

Asociación Argentina
de Mecánica Computacional



Mecánica Computacional Vol XXXV, págs. 2113-2127 (artículo completo)
Martín I. Idiart, Ana E. Scarabino y Mario A. Storti (Eds.)
La Plata, 7-10 Noviembre 2017

DISEÑO DE UNA BATERÍA DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE: ANÁLISIS TÉRMICO

Susana N. Espinosa^a, Rossana C. Jaca^b y Luis A. Godoy^c

^a *Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, susana.espinosa@fain.uncoma.edu.ar*

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

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

Palabras Clave: fuego, distancias reglamentarias, radiación, análisis multifísica acoplado

Resumen. El diseño de una batería de tanques de almacenamiento de combustible contempla diferentes aspectos que hacen a la eficiencia de la planta, tales como minimizar costos y facilitar su operación, y otros aspectos asociados a la seguridad de la misma que intentan minimizar riesgos potenciales. Esto es, si accidentalmente se iniciara un incendio en uno de los tanques, las distancias mínimas reglamentarias entre tanques pretenden minimizar la posibilidad de eventos en cadena que pudieran afectar a toda la planta. En este trabajo se computan niveles de radiación incidente y distribución de temperatura en tanques adyacentes al tanque bajo fuego considerando distintos diámetros y diferentes distancias entre ellos. Esta distribución es utilizada posteriormente para determinar la deformación estructural ocasionada en cada caso, a efectos de evaluar la posibilidad de un efecto dominó por colapso de tanques vecinos a la llama. Las temperaturas máximas alcanzadas y las deformaciones provocadas en el material son estimadas por elementos finitos utilizando un análisis secuencial implementado en un código de propósitos generales. Los resultados indican que en una planta diseñada con separaciones de un diámetro entre tanques de gasolina, el incendio de uno de los tanques conduce a temperaturas máximas del orden de 400°C en los tanques vecinos. Sin embargo, las temperaturas pueden ser hasta 200°C superiores si las distancias se reducen a las mínimas reglamentarias, ocasionando deformaciones que comprometen aún más su integridad estructural y aumentan el riesgo potencial de extensión del incendio a toda la planta.

1 INTRODUCCIÓN

Las zonas de producción y almacenamiento de petróleo, destilerías y plantas químicas en general constituyen potenciales áreas de riesgo. La concentración de tanques de almacenamiento de sustancias químicas peligrosas, líquidos inflamables y combustibles, combinado con accidentes asociados a su manufactura, manejo y transporte, e incluso a incidentes naturales, implica una alta posibilidad de eventos en cadena cuya magnitud depende fundamentalmente del fluido almacenado y de parámetros de diseño y ambientales. Resultados estadísticos publicados recientemente ([Reniers y Cozzani, 2013](#)) indican que los accidentes en cadena más frecuentes están asociados a fuego, de los cuáles el 30% ocurre en áreas de almacenamiento, fundamentalmente cuando se almacenan fluidos inflamables. Las causas de accidentes primarios pueden ser múltiples, tales como apertura y cierre de válvulas, llenado o vaciado de tanques, estática, falla en sistemas de ventilación, fisuras, fallas humanas y eventos naturales. El escalado temporal y/o propagación espacial del evento primario producirá eventos secundarios que pueden afectar a toda la planta, en lo que se conoce como efecto dominó. De acuerdo al mismo estudio, las mayores frecuencias de escalado están relacionadas con secuencias explosión→fuego, fuego→explosión y fuego→fuego, lo que puede verificarse por la extensa cantidad de accidentes reportados en literatura ([Chang y Lin, 2006](#), [Johnson, 2010](#), [Sharma et al., 2013](#), [Mishra et al., 2013](#), [Abbasi et al., 2014](#), [Argenti et al. 2014](#)).

