

## COMPORTAMIENTO POSCRITICO DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES BAJO FUEGO

### POST CRITICAL BEHAVIOR OF A FUEL STORAGE TANK UNDER FIRE

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

<sup>a</sup> *Grupo de Métodos Numéricos y Experimentales, Universidad Nacional del Comahue,  
8300 Neuquén, Argentina, [daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar](mailto:daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar),  
[rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar](mailto:rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar), [snespinosa@gmail.com](mailto:snespinosa@gmail.com)*

<sup>b</sup> *IDIT, CONICET y FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina,  
[luis.godoy@unc.edu.ar](mailto:luis.godoy@unc.edu.ar)*

**Palabras clave:** Tanques metálicos, fuego, viento, nivel de combustible, separación, pandeo.

**Resumen.** Los tanques metálicos de almacenamiento de petróleo dispuestos en baterías pueden estar expuestos a accidentes donde el fuego en uno de ellos afecta a los tanques circundantes. La disposición de tanques no sigue reglas fijas. Características como distancia de la llama al tanque considerado, nivel de fluido almacenado, velocidad y dirección de viento, afectan el comportamiento de un tanque. Este trabajo plantea un análisis de la respuesta estructural de un tanque con techo cónico hasta un estado poscrítico avanzado teniendo como amenaza la distribución térmica que recibe de otro tanque con llama actuando desde el piso. Los tanques son modelados usando elementos de cáscaras (ABAQUS) y se realiza análisis no lineal geométrico mediante la metodología de amortiguamiento artificial (ADM), hasta que las temperaturas alcanzan los valores correspondientes al estado estacionario. Se analiza la influencia en la respuesta del nivel de fluido; distancia variable entre tanques y velocidades de viento que van desde cero hasta 45km/h. Los resultados intentan caracterizar la respuesta estructural asociada a valores extremos en los parámetros considerados, no solo de temperaturas críticas sino también de la capacidad poscrítica.

**Keywords:** Metal tanks, fire, wind, fuel level, separation, buckling.

**Abstract.** Metal oil-storage tanks in oil depots may be exposed to fire accidents starting in a tank and extending to the surrounding tanks. The arrangement of tanks does not follow fixed rules, so that variables such as distance from the flame to the target tank, stored fluid level, wind speed and direction, affect the behavior of a tank. This paper presents an analysis of the structural response of a tank with a conical roof up to an advanced post-critical state, under the temperatures from another tank in which the flame acts from ground-level. The tanks are modeled using shell elements (ABAQUS) and a geometric nonlinear analysis is carried out using the artificial damping methodology until temperatures reach a steady-state. The influence of the fluid level, the distance between tanks, and wind speed ranging from zero to 45km/h is analyzed. Interest focuses on extreme values of the parameters considered, not only for critical temperatures but also for post-critical capacity.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los incendios en baterías de tanques de almacenamiento de combustibles son eventos de alto impacto ambiental y socioeconómico. El fuego puede estar limitado a un tanque pero existe una alta probabilidad que se extienda a los tanques circundantes con consecuencias en las estructuras de los tanques y contaminación en el medio ambiente. La propagación de fuego en plantas de la industria petroquímica por efecto dominó es estudiada por diferentes autores (Landucci et al, 2009, Reniers y Cozzani, 2013). Muchos son los factores que influyen en la expansión de un incendio, entre ellos la integridad estructural de los tanques que deben resistir la distribución de temperaturas proveniente de uno o varios tanques con llama. Los códigos API 650 (2013) y NFPA 30 (2012) dan lineamientos para la construcción, diseño y manejo seguro de tanques de almacenamiento de petróleo y derivados para minimizar los riesgos del fuego. Sin embargo, el diseño estructural de tanques de almacenamiento bajo cargas térmicas no es cubierto por los códigos existentes.

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 and Landesmann et al. 2014). Liu (2011) y Pantousa et al. (2018) realizaron estudios numéricos de pandeo térmico para evaluar el comportamiento estructural. La disposición de los tanques dentro de una batería depende de características específicas de cada planta, con lo que aparecen diferentes tipos y dimensiones de tanques, separación entre ellos y ubicación en el conjunto de la batería respecto al tanque fuente. Esto se combina con otros aspectos que influyen en la respuesta estructural como el nivel del fluido almacenado, existencia de viento que inclina la llama, fuego que se presenta desde el nivel de suelo o desde la parte superior del tanque (Espinosa et al. 2018). Todos estos aspectos modifican la distribución de temperaturas que se produce en un tanque en estudio y generan diferentes condiciones de propagación, durante el desarrollo de un incendio.

En este trabajo se realiza un estudio del comportamiento estructural de un tanque metálico con techo cónico extendiendo el análisis más allá de la primera inestabilidad hasta un estado poscrítico avanzado, teniendo como amenaza la distribución térmica que se produce por otro tanque de iguales dimensiones con llama actuando desde el piso. Trabajos anteriores de los autores (Jaca et al. 2016, 2108) permitieron caracterizar el comportamiento crítico y evaluar el comportamiento poscrítico hasta el estado estacionario de temperaturas mediante la metodología de amortiguamiento artificial (ADM). Se considera la influencia de nivel de fluido, viento actuando en simultáneo con fuego y separaciones variables para establecer rangos de daños en función de los diferentes parámetros.

