

ESTABILIDAD ESTRUCTURAL TÉRMICA DE TANQUES DE ACERO DE MEDIANA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO

THERMAL STRUCTURAL STABILITY OF STEEL TANKS WITH MEDIUM OIL STORAGE CAPACITY

Horacio D. Calabró^a, Rossana C. Jaca^a, Luis A. Godoy^b

^a *Grupo de Métodos Numéricos y Experimentales, Universidad Nacional del Comahue, 8300 Neuquén, Argentina, daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar, rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar*

^b *IDIT, CONICET y FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina, luis.godoy@unc.edu.ar*

Palabras clave: Tanques, Fuego, Transferencia de Calor, Pandeo, Diámetro Mediano.

Resumen. Comprender el comportamiento de las estructuras de lámina en eventos de incendio en plantas petroleras, es fundamental para predecir formas de modo y lograr diseños más eficientes. Las baterías tienen tanques con distintos diámetros, alturas y tipos de techos. En este trabajo se modela un tanque de almacenamiento de petróleo de diámetro mediano ($D=17\text{m}$), respecto de los tamaños típicos. Se realizan análisis de pandeo para evaluar las cargas térmicas antes de cambiar su forma y seguir absorbiendo carga térmica. La fuente de calor se toma de un análisis de transferencia de calor resuelto por elementos finitos. Trabajos anteriores fueron realizados por los autores con un tanque con techo cónico más pequeño ($D=11\text{m}$) con llama desde el fondo, separación de un diámetro entre tanques, sin inclinación de la llama y sin fluido, alcanzando una temperatura crítica de 400°C . Este análisis intenta reproducir el comportamiento poscrítico para tanques de diámetro mediano, para diferentes separaciones entre tanques. La comparación con el diámetro de menor tamaño indica que las primeras inestabilidades se producen a menor temperatura para el diámetro mayor.

Keywords: Tanks, Fire, Heat Transfer, Buckling, Medium Diameter.

Abstract. Understanding the behavior of sheet metal structures in fire events at oil refineries is crucial for predicting modes of failure and achieving more efficient designs. Batteries have tanks with different diameters, heights and types of roofs. In this paper, an oil storage tank with a medium diameter ($D=17\text{m}$) compared to typical sizes is modeled. Buckling analyses are conducted to assess the thermal loads the tank can withstand before it deforms and continue absorbing thermal load. The heat source is taken from a previously performed finite element heat transfer analysis. Previous work was conducted by the authors using a smaller tank with a conical roof ($D=11\text{m}$) with a flame originating from the bottom, a diameter separation between tanks, no flame inclination, and no fluid, reaching a critical temperature of 400°C . This analysis aims to replicate the post-critical behavior for medium-diameter tanks, considering different separations between tanks. The comparison with the smaller diameter indicates that the initial instabilities occur at lower temperatures for the larger diameter.

1 INTRODUCCIÓN

Las compañías de ingeniería que desarrollan proyectos de diseño de plantas de tratamiento de hidrocarburo deben definir la ubicación y disposición de cada equipo según el requerimiento del proceso. En particular los tanques de almacenamiento pueden tener distintas características geométricas y disponerse según separaciones establecidas en las normas y características particulares de cada planta, pero estas recomendaciones no incluyen la acción térmica sobre un tanque determinado. Es por esto que frente a la acción térmica originada en un tanque fuente se deben tener en cuenta otras variables que influyen sobre la respuesta de un tanque objetivo. Adicionalmente, se deben considerar otros factores que modifican el comportamiento estructural del tanque objetivo, como el tipo de fluido que se quema, el nivel de fluido almacenado en el interior del tanque objetivo, la localización de la llama en el tanque fuente y la inclinación de la llama por la velocidad del viento.

En los últimos años se han realizado estudios de pandeo térmico de tanques debido a efectos de una llama adyacente (Godoy et al. 2022). Este estudio parte de un análisis detallado de transferencia de calor de la fuente hacia el tanque objetivo realizado por Espinosa et al. (2019), en el que se determinan las temperaturas que se alcanza en el tanque objetivo en base a características de la llama.

La distribución de temperaturas generada sobre un tanque proveniente de otro tanque con fuego fue estudiada por varios autores mediante análisis de transferencia de calor (Liu 2011, Da Silva y Landesmann 2014, Espinosa et al. 2018, 2019, Pantousa 2019). En algunos casos, Liu (2011), Liu et al. 2012, Jaca et al. (2016, 2018, 2020) realizaron estudios numéricos de pandeo térmico para evaluar el comportamiento estructural mediante un enfoque secuencial.

En este trabajo se realiza una evaluación estructural sobre un tanque de diámetro 17m mediante un análisis secuencial proveniente de un estudio de transferencia de calor realizado por Espinosa et al. (2019).

2 GEOMETRIA Y MATERIALES

En este trabajo se analiza la respuesta estructural de un tanque de almacenamiento de hidrocarburo afectado por una carga térmica originada en un tanque vecino (fuente). En la Figura 1 se muestra el modelo geométrico analizado, donde se indica que la separación entre tanques es el parámetro que varía en los análisis.

