la parte inferior del tanque.

En la segunda tipología de tanque, se puede ver un cambio significativo en el modo de deformación. Al incorporar el anillo rigidizador al tanque con techo cónico, los lóbulos de deformación dejan de distribirse en toda la altura del cuerpo del tanque y se localizan en la parte inferior, disminuyendo la temperatura crítica de 159.81°C a 146.66°C . Esto puede deberse a que la incorporación del anillo en la parte superior, genera un aumento de la rigidez en esta zona favoreciendo la localización de la deformación en la parte inferior. Por último el análisis del tanque con el techo desprendido, por algún fenómeno de aumento de presión interna, muestra un aumento de la temperatura crítica a 623.1°C y nuevamente la localización

del modo de deformación en la parte inferior del tanque.

Las deformadas próximas al fondo del tanque tienen como cuestión negativa que las deformaciones se concentran en la zona más problemática del tanque porque si allí hay daño puede haber pérdidas de fluido ya que es la zona donde las presiones hidrostáticas son mayores. Y eso contribuiría a la propagación del incendio.

REFERENCIAS

- ABAQUS. *Simulia. Unified FEA*. Dassault Systemes. Warwick, Rhode Island. USA, 2006
- API 650. Welded steel tanks for oil storage. *American Petroleum Institute*, 2010.
- Batista-Abreu J., Godoy L. A., Investigación de causas de explosiones en una planta de almacenamiento de combustible en Puerto Rico, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 11(2):109-122, 2011.
- Buncefield Major Incident Investigation Board, The Buncefield Incident, 11 December 2005, Final report, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom, 2008.
- Burgos, C., Batista Abreu, J., Calabro, 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.
- Calabro, 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.
- Chen L., Rotter J. M., Buckling of anchored cylindrical shells of uniform thickness under wind load, *Engineering Structures*, 41: 199–208, 2012.
- Espinosa, S.N. y Jaca, R.C., Transferencia de calor entre tanques de almacenamiento de combustibles expuestos a fuego, ENIEF 2016.
- Godoy, L.A., Batista-Abreu, J. Buckling of fixed roof aboveground oil storage tanks under heat induced by an external fire. *Thin Walled Structures*, 52:90-101, 2012.
- Liu, Y., Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire. *Institute for Infrastructure and Environment*, The University of Edinburgh, Scotland, 2011.
- Schmidt H., Binder B., Lange H. Postbuckling strength design of open thin-walled cylindrical tanks under wind load, *Thin-Walled Structures*; 31: 203-220, 1998.
- Zhao, Y. and Lin, Y., Buckling of cylindrical open-topped steel tanks under wind load. *Thin-Walled Structures*, 79: 83-94, 2014.