## 2 CASOS DE ESTUDIO

En este trabajo se consideran dos tanques con techo cónico, de iguales dimensiones, con una separación variable definida en función del diámetro, que ya ha sido estudiado en trabajos anteriores. En uno de los tanques, identificado como *tanque fuente*, se origina la llama, y el otro tanque que recibe la radiación se denomina *tanque objetivo*. El tanque estudiado presenta un diámetro  $D = 11.44\text{m}$ , la altura de la envolvente cilíndrica es  $H = D$  y presenta un techo cónico de altura  $h = 1.40\text{m}$ , resultando una altura total del tanque de  $12.84\text{m}$ . El espesor de la cáscara cilíndrica es  $t = 0.0064\text{m}$  ( $1/4''$ ), diseñado en base a la norma API 650 (2013). El techo presenta el mismo espesor con un conjunto de vigas radiales y circunferenciales que otorgar mayor rigidez a la cáscara cónica, pero estos elementos no se consideran en la modelación y se sustituyen por una cáscara equivalente con un espesor de tres veces el espesor real (Jaca et al., 2017). El material constitutivo del tanque es acero A36 con un módulo de elasticidad

$E=201\text{MPa}$ , coeficiente de dilatación  $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$  a  $20^\circ\text{C}$  y coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$ . Tanto en el análisis térmico como en el estructural se incluyen propiedades del material variables con la temperatura como la conductividad, el calor específico y el módulo  $E$ , como se detalla en los trabajos previos (Jaca et al. 2017). Como condición de apoyo en la base se restringen los desplazamientos.

La simulación se realiza tomando como referencia la respuesta del tanque para una separación entre ambos de un diámetro y llama actuando desde la base del tanque fuente sin contenido de fluido en el interior, ya que trabajos anteriores indicaron que esa posición de la llama es la más desfavorable (Jaca et al., 2016). Se analiza la influencia en la respuesta de la variación del nivel de fluido desde una condición de vacío hasta un nivel cercano a la altura del cilindro; la modificación de la distancia entre tanques desde una separación mínima establecida por normativas hasta una distancia de dos veces el diámetro de los tanques; y velocidades de viento que van desde cero hasta una velocidad de  $45\text{km/h}$ . La Tabla 1 presenta todos los casos analizados considerando como base una separación entre tanques de un diámetro (1D), sin viento y sin fluido en el interior, vacío (V), identificado como **Tk-1D-V**. La Figura 1 muestra los escenarios de estudio y las temperaturas de la llama en conjunto con las cargas térmicas sobre el tanque objetivo.

Inclinación de llama por viento		Separación entre tanques		Nivel de Fluido	
$\theta=0^\circ$	<b>Tk-1D-V</b>	1 D	<b>Tk-1D-V</b>	Vacío	<b>Tk-1D-V</b>
$\theta=30^\circ$	Tk-1D-V-30	0.33D	Tk-R-V	Medio	Tk-1D-M
$\theta=45^\circ$	Tk-1D-V-45	1.5 D	Tk-1.5D-V	Lleno	Tk-1D-LI
$\theta=60^\circ$	Tk-1D-V-60	2 D	Tk-2D-V		
$\theta=68^\circ$	Tk-1D-V-68				

Tabla 1: Nomenclatura de escenarios estudiados.