El modelado numérico es una de las formas de determinar la incidencia de las múltiples variables que ocurren en diferentes escenarios de fuego. Para un modelo realista es primordial definir una geometría de la llama que represente con buena aproximación la forma de la llama real, de modo de estimar una potencia emisiva realista. La potencia emisiva se define como la radiación emitida por la llama por unidad de área de su superficie. Existen varios modelos para determinar la geometría de la llama, uno de los más representativos se conoce como fuego de estanque o *pool fire model* ([Rew et al., 1997](#)), que considera una llama confinada al diámetro del tanque incendiado ascendiendo desde el tope de dicho tanque con una altura que depende del diámetro del estanque y del combustible que se está quemando. Basado en el comportamiento del fuego observado experimentalmente para la combustión de hidrocarburos, la estimación de la potencia emisiva de la llama se realiza considerando que el calor es radiado desde la superficie de un sólido cilíndrico (*solid flame model*) con dos zonas radiantes (modelo bicapa), una zona inferior de llama clara o visible y alta potencia emisiva y una zona superior oscurecida por la formación de humo u hollín, con menor potencia emisiva.

La llama se origina generalmente en el tope de uno de los tanques, debido a la combustión inicial de la superficie del combustible en contacto con el aire. Sin embargo, en situaciones de fuego intenso, el derrame de combustible hará que la llama se extienda a todo el tanque bajo fuego, presentando un nuevo escenario de transferencia de calor y afectando en grado variable la estructura de los tanques.

En trabajos previos ([Espinosa y Jaca, 2016](#)) se determinaron los perfiles de temperatura y deformaciones para tanques de diámetro $D=11.44$ m, separados un diámetro entre sus superficies externas (Shell to Shell), para las dos posiciones de llama indicadas (tope y base del tanque fuente), considerando diferentes niveles de combustible almacenado y el efecto del viento sobre la llama. El estudio determinó que los máximos efectos térmicos sobre los tanques adyacentes al fuego se presentan en las superficies en contacto con el aire interno (por encima de la superficie del combustible almacenado), cuando la llama ocurre desde el nivel del suelo y se inclina por efecto del viento en dirección al tanque objetivo.

El diseño de una batería de tanques de almacenamiento de combustible contempla diferentes aspectos que hacen a la eficiencia de la planta, tales como minimizar costos y facilitar su

operación, y otros aspectos asociados a la seguridad de la misma que intentan minimizar riesgos potenciales. Esto es, si accidentalmente se iniciara un incendio en uno de los tanques, las distancias mínimas reglamentarias entre tanques pretenden minimizar o retardar el desarrollo de eventos en cadena que pudieran afectar a toda la planta.

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. Sin embargo, existen varios estándares para definir las distancias mínimas entre tanques atmosféricos ubicados sobre el suelo, siendo los más reconocidos la National Fire Protection Association ([NFPA-30, 2012](#)), American Petroleum Institute ([API 650, 2010](#)) y The US Environmental Protection Agency ([EPA-UST, 2015](#)).

[Sengupta et al. \(2011\)](#) analizaron el diseño de una granja de tanques de una refinería, empleando diferentes modelos para determinar la geometría y potencia emisiva de la llama considerando gasolina almacenada y gas natural licuado (LNG) como casos de estudio. [Abbassi et al., \(2014\)](#) analizaron el diseño de una terminal de combustibles ubicada en Jaipur, India, que en 2009 sufrió un accidente en cadena produciendo pérdidas humanas, millonarias pérdidas económicas y un enorme impacto ambiental. En ambos casos se determinaron las distancias mínimas de separación para tanques de almacenamiento de gasolina y gas natural licuado, asociadas a fuego y explosiones por Bleve (boiling liquid expanding vapor explosión), utilizando diferentes modelos y considerando el efecto del viento. Por su parte, [Da Silva Santos y Landesmann \(2014\)](#), estudiaron las distancias mínimas seguras entre tanques, comparando la respuesta frente al fuego de tanques de concreto y acero, conteniendo gasolina o etanol y bajo la incidencia de vientos a velocidades de 18 km/h, sin abordar el comportamiento estructural.

En este trabajo, se estudia el comportamiento térmico-estructural de tanques de almacenamiento de combustible de diferentes diámetros cuando la llama se extiende verticalmente desde el nivel del suelo considerando distancias de separación variables entre llama y tanque.