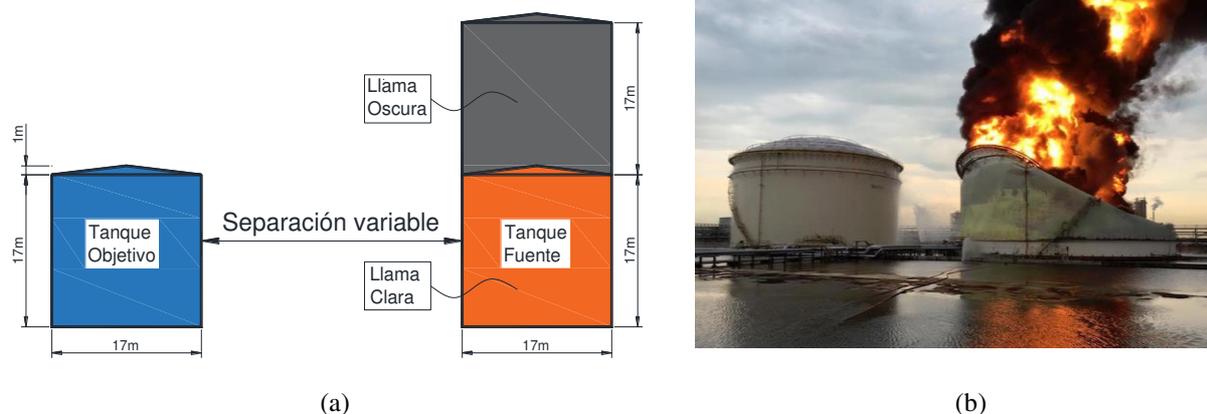


Figura 1. Geometría analizada. (a) Modelo geométrico. (b) Isla de Jurong, Singapur (Abril, 2016)

El tanque en estudio tiene una altura y diámetro de 17.0m, presenta en la parte superior un techo cónico de altura 1.0m. El espesor considerado en el casco cilíndrico es $t = 0.0064\text{m}$ (1/4"). El espesor del techo cónico es considerado a través de una sección equivalente (Burgos

et al. 2015) para contemplar el sistema de vigas estructurales internas, con un espesor de 0.0192m. La estructura se encuentra simplemente apoyada sobre el sistema de fundación. Se utilizó acero A36 con un módulo de Poisson de 0.3, módulo de elasticidad $E=201\text{MPa}$, y coeficiente de dilatación $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$ a 20°C .

3 CASOS DE ESTUDIO

En primera instancia, la carga térmica utilizada se determinó a través de un estudio de transferencia de calor (Espinosa et al. 2019) analizando, la separación entre el tanque que provoca la carga térmica (CT) producto de estar en estado de incendio y el tanque de estudio (objetivo). Los casos de separación analizados entre tanques 1D, 1.5D, 2D y Reglamentaria (0.33D) se muestran en la Tabla 1, resaltando el caso de comparación, tanque en condición vacío, sin viento y a un diámetro de separación (TK-1D-V).

Separación entre tanques	
1 D	Tk-1D-V-17
0.33D	Tk-R-V-17
1.5 D	Tk-1.5D-V-17
2 D	Tk-2D-V-17

Tabla 1: Casos de estudio

En la Figura 2 se indican las distancias variables entre tanques se consideró la separación de 0.33 diámetros (distancia reglamentaria), 1 diámetro, 1.5 diámetros, y 2 diámetros.

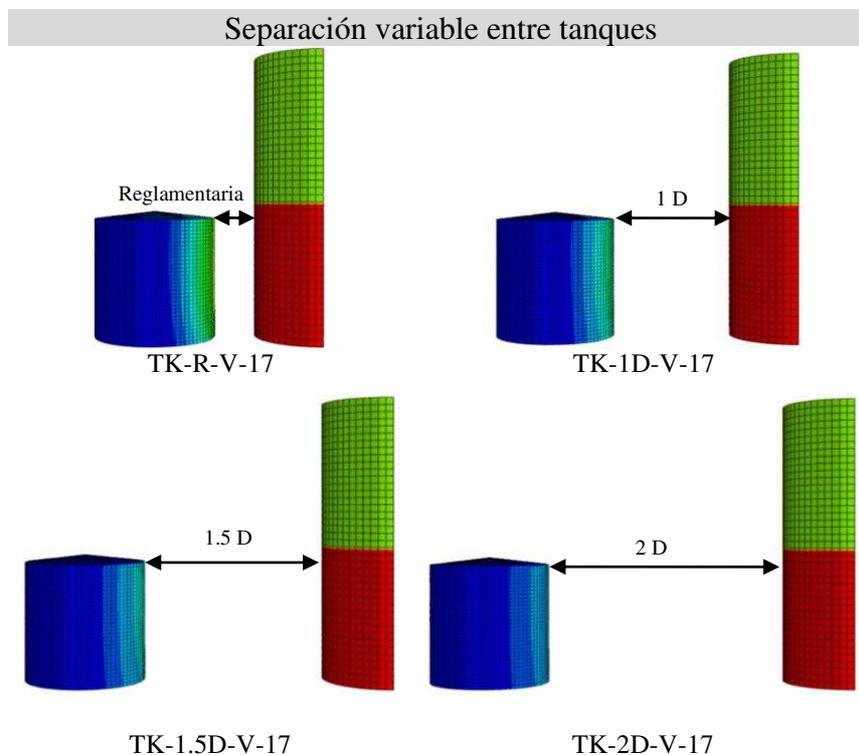


Figura 2: Escenarios de estudio

4 ESTADO DE CARGA

Para estos análisis solo se considera como estado de carga el campo térmico, dado

inicialmente por el análisis de transferencia de calor desde otro tanque vecino en estado de incendio. En la Figura 3 se muestra el campo térmico utilizado en cada caso mencionado.