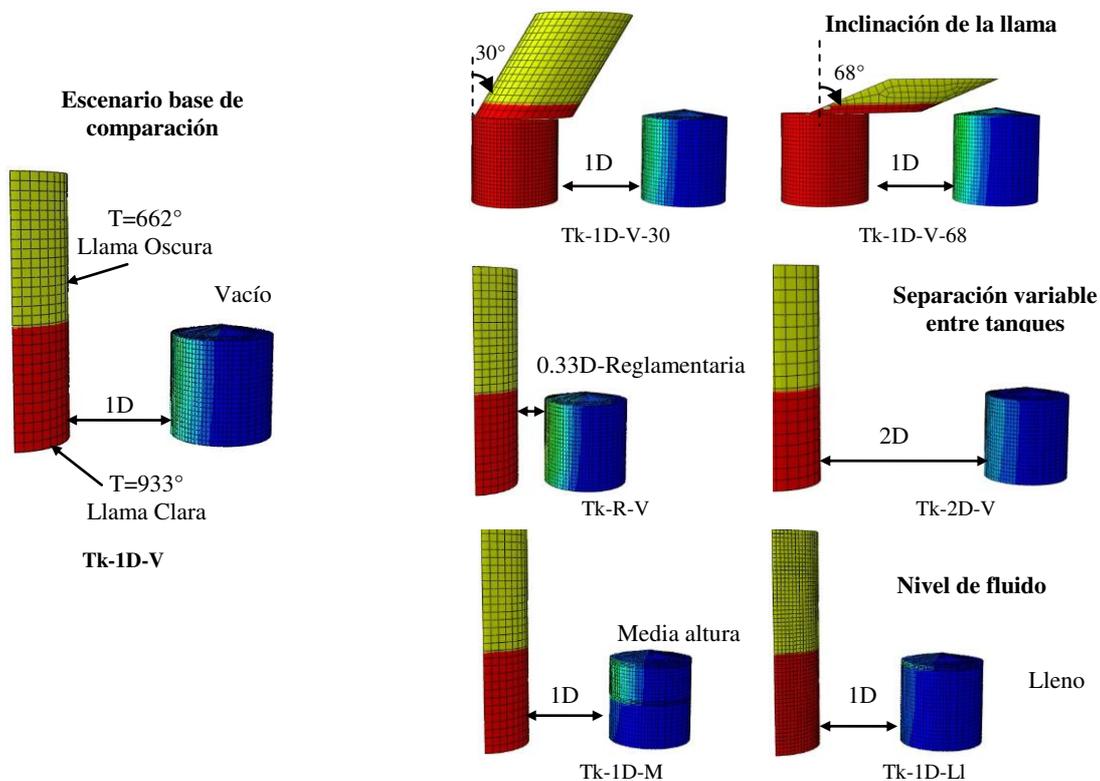


Figura 1: Características de escenarios estudiados.

### 3 ESTADOS DE CARGAS

La distribución de temperaturas actuando sobre el tanque objetivo fue estudiada por los autores en trabajos previos (Espinosa y Jaca 2016, Espinosa et al. 2018), donde se describen los parámetros considerados en el modelo de elementos finitos implementado en ABAQUS para representar la transferencia de calor entre el tanque fuente y el tanque objetivo. Se considera como estado estacionario aquellas temperaturas obtenidas al finalizar el proceso de transferencia de calor. Entre ambos trabajos existen leves diferencias por ajustes en los valores de referencia utilizados. Se tuvo en cuenta la posibilidad de la acción de viento que inclina la llama hacia el tanque objetivo y el fluido en el interior del tanque hasta la mitad de altura o hasta el borde superior adoptando los parámetros correspondientes a gasolina. Ambos aspectos modifican el perfil de temperaturas. En la Figura 2 se muestran las distribuciones de temperatura sobre el tanque objetivo obtenidas con llama con temperatura de 933°C en la parte inferior, identificada como llama clara, y 662°C en la parte superior, denominada llama oscura por la presencia de hollín. Las temperaturas de la llama son las mismas en todas las simulaciones y cambia la inclinación respecto a la vertical asociada a velocidades de viento variables: 0° sin viento, 30° para velocidad de viento de 8.3km/h, 45° para 12.6km/h, 60° para 25.2km/h y 68° para 45km/h. El campo de temperaturas obtenido corresponde al estado estacionario evaluado con el modelo implementado de transferencia de calor.