2 MODELADO

El escenario de fuego simulado se representa por medio de un modelo simple consistente de dos tanques idénticos y una llama cilíndrica de igual diámetro que el estanque donde se origina el fuego, denominado *tanque fuente* (Figura 1). La radiación emitida por la llama incide sobre el tanque adyacente en estudio, denominado *tanque objetivo*. La llama se produce por combustión de gasolina y asciende desde la base del tanque fuente. Los tanques son de techo cónico, y diámetro igual a su altura ($D=H$). El techo cónico tiene una altura de 1 m. La Tabla 1 resume los parámetros utilizados en el modelo, considerando distintos casos de estudio que tienen en cuenta tanques de diámetros D y $1.5D$, separados entre sí por las distancias reglamentarias recomendada por el código internacional [NFPA-30 \(2012\)](#) y separaciones de 1, 1.5 y 2 diámetros de cáscara a cáscara. El tanque objetivo se considera vacío a efectos de determinar las deformaciones máximas ocasionadas por efecto térmico sobre la cáscara.

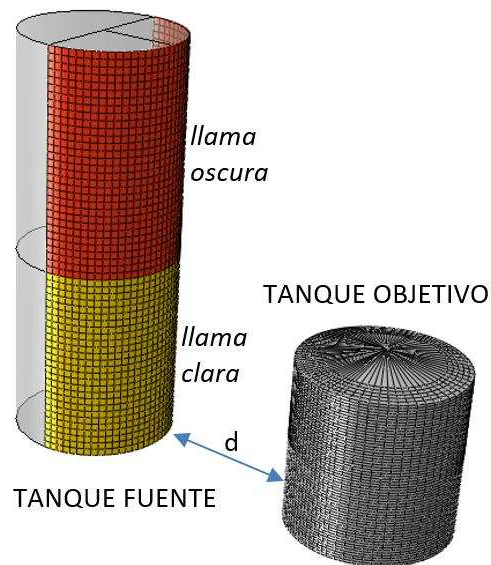


Figura 1: Modelo implementado en la simulación para determinar la distribución de temperaturas.

Material de construcción	Fluido interno		Espesor (m)		D=H (m)	d (m)
	Tanque fuente	Tanque objetivo	cáscara	techo		
Acero, A36	gasolina	aire	$6 \cdot 10^{-3}$	0.0192	11.44 y 17.16	Reglamentaria 1D 1.5 D 2 D

Tabla 1: Parámetros geométricos implementados en este estudio.

La distancia reglamentaria es la mínima distancia entre tanques adyacentes (Shell to Shell) recomendada para la instalación de una batería de tanques. Debido a su bajo Flash Point la gasolina es clasificada como un líquido inflamable, Clase I, de acuerdo a la clasificación del Código de líquidos inflamables y combustibles de la NFPA-30. En base al código NFPA 30 para líquidos Clase I, 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 diámetros considerados en este estudio, las distancias reglamentarias resultan 3.81 m y 5.72 m.

2.1 Determinación de parámetros geométricos y potencia emisiva de la llama

El modelo de fuego de estanque (*pool fire*) utilizado en este trabajo considera una llama de igual diámetro que el tanque fuente donde se origina, mientras que su altura se determina empleando modelos empíricos que, para el caso de ausencia de viento ($u_w < 1$ m/s), dependen principalmente del diámetro de la llama y del tipo y velocidad de combustión del combustible.

Debido a su simplicidad y a la gran cantidad de información experimental empleada en su determinación, el modelo empírico de [Thomas \(1963\)](#) combinado con datos experimentales de [Babrauskas \(1983\)](#) para una gran cantidad de combustibles, sigue estando entre los más utilizados para determinar la altura total de la llama. Por otro lado, la altura de la parte más clara de la llama, ubicada en la zona inferior de la misma y medida desde el tope del tanque fuente, se determina por medio de la correlación de [Pritchard y Binding \(1992\)](#) que tiene en cuenta el

incremento de humo formado dependiendo del tipo de combustible y del diámetro del estanque. Las ecuaciones de cálculo y propiedades del combustible pueden consultarse en trabajos previos (Espinosa et al., 2015; Espinosa y Jaca, 2016). En nuestro caso, la llama se extiende desde el nivel del suelo, de modo que a la longitud de la llama clara calculada previamente se le suma la altura del tanque fuente. Los resultados del cálculo se muestran en la Tabla 2 para los dos diámetros de tanques considerados.