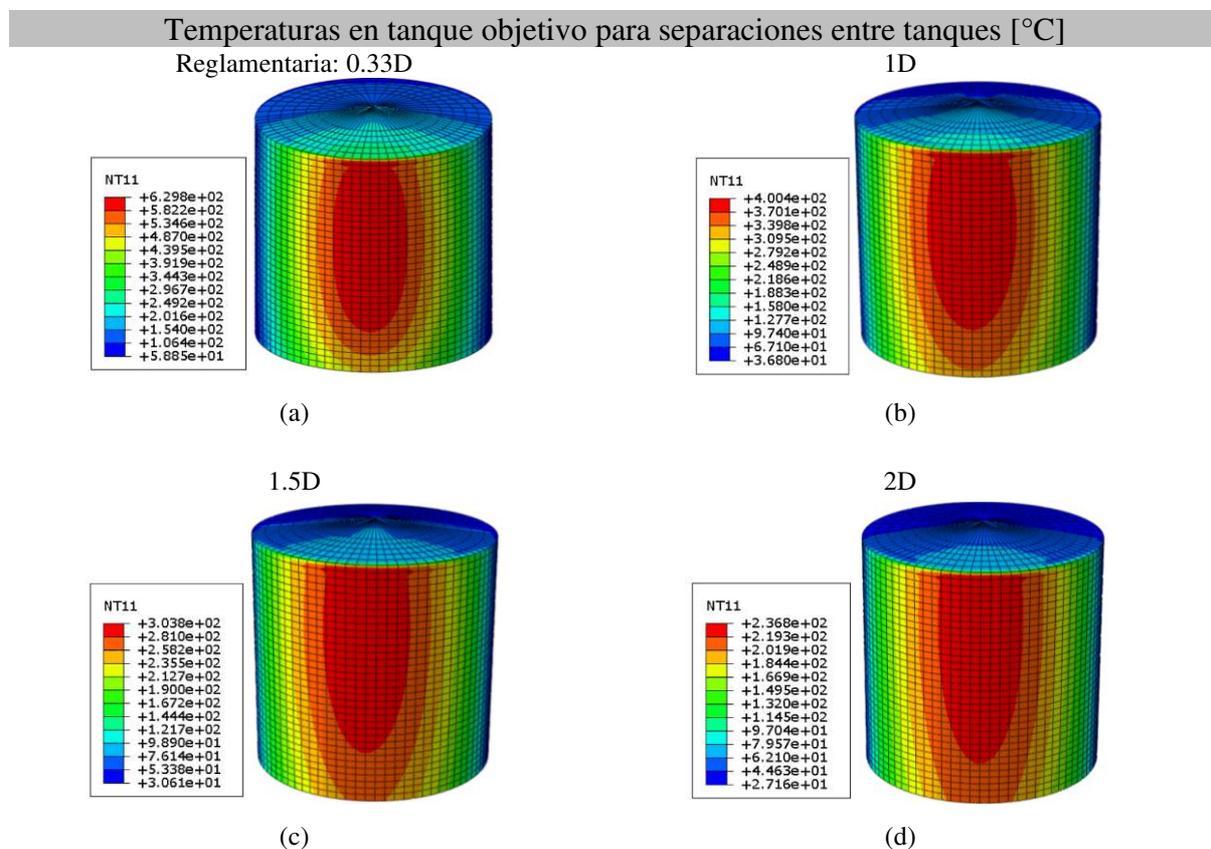


Figura 3: Distribución de temperaturas en [°C] en la superficie del tanque objetivo, para los escenarios considerados. Las zonas de temperatura máxima se indican en rojo y las de mínima en azul.

Las temperaturas máximas obtenidas por el análisis de transferencia de calor para cada caso de estudio se resumen en la Tabla 2.

Separación entre Tanques	Tmax [°C]
Reglamentaria – 0.33 D	629
1 D	400
1.5 D	303
2 D	236

Tabla 2: Temperaturas máximas según la separación entre tanques

5 MODELACION NUMERICA

El tanque objetivo fue modelado por elementos finitos mediante el código de propósitos múltiples ABAQUS (2006), usando elementos de cáscara (STR165 y S8R5) de seis y ocho nodos respectivamente, con una aproximación cuadrática de los desplazamientos nodales. El trabajo se plantea en forma secuencial en función del campo de temperatura obtenido mediante un análisis no acoplado de transferencia de calor. 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. Sobre este tanque se realizó un estudio de transferencia de calor para las separaciones de tanques planteadas (Espinosa et al., 2019).