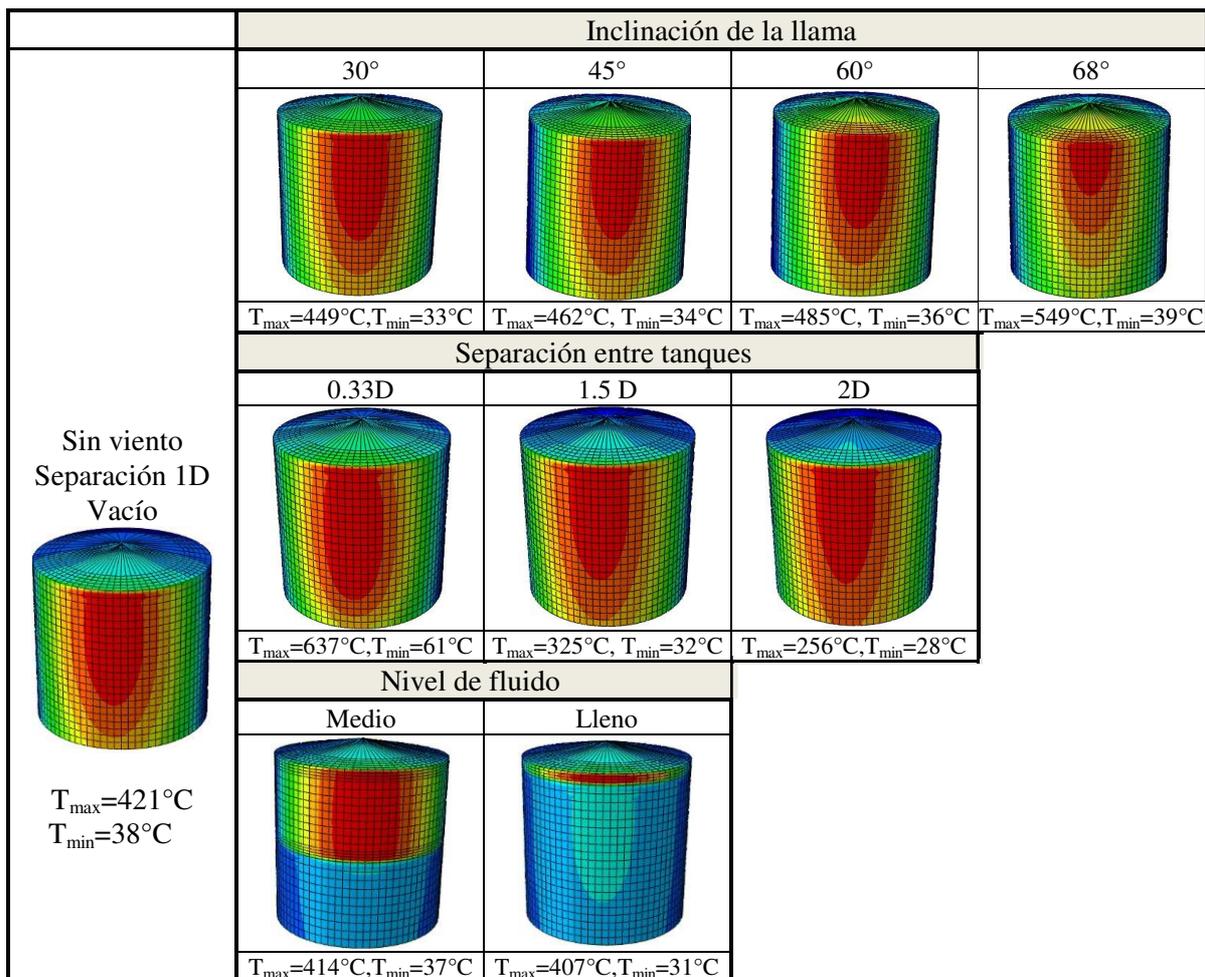


Figura 2: Distribución de temperaturas en la superficie del tanque objetivo, para los diez escenarios considerados. Las zonas de temperatura máxima se indican en rojo y las de mínima en azul.

La acción del viento que inclina la llama se considera actuando previamente a la carga térmica y se mantiene con un valor asociado a la velocidad de viento mientras la carga térmica alcanza los valores correspondientes al estado estacionario. Las presiones de viento se calculan en base a [CIRSOC 102 \(2005\)](#) y [AS/NZS 1170:2 \(2002\)](#) como en los trabajos precedentes actuando sobre la envolvente cilíndrica y el techo cónico. En los escenarios en los que se considera un nivel de fluido variable también se considera la acción hidrostática del fluido (gasolina) sobre las paredes del tanque. 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 ( $h_f=10.72\text{m}$ ) para que el nivel de fluido no llegue a la unión cilindro-cono. También se considera la acción del peso propio del acero A36 con una densidad de  $7850\text{ kg/m}^3$ .

#### 4 SIMULACION NUMÉRICA

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. Este tanque ya fue estudiado por los autores ([Jaca et al., 2016](#)) mediante análisis de bifurcación lineal (LBA) y también mediante análisis no lineal geométrico con imperfecciones (GNIA) ([Jaca et al. 2017](#)). Dado que el interés en este trabajo es exhibir el comportamiento postcrítico a medida que las temperaturas aumentan hasta el estado estacionario, la metodología adecuada es a través de la incorporación de amortiguamiento artificial (ADM) que permite superar inestabilidades locales. El estudio implementado a través de LBA complementado con GNIA mediante el método de Riks permite detectar las primeras inestabilidades localizadas pero no es capaz de avanzar en el proceso de aumento de temperaturas. La metodología ADM estabiliza la respuesta de manera que es posible continuar con la evaluación de la trayectoria de equilibrio más allá de la primera inestabilidad, detectando inestabilidades sucesivas a medida que la carga aumenta.

Este trabajo se realiza 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. En una primera etapa se analiza el tanque en condición de vacío y sin viento y separado una distancia de un diámetro del tanque fuente (TK-1D-V) usando el campo térmico obtenido por transferencia de calor mostrado en la [Figura 2](#) con una temperatura máxima sobre el tanque objetivo  $T_{\max}=421^\circ\text{C}$ .

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). La [Figura 3\(a\)](#) 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 3\(b\)](#) 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 y D). Como forma de control de la metodología la relación ALLSD/ALLIE se mantiene menor a 0.16.