D=H (m)	Altura de la llama oscura (m)	Altura de la llama clara (m)
11.44	15.58	13.36
17.16	20.72	19.58

Tabla 2: Parámetros geométricos estimados para una llama producida por combustión de gasolina en estanques de distinto diámetro, llama a nivel del suelo y $u_w < 1$ m/s.

La potencia emisiva de la llama indica la energía radiada por unidad de superficie de la llama, y es estimada por medio del modelo de Mudan y Croce (1995) reportado en trabajos previos (Espinosa et al., 2015; Espinosa y Jaca, 2016). Este modelo considera la máxima potencia emisiva del combustible ($E_{f_{máx}}=140$ kW/m² para gasolina) para la zona inferior de llama clara, y un promedio pesado con el factor de obscuración, entre el valor máximo y la potencia emisiva del hollín ($E_{f_{hollín}}=20$ kW/m²) para la zona superior. El factor de obscuración estima el porcentaje de formación de humo en la zona superior de la llama como función del diámetro del estanque. Con el aumento del diámetro de la llama, mayor es la dificultad de ingreso de aire al centro de la misma, lo que resulta en mayor formación de humo por combustión ineficiente. Los valores calculados de potencia emisiva son presentados en la Tabla 3 para las zonas de llama clara y llama oscura.

Sólo una fracción de la radiación emitida por la llama incide sobre el tanque objetivo, fundamentalmente debido a la geometría relativa de los tanques que afecta el *factor de visión* o *factor de forma*, y en menor proporción, a la transmisividad atmosférica, que atenúa la energía radiante transmitida entre llama y tanque por efecto del vapor de agua y dióxido de carbono presentes en la atmósfera. La transmisividad atmosférica es fácilmente calculada por el método de Wein en función de la distancia recorrida, la humedad relativa del aire y la presión de saturación del agua a temperatura ambiente. Sin embargo, mientras el factor de visión es calculado al implementar el modelo de elementos finitos para el conjunto llama-tanque objetivo, la transmisividad atmosférica es tenida en cuenta estimando para cada zona de la llama una Temperatura Media Efectiva (Da Silva et al., 2014) que representa la temperatura de una llama hipotética que produce la potencia emisiva promedio, $\tau E_{f_{av}}$:

$$T_{ef} = \left(\frac{\varepsilon_f \sigma T_a^4 + \tau E_{f_{av}}}{\varepsilon_f \sigma} \right)^{0.25} \quad (1)$$

donde ε_f es la emisividad de la llama, σ es la constante de Stefan/Boltzmann (5.67×10^{-8} W/m².K⁴), τ es la transmisividad atmosférica y T_a la temperatura ambiente en K.

Los valores calculados de potencia emisiva, transmisividad y temperatura media efectiva para la parte clara y oscura de la llama son indicados en la Tabla 3 considerando 2 diámetros diferentes para los tanques y 4 distancias de separación entre ellos.

D=H (m)	d (Shell to Shell) (m)	Potencia emisiva de la llama, $E_{f_{av}}$ (kW/m ²)		Transmisividad atmosférica, τ	Temperatura media efectiva de la llama, T_{ef} (°C)	
		zona clara	zona oscura		zona clara	zona oscura
11.44		140	50			
	3.81			0.91	953	678
	1 D			0.85	933	662
	1.5 D			0.83	924	656
	2 D			0.81	917	650
17.16		140	35			
	5.72			0.89	946	593
	1 D			0.83	924	577
	1.5 D			0.80	914	571
	2 D			0.78	907	566

Tabla 3: Parámetros geométricos estimados para una llama producida por combustión de gasolina en estanques de distinto diámetro.