Se utiliza para este análisis la técnica del análisis de pandeo lineal para cada caso de estudio (separación Reglamentaria-0.33D, 1D, 1.5D, 2D) llegando a una instancia precrítica del comportamiento térmico estructural. Mediante la metodología del amortiguamiento artificial se analiza el comportamiento poscrítico para el caso que tiene una separación de un diámetro (1D) entre tanques objetivo y fuente.

Cuando la respuesta precrítica es aproximadamente lineal se puede hacer un análisis lineal elástico para estimar el valor de la carga crítica. El programa ABAQUS (2006) permite estimar el pandeo elástico definiendo un paso de Buckle, para la obtención de autovalores, LBA (Linear Buckling Analysis). 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 Ec.1.

$$(K_0 + \lambda_i \cdot K_G) \Phi_i = 0 \quad (1)$$

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).

La temperatura crítica T_c se calcula en función de la temperatura máxima hallada para la distribución de temperaturas y del parámetro crítico (λ_i), dado que se usan las mismas temperaturas nodales encontradas por el análisis de transferencia de calor para el análisis estructural (campo térmico no normalizado), esto se muestra en la Ec. 2

$$T_c = \lambda_i \cdot T_{max} \quad (2)$$

Las condiciones de sustentación de los tanques se supusieron como simplemente apoyadas. En este trabajo se realiza un análisis mediante la metodología de amortiguamiento artificial (ADM), en base a un esquema iterativo incorporando parámetros de control que permiten obtener la respuesta considerando no linealidad geométrica. Se analiza el tanque en condición de vacío y sin viento y separado una distancia de un diámetro del tanque fuente (Tk-1D-V-17) usando el campo térmico obtenido por transferencia de calor mostrado en la Figura 3(b) con una temperatura máxima sobre el tanque objetivo $T_{max}=400^\circ\text{C}$.

Se estimaron diferentes valores de factor de amortiguamiento artificial, incluyendo la opción de estabilización automática y amortiguamiento automático para ajustar el factor de amortiguamiento a través del paso. Se controla el proceso en función de relación entre la energía de estabilización (ALLSD) y la energía de deformación total (ALLIE).

6 ANALISIS Y RESULTADOS

Se comienza con un análisis de pandeo lineal sobre todos los casos y se completa para el caso de comparación (Tk-1D-V-17) con la técnica del amortiguamiento artificial.

6.1 Análisis de pandeo lineal

Se realiza un análisis de pandeo lineal (LBA) para cada separación entre tanques analizada, considerando como estado de carga térmica el originado por el estudio de transferencia de calor. En la Figura 4 se muestran los primeros modos de deformación y el primer autovalor que permite determinar el valor crítico de temperatura, mediante esta técnica.

En la izquierda de cada modo de deformación se resumen en una tabla los valores de los desplazamientos totales y la zona más deformada.