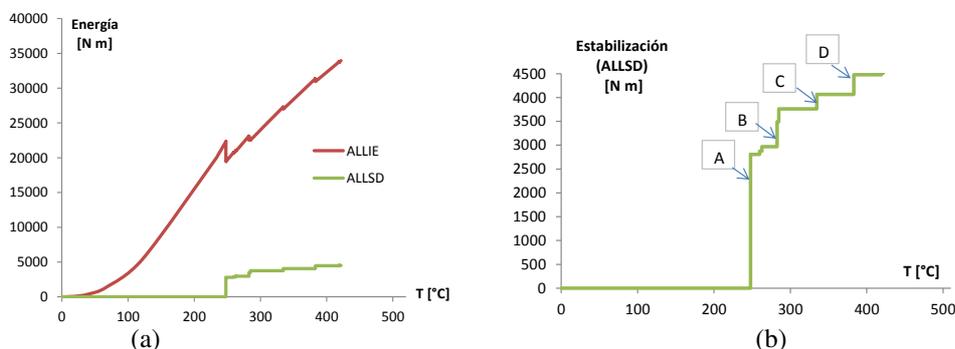


Figura 3: Tanque vacío, sin viento y separación de un diámetro ( **Tk-1D-V**), (a) Evolución de componentes de energía, Energía Total de Deformación (ALLIE) y Energía de Estabilización (ALLSD), (b) Detalle ALLSD.

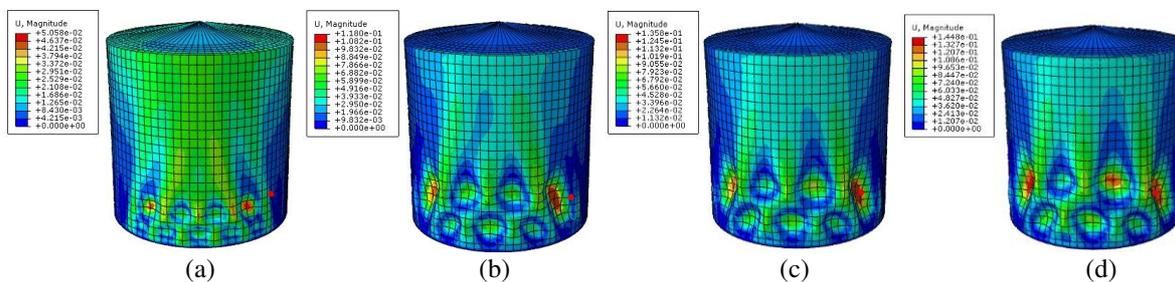


Figura 4: Deformadas Tanque **Tk-1D-V**, (a) Estado A,  $T \approx 240^{\circ}\text{C}$ , (b) Estado B,  $T \approx 311^{\circ}\text{C}$ , (c) Estado C,  $T \approx 380^{\circ}\text{C}$ , (d) Estado D,  $T \approx 420^{\circ}\text{C}$ .

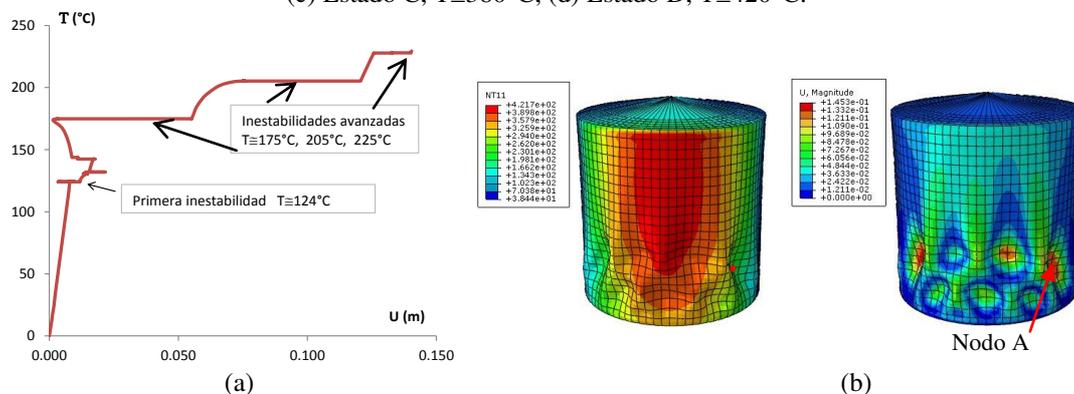


Figura 5: Tanque **Tk-1D-V**: (a) Trayectoria de equilibrio para Nodo A (mayor desplazamiento), (b) Deformada final para estado estacionario ( $T=229^{\circ}\text{C}$ ) con escalas de desplazamientos nodales (U, magnitud en m) y temperaturas nodales (NT11,  $^{\circ}\text{C}$ ),  $U_{\text{max}}=140\text{mm}$ .

La Figura 4 muestra las deformadas asociadas a las inestabilidades. La primera inestabilidad localizada se produce en la parte inferior del tanque frente al tanque fuente. Al aumentar las temperaturas esas deformaciones se extienden hacia la parte superior del tanque alcanzando en el estado estacionario un desplazamiento máximo de valor  $U_{\text{max}}=145\text{mm}$  en el Nodo A (Figura 5(b)). Se puede observar que su posición no coincide con la zona donde las temperaturas llegan a los mayores valores sobre el tanque. La Figura 5(a) muestra la evolución de temperaturas y desplazamientos en el Nodo A donde se pone en evidencia incrementos en los desplazamientos sin aumento notable de la temperatura, en coincidencia con los estados A, B, C y D de inestabilidad del equilibrio. La Figura 5(b) 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 (U1, U2, U3).

#### 4.1 Influencia del viento actuando con fuego

Con la misma metodología se analizan a continuación los diferentes escenarios para viento actuando durante el incendio, distancias variables entre los tanques y la posibilidad de presencia de fluido en el interior del tanque objetivo. En todos los casos se adaptan los parámetros de control del procedimiento de manera de limitar la relación ALLSD/ALLIE a valores menores de 0.15.

En estas simulaciones se considera que la acción del viento actúa sobre la estructura, generando una deformada previa a la existencia de fuego en el tanque fuente, y que además inclina la llama hacia el tanque objetivo con lo que se modifica la distribución de temperaturas sobre el tanque estudiado. Todos los casos analizados corresponden a una distancia entre tanques de un diámetro, sin fluido en el interior. Se consideran velocidades de viento variables de hasta 45km/h que generan inclinaciones de la llama de 30°, 45°, 60° y 68° y desplazamientos en el cuerpo del tanque con valor máximo de 0.033mm. Estos desplazamientos son muy reducidos y no afectan el comportamiento del tanque bajo la acción del campo térmico. La Figura 6(a) muestra la trayectoria de equilibrio del nodo de mayor desplazamiento. Para una inclinación de la llama de 30°, al aumentar las temperaturas las primeras inestabilidades aparecen en la parte inferior del tanque a una temperatura  $T \cong 172^\circ\text{C}$ , como se muestra en la Figura 6(b). A medida que se incrementa la temperatura, las deformaciones aumentan y se extienden hacia la parte superior como se muestra en la Figura 6(c) con un desplazamiento máximo  $U_{\max} = 179\text{mm}$  en un punto ubicado casi a mitad de altura del cilindro (Nodo B).

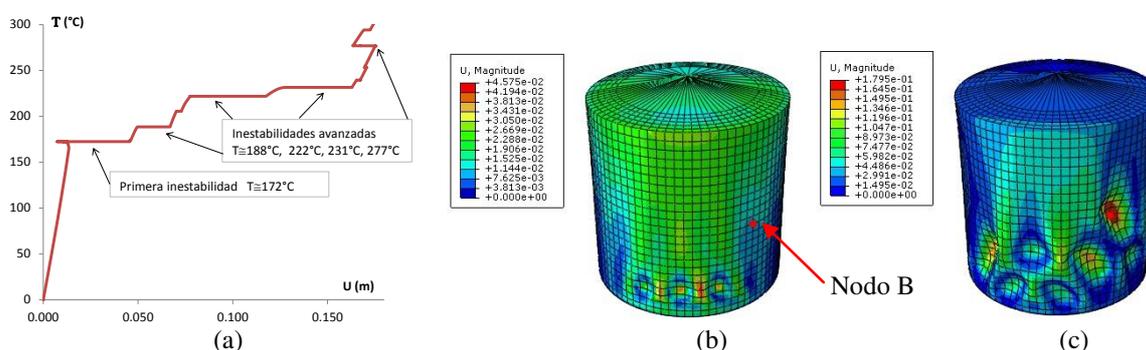


Figura 6: Tanque Tk-1D-V-w30, (a) Trayectoria de equilibrio para Nodo B (mayor desplazamiento), (b) Deformadas Primera inestabilidad,  $T \cong 172^\circ\text{C}$ , (c) Deformada final,  $T = 301^\circ\text{C}$  en Nodo B.

Al aumentar la inclinación de la llama se mantiene este patrón de deformación aumentando los valores máximos de los desplazamientos máximos que se producen a una altura levemente mayor en el cilindro que el caso mostrado anteriormente. La Tabla 2 resume los valores hallados de desplazamientos máximos en la primera inestabilidad y su temperatura asociada, junto con el desplazamiento máximo correspondiente al estado estacionario junto con el caso de referencia de llama vertical para una velocidad de viento nula.

Inclinación de la llama	Primera inestabilidad		Deformada Final
	$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$U$ [ $\text{m}$ ]	$U_{\max}$ [ $\text{m}$ ]
$\theta = 0^\circ$	240	0.051	0.145
$\theta = 30^\circ$	226	0.098	0.179
$\theta = 45^\circ$	229	0.105	0.206
$\theta = 60^\circ$	231	0.112	0.226
$\theta = 68^\circ$	252	0.127	0.231

Tabla 2: Desplazamientos máximos en la primera inestabilidad y deformada final. Inclinación de llama por viento.