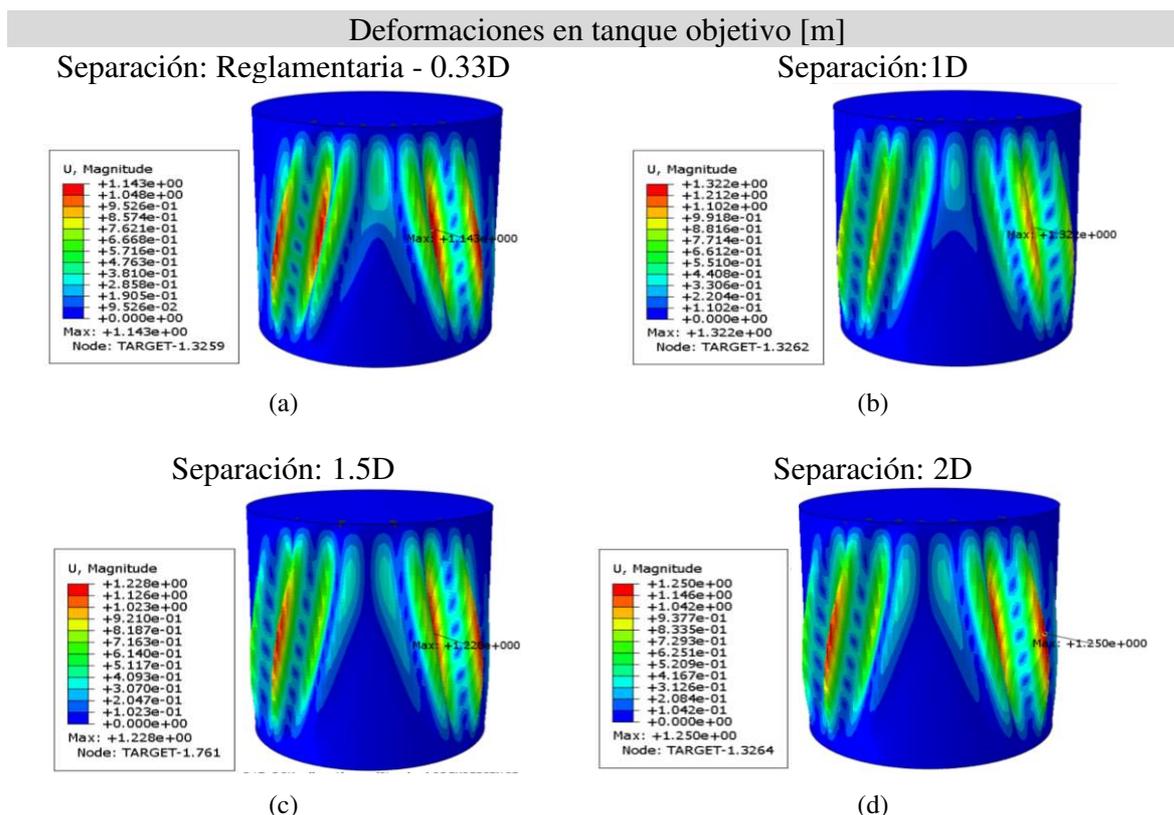


Figura 4. Primer modo de deformación y primer valor crítico por LBA para cada separación entre tanques. (a) Reglamentaria, $T_c=115.29^\circ\text{C}$. (b) 1D, $T_c=121.95^\circ\text{C}$. (c) 1.5D, $T_c=127.86^\circ\text{C}$. (d) 2D, $T_c=133.03^\circ\text{C}$

En la Tabla 3 se muestra un resumen de las temperaturas críticas para cada escenario de estudio.

Separación entre Tanques	Autovalor (λ_c)	Tmax [$^\circ\text{C}$]	Tc [$^\circ\text{C}$]
Reglamentaria – 0.33 D	0.18330	629	115.29
1 D	0.30488	400	121.95
1.5 D	0.42201	303	127.86
2 D	0.56372	236	133.03

Tabla 3: Temperaturas críticas según la separación entre tanques

6.2 Análisis con amortiguamiento artificial

La Figura 5(a) muestra la representación de ambas energías a lo largo de la simulación hasta que las temperaturas alcanzan el estado estacionario. Los saltos observados en ambas curvas corresponden a la activación del amortiguamiento artificial que estabiliza la respuesta y representa la existencia de inestabilidad de equilibrio en algún sector de la cáscara. La Figura 5(b) presenta más detalladamente la energía de estabilización (ALLSD) permitiendo identificar la primera inestabilidad (estado A) y las siguientes, en coincidencia con cada salto en la curva (estados B, C, D y E). En la Figura 5(c) se muestra la variación del cociente de energías ALLSD/ALLIE vs Temperatura. Como forma de control de la metodología la relación ALLSD/ALLIE se mantiene menor a 0.25.

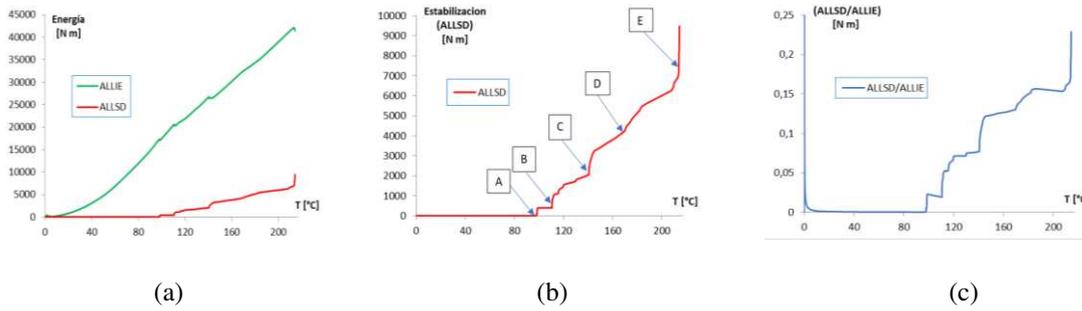


Figura 5: (a) Avance de las Energía Total de Deformación (ALLIE) y Energía de Estabilización (ALLSD) (b) Detalle de la energía ALLSD (c) Evolución del cociente de las energías ALLSD/ALLIE respecto la Temperatura

En la Figura 6(a) se caracteriza el Estado A de la Figura 5(b), mostrando el modo asociado a la primera inestabilidad encontrando deformaciones localizadas en la parte inferior del orden de los 3.5cm para una temperatura de 98°C. La Figura 6(b) representa el Estado B, comienza a ampliarse al cuarto inferior del tanque alcanzando deformaciones de 5.2cm a una temperatura de 110°C. En las Figuras 6(c), (d) y (e) se esquematizan los Estados C, D y E donde los modos de deformación se expanden al centro y progresivamente a todo el tanque llegando a deformaciones de 12.5cm, 15.1cm y 20cm para temperaturas de 140°C, 166°C y 209°C respectivamente.