### 4.2 Influencia de la separación entre tanques

Las distribuciones de temperatura sobre el tanque objetivo varían con la distancia de separación entre ambos tanques. Interesa estudiar la influencia de la posición relativa entre tanques en la respuesta estructural. Las distancias de separación dependen principalmente del material almacenado, parámetros geométricos del depósito y velocidad del viento, y juegan un rol fundamental en aspectos de seguridad. La distancia reglamentaria es la mínima distancia entre tanques adyacentes recomendada para la instalación de una batería de tanques. En base al código NFPA-30 (2012), la distancia mínima entre tanques de gasolina de diámetro inferior a 45 m y techo fijo ubicados a nivel del suelo es calculada como 1/6 de la suma de diámetros de tanques adyacentes, pero no inferior a 0.9 m. Para los tanques considerados en este estudio, la distancia reglamentaria resulta  $0.33D = 3.81\text{m}$ . La Figura 7 muestra las deformadas correspondiente a esa separación reglamentaria ( $T_{\text{max}}=637^\circ\text{C}$ ), se puede observar que la primera inestabilidad involucra desplazamientos extendidos a la mayor parte del cilindro frente a la llama que aumentan su valor a medida que la temperatura crece manteniéndose el patrón de deformación. Las deformadas correspondientes al estado estacionario se presentan en la Figura 8 para las distancias de 1.5D y 2D, donde se puede apreciar que las inestabilidades están concentradas en el tercio y cuarto inferior de la altura del tanque respectivamente, con valores notablemente menores.

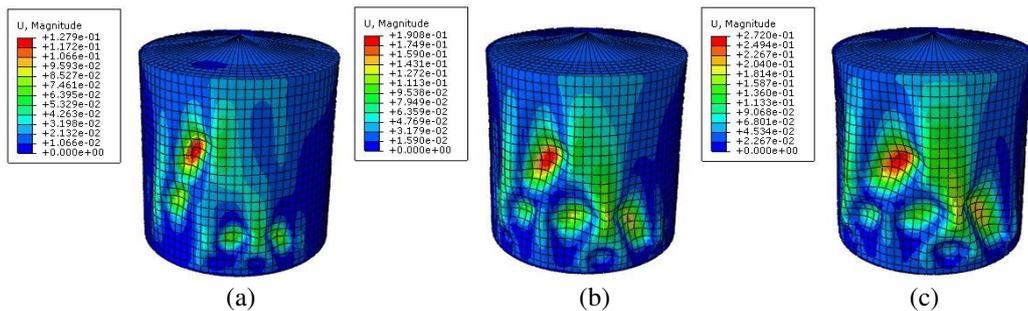


Figura 7: Deformadas correspondientes a Tanque Tk-R-V, 0.33D, (a) Primera inestabilidad,  $T \approx 217^\circ\text{C}$ , (b) Estado intermedio,  $T \approx 377^\circ\text{C}$ , (c) Deformada Final,  $T_{\text{max}}=637^\circ\text{C}$ .

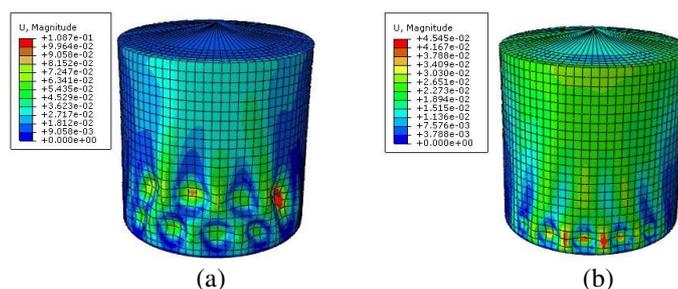


Figura 8: Deformadas, indicando puntos de mayor desplazamiento, (a) Distancia 1.5D,  $T_{\text{max}}=256^\circ\text{C}$ , (b) Distancia 2D,  $T_{\text{max}}=325^\circ\text{C}$ .

Distancia entre tanques	Primera inestabilidad		Deformada Final
	T [°C]	U[m]	U <sub>max</sub> [m]
0.33D	217	0.128	0.272
1D	240	0.051	0.145
1.5D	269	0.033	0.109
2D	232	0.029	0.045

Tabla 3: Desplazamientos máximos en primera inestabilidad y deformada final, distancias variables.

La Tabla 3 presenta las características de las primeras inestabilidades y los desplazamientos máximos correspondientes al estado estacionario para cada separación entre tanques

estudiada. Se puede observar que para la distancia reglamentaria resultan desplazamientos elevados, extendidos a toda la cáscara cilíndrica y del orden de los que se obtienen al considerar la acción del viento.

### 4.3 Influencia del nivel de fluido almacenado

La existencia de fluido en el interior del tanque influye en la respuesta en dos aspectos. Por un lado las temperaturas sobre el tanque objetivo en la zona en contacto con el fluido son levemente superiores a la temperatura ambiente y los mayores valores se presentan en la porción superior en contacto con el aire. Por otro lado, la presión hidrostática del fluido genera tensiones circunferenciales de tracción que estabilizan la cáscara frente a inestabilidades localizadas en la parte inferior como en los otros casos analizados. Por esas razones al aplicar la metodología ADM para fluido en nivel medio o hasta la parte superior del cilindro, no es necesario aplicar amortiguamiento artificial y la respuesta de la cáscara no presenta pandeo. Una evaluación mediante análisis no lineal geométrico por método iterativo permite obtener la respuesta del tanque frente a las temperaturas de estado estacionario. Los desplazamientos máximos se presentan en el techo, en el cilindro los desplazamientos alcanzan los valores de  $U_{\max} = 36\text{mm}$  para nivel medio en la mitad superior del tanque y  $U_{\max} = 32\text{mm}$  para nivel lleno en la zona próxima a la unión entre el cilindro y el techo frente a la llama (Figura 9).

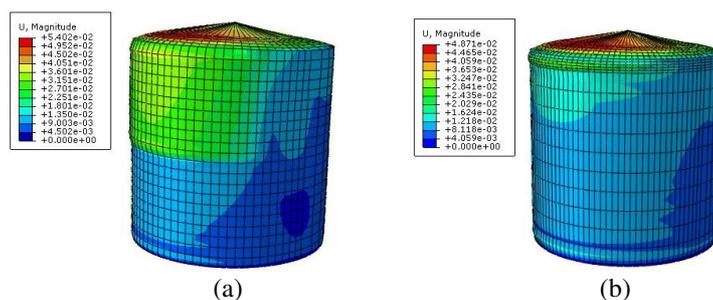


Figura 9: Deformada final, (a) Nivel fluido medio, Tk-1D-M,  $T_{\max} = 414^{\circ}\text{C}$ , (b) Nivel fluido lleno, Tk-1D-LI,  $T_{\max} = 407^{\circ}\text{C}$ .

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se utiliza la metodología de amortiguamiento artificial para evaluar la respuesta estructural de un tanque en un evento de incendio frente a diferentes escenarios que pueden presentarse en función de la distancia entre los tanques con llama y el tanque objetivo, la presencia de viento durante el incendio o un nivel variable de fluido en el interior del tanque. Para los tanques estudiados, se puede concluir:

- Al aumentar la velocidad del viento, los desplazamientos máximos obtenidos se incrementan comprometiendo principalmente la cáscara cilíndrica.
- La presencia de viento con velocidades de hasta 45km/h aumenta los valores de los desplazamientos hasta un 60%, con un patrón de deformaciones que se extiende desde la base del tanque hasta la mitad de la altura aproximadamente.
- A medida que la separación entre tanques aumenta se reducen los desplazamientos máximos y cambia el patrón de desplazamientos. Al duplicar la separación de una a dos veces el diámetro, los desplazamientos se reducen a una tercera parte y afectan una zona más reducida de la cáscara, próxima a la base del tanque.
- Cuando la distancia mínima es la reglamentaria (en este caso  $D/3$ ), el daño es máximo con desplazamientos del orden de 2.5% del diámetro (42 veces el espesor del cilindro) del tanque y que se extiende en toda la altura del cuerpo del tanque en el sector que enfrenta la

llama.

- La presencia de fluido en el interior del tanque estabiliza la respuesta estructural presentándose desplazamientos del orden de la cuarta parte de los que se generan en condición de vacío. Los desplazamientos se producen en la zona sin fluido, en contacto con el aire.
- Las deformaciones debidas a viento no modifican sustancialmente los desplazamientos y esfuerzos en el tanque bajo acción térmica.

**Agradecimientos:** Este trabajo fue realizado con subsidios de Universidad Nacional del Comahue, Universidad Nacional de Córdoba y CONICET a través del Proyecto Institucional de la Unidad Ejecutora IDIT (UNC/ CONICET).

## REFERENCIAS

- ABAQUS. *Simulia. Unified FEA*. Dassault Systemes. Warwick, Rhode Island. USA, 2006.
- API 650. Welded steel tanks for oil storage. *American Petroleum Institute*, 2013.
- Australian/New Zealand Standards. *Structural design actions. Part 2: Wind actions*. AS/NZS 1170:2. Sydney, 2002.
- CIRSOC 102, *Acción del viento sobre las construcciones*, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires, 2005.
- 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. *Mec. Computacional*, 34:135-149, 2016.
- 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.
- Jaca, R.C., Calabró, H.D. y Espinosa, S.N., Influencia del nivel de fluido y viento en la respuesta estructural de un tanque de petróleo en situación de incendio. *Mec. Computacional*, 34:163-180, 2016.
- Jaca, R.C., Espinosa, S.N. y Godoy, L.A., Comportamiento poscrítico de tanques de almacenamiento de combustible sometidos a la acción de viento y fuego. *Mec. Computacional*, 35: 2185-2201, 2017.
- Jaca, R.C., Espinosa, S.N. y Godoy, L.A., Metodologías para trayectorias no lineales geométricas en cáscaras bajo efectos térmicos. *Mec. Computacional*, 36: 235-244, 2018.
- Landucci, G., Gubinellia, G., Antonioni, G. and 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. Phd Thesis, The University of Edinburgh, 2011.
- NFPA 30:2012, *Flammable and Combustible Liquids Code*. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, USA, 2012.
- Pantousa, D., Tzaros, K. and Kefaki, M.A., Thermal buckling behaviour of unstiffened and stiffened fixed-roof tanks under non-uniform heating. *Journal of Constructional Steel Research*, 143:162-179, 2018.
- Reniers, G. and Cozzani, V., *Domino Effects in the Process Industries. Modeling, Prevention and Managing*, Elsevier, 2013.