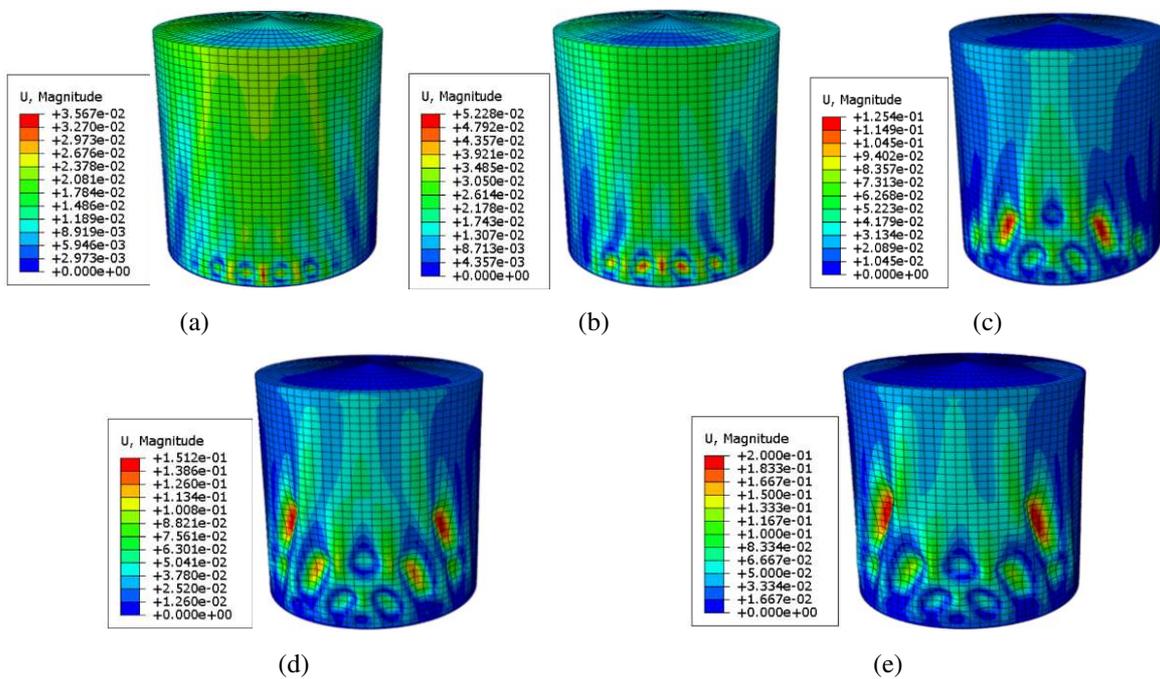


Figura 6: Deformadas Tanque Tk-1D-V-17, (a) Estado A, $T \approx 98^\circ\text{C}$, (b) Estado B, $T \approx 110^\circ\text{C}$, (c) Estado C, $T \approx 140^\circ\text{C}$, (d) Estado D, $T \approx 166^\circ\text{C}$, Estado E, $T \approx 209^\circ\text{C}$.

Para el Nodo A con el mayor desplazamiento a la temperatura crítica encontrada por el análisis de Pandeo Lineal (LBA), se estudia la trayectoria de equilibrio evaluando los desplazamientos versus las temperaturas. En la Figura 7(a) se muestra la trayectoria de equilibrio de la componente de desplazamiento U1 (dirección radial) respecto de la

temperatura. La Figura 7(b) representa la trayectoria de equilibrio de la componente de desplazamiento U total respecto de la temperatura, donde se muestra la primera inestabilidad y las inestabilidades superiores. En cada una de estas figuras se indican la primera ($T \approx 98^\circ\text{C}$) inestabilidad para el Nudo A y las inestabilidades superiores representada por mesetas en la curva ($T \approx 110^\circ\text{C}$, $T \approx 141^\circ\text{C}$, $T \approx 170^\circ\text{C}$, $T \approx 182^\circ\text{C}$ y $T \approx 214^\circ\text{C}$), donde se pone en evidencia incrementos en los desplazamientos sin aumento notable de la temperatura, en coincidencia con los estados A, B, C, D y E de inestabilidad del equilibrio.

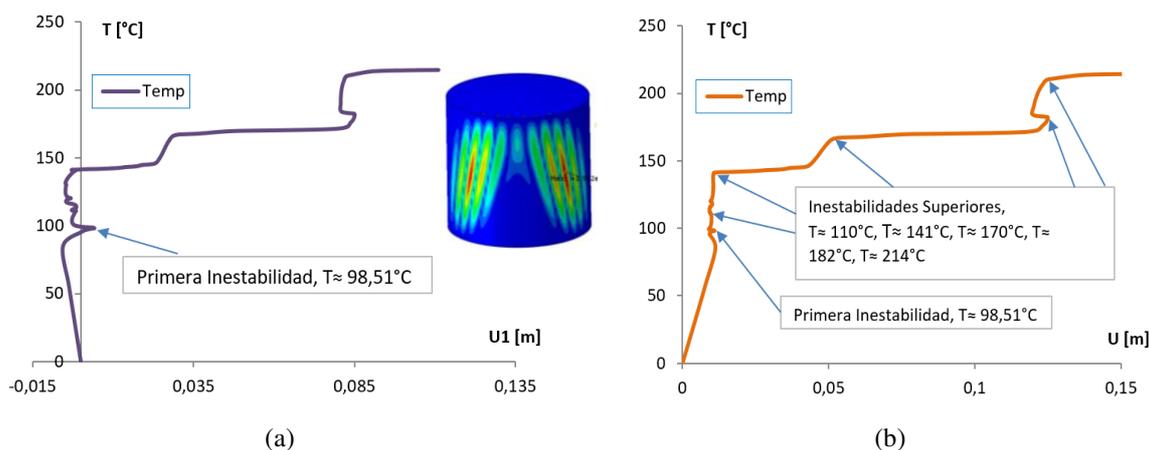


Figura 7: Trayectoria de equilibrio para Nudo A (mayor desplazamiento de LBA). (a) Temperatura vs Desplazamiento principal 1. (b) Temperatura vs Desplazamiento Total.

La Figura 8 presenta la deformada final con indicación de la distribución de temperaturas nodales (NT11) y los desplazamientos nodales (U), evaluados en magnitud en función de sus componentes (U_1 , U_2 , U_3).

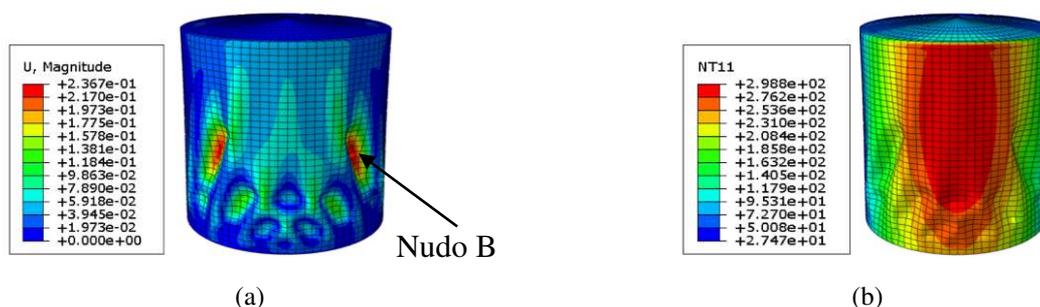


Figura 8: (a) Deformada final para estado estacionario ($T=298^\circ\text{C}$) con escalas de desplazamientos nodales (U , magnitud en m). (b) Temperaturas nodales (NT11, $^\circ\text{C}$), $U_{\text{max}}=230\text{mm}$

6.3 Comparación de análisis ADM con Tanque de $D=11\text{m}$

En trabajos anteriores se realizaron análisis de ADM para un tanque con una geometría similar, pero de diámetro $D=11\text{m}$.

La Figura 9(a) presenta la energía de estabilización (ALLSD), para el tanque de diámetro $D=11\text{m}$, permitiendo identificar la primera inestabilidad (estado A) y las siguientes, en coincidencia con cada salto en la curva (estados B, C, D y E). En la Figura 9(b) se describe la trayectoria de equilibrio para el Nudo A indicado. Para este diámetro se obtuvo la primera inestabilidad a los 124°C , encontrándose inestabilidades superiores a los 175°C , 205°C y

225°C en las zonas de mesetas donde los desplazamientos aumentan sin incremento de temperaturas. El modo de deformación final para el cual se llega al estado estacionario se encontró a los 229°C. donde las deformaciones más importantes se encontraron en la mitad inferior, como se indica en la Figura 9(c).

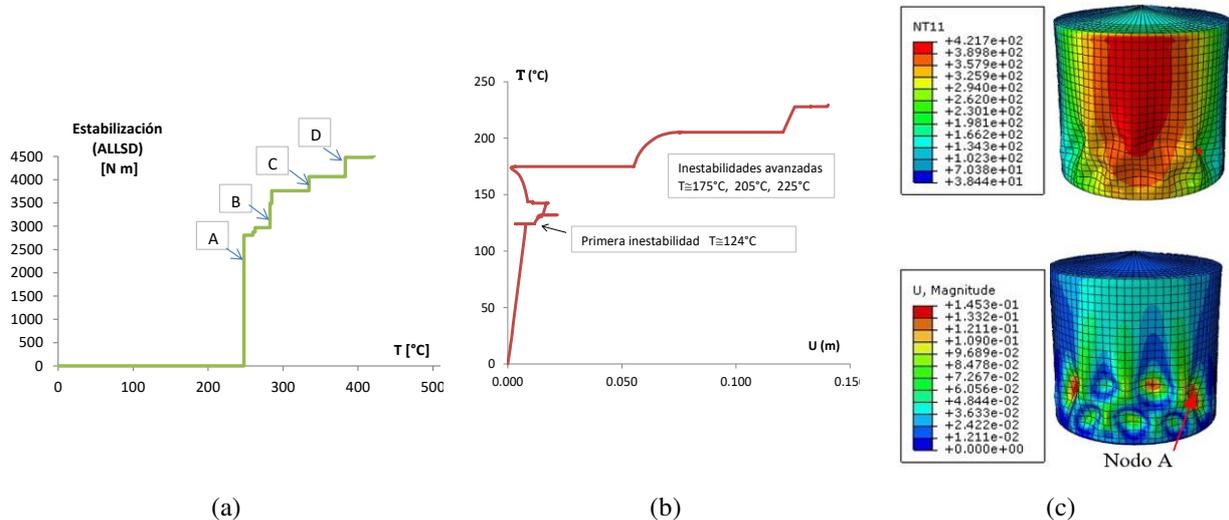


Figura 9: Tanque Tk-1D-V-11: (a) Detalle ALLSD (b) Trayectoria de equilibrio para Nodo A (mayor desplazamiento), (c) Deformada final para estado estacionario ($T=229^{\circ}\text{C}$) con escalas de desplazamientos nodales (U, magnitud en m) y temperaturas nodales (NT11, °C), $U_{\text{max}}=140\text{mm}$.

Al comparar los resultados de la primera inestabilidad en los tanques de diámetro 11m y 17m se observa que en el primer caso se alcanza a una temperatura de 250°C y fue necesario emplear una energía de estabilización (ALLSD) de 2500Nm para continuar el análisis poscrítico y en el segundo caso se alcanzó a los 100°C necesitando usar 500Nm para estabilizar el sistema. El tanque de 11m de diámetro alcanza su primera inestabilidad a una temperatura mucho mayor requiriendo mucha más energía de estabilización.

7 CONCLUSIONES

Se realizó un análisis sobre tanques de almacenamiento de petróleo de diámetro $D=17\text{m}$, mayor a lo estudiado con anterioridad. La variable de estudio que se consideró es la separación entre el tanque fuente y el tanque objetivo. Se consideraron cuatro separaciones de análisis la reglamentaria ($0.33D$), un diámetro ($1D$), un diámetro y medio ($1.5D$) y dos diámetros ($2D$).

En primera instancia se implementó el Análisis de Pandeo Lineal (LBA) para cada escenario de estudio planteado encontrando que la temperatura crítica más elevada se da cuando la separación entre el tanque fuente y objetivo es de dos veces el diámetro, con una $T_c=133.03^{\circ}\text{C}$ y la más baja para el caso de la separación reglamentaria de valor $T_c=115.29^{\circ}\text{C}$. Este comportamiento permite interpretar que, al ser menor la separación entre tanques, se obtiene una temperatura crítica menor ya que la máxima temperatura obtenida por transferencia de calor es mayor. Es decir. la inestabilidad se produce a menor temperatura ya que la carga térmica total recibida es mayor. Por el contrario, se obtienen temperaturas menores en el tanque objetivo cuando la separación entre tanques es más grande conduciendo a una temperatura crítica mayor. Los modos críticos se localizan en la zona de incidencia de la carga térmica con formas similares a lo largo de la altura del tanque en todos los casos analizados.

Para el escenario de separación entre tanques de un diámetro ($1D$) se amplió el análisis por

medio de la metodología de Amortiguamiento Artificial (ADM) llegando a la primera inestabilidad a los 100°C necesitando emplear una Energía de Estabilización (ALLSD) de 500Nm para estabilizar el sistema. Este tipo de análisis permite obtener deformadas que se van extendiendo desde la parte inferior del tanque hacia arriba a medida que aumentan las temperaturas sobre el tanque y que resultan más compatibles con lo observado en situaciones de incendio.

Finalmente se realizó una comparación con los resultados obtenidos por estos autores para el tanque de diámetro de 11m encontrando que este último alcanza su primera inestabilidad a una temperatura mucho mayor (250°C) requiriendo mucha más energía de estabilización (2500Nm). Se puede pensar que la disminución del diámetro del tanque aporta mayor estabilidad al sistema global generando los primeros modos de deformación a temperaturas más altas.

Agradecimientos: Este trabajo fue realizado con subsidios de SCyT de UNComa.

REFERENCIAS

- ABAQUS. Simulia. Unified FEA. Dassault Systemes. Warwick, Rhode Island, USA, 2006.
- Burgos C., Batista-Abreu J., Calabró H., Jaca R., Godoy L., Simplificaciones en el tratamiento computacional de condiciones en la parte superior de tanques de almacenamiento de fluidos, *Thin-Walled Structures* vol. 91, pp. 29-37, 2015.
- Da Silva Santos, F., 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., Jaca R.C., Godoy L.A., Thermal and structural analysis of a fuel storage tank under an adjacent pool fire, *Fire Research*, 2:48, 31-36, 2018.
- Espinosa S.N., Jaca R.C., Godoy L.A., Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank, *J. Loss Prevention in the Process Industry*, 103990, 62:1-12, 2019.
- Godoy L.A., Jaca R.C., Ameijeiras M.P., On buckling of oil storage tanks under nearby explosions and fire, Capítulo 7 en: *Above Ground Storage Tank Oil Spills: Applications and Case Studies*, M. Fingas (Ed.), Elsevier, 199-259, 2022.
- Jaca R., Calabró H., Espinosa S., Influencia del nivel de fluido y viento en la respuesta estructural de un tanque de petróleo en situación de incendio, *Mecánica Computacional*, 34: 163 - 180, 2016.
- Jaca R., Espinosa S., Godoy L.A., Metodologías para trayectorias no lineales geométricas en cáscaras bajo efectos térmicos, *Mecánica Computacional*, 36: 235-244, 2018.
- Jaca R., Godoy L.A., Calabró H., Espinosa S., Thermal post-buckling behavior of oil storage tanks under a nearby fire, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 189: 104289, 2020
- Liu Y., Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire. *Phd Thesis, The University of Edinburgh*, 2011.
- Liu, Y., Chen J.F., Rotter, J.M., Torero, J.T., Ai J., Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire, *Proc. First Int. Conf. on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering*, Hong Kong, 156-165, 2012.
- Pantousa D., Godoy L.A., On the mechanics of thermal buckling of oil storage tanks, *Thin-Walled Structures*, 145, 106432, 2019.