Nótese que la potencia emisiva de la zona oscurecida de la llama disminuye al aumentar el diámetro del tanque fuente, como consecuencia de la formación de un mayor volumen de humo como se explicó anteriormente. Por otro lado, si bien la potencia emisiva de la llama depende sólo del diámetro D, la temperatura media efectiva dada por la ecuación (1) disminuye al aumentar la distancia entre llama y tanque objetivo como consecuencia de una disminución de la transmisividad atmosférica.

2.2 Modelo computacional

Las simulaciones se realizaron utilizando el software comercial ABAQUS-Simulia (Dassault Systems, 2006) basado en elementos finitos. Debido a que el problema de transferencia de calor analizado en este trabajo puede resolverse sin conocimiento de la respuesta estructural mientras que el campo de tensión/deformación de la estructura depende del campo de temperaturas en la misma, se implementaron dos modelos. El primero es un modelo de transferencia de calor desacoplado, seguido de un modelo secuencialmente acoplado de tensión/deformación que analiza la respuesta estructural incorporando la distribución de temperatura obtenida previamente como un campo predefinido. El modelo de transferencia de calor estacionario se implementó en Abaqus estándar por medio de elementos de transferencia de calor cuadrangulares y triangulares de 6 y 8 nodos (DS6 y DS8), respectivamente, e incluye conducción, convección y radiación de cavidad (*fully implicit cavity radiation*) con propiedades dependientes de la temperatura.

Para el análisis multifísica secuencialmente acoplado se utilizó un análisis estático de tensiones y deformaciones con elementos de cáscara cuadrangulares y triangulares de 6 y 8 nodos (S8R y STRI65), respectivamente, y condiciones de borde que impiden desplazamientos en las tres direcciones.

3 CÁLCULO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE LLAMA Y TANQUE OBJETIVO

El proceso de transferencia de calor en el escenario analizado (ver Figura 3) involucra las tres formas de intercambio de calor: conducción, convección y radiación, siendo esta última la más relevante. Una fracción de la energía radiante emitida por una llama de características

geométricas dadas en la Tabla 2 y temperaturas en la zona clara y oscura dadas en la Tabla 3, incide sobre los tanques adyacentes en proporción fijada por el factor de visión. Parte de esta energía es eliminada por convección y radiación entre la superficie externa y el ambiente y el resto se transmite por conducción a través del acero hacia el interior del tanque, donde nuevamente es intercambiada por convección con el aire interno y por radiación entre las superficies internas del tanque a través del aire. Durante el transitorio la estructura de acero (y en cantidad despreciable el aire) acumula calor como energía interna, aumentando su temperatura. De acuerdo a la Ley de Stephan-Boltzmann, el aumento de temperatura de la superficie del tanque objetivo reduce la radiación incidente desde la llama y aumenta la pérdida de calor por convección hacia el aire ambiente, con lo que, luego de un tiempo, el sistema llega al estado estacionario dando lugar a la distribución de temperaturas computada para cada uno de los 8 casos analizados en este trabajo. La elevada conductividad térmica del acero (50 W/m.K) y el pequeño espesor de la cáscara hacen que la diferencia de temperaturas entre la cara interna y externa de las superficies sea completamente despreciable.

La temperatura inicial es 20°C y el aire se considera a 20°C durante todo el proceso. La transmisividad térmica del aire interno se considera unitaria mientras que la externa, dada en Tabla 3, se calcula con el modelo de Wein considerando una humedad relativa ambiente del 40%.

Las propiedades del acero se computan en función de la temperatura. Considerando que la superficie externa del tanque se tizna por efecto del fuego durante el incendio, se asumieron emisividades de 0.8 y 0.3 para las superficies externa e interna, respectivamente. La llama se considera como un cuerpo negro de emisividad unitaria. El factor de visión es calculado por elementos finitos para cada elemento de la cáscara.

Los coeficientes de convección fueron estimados con la correlación de Churchill y Chu (Incropera-DeWitt, 2002) para convección natural y son introducidos en el modelo en función de la temperatura de la superficie del tanque siendo actualizados en cada iteración de la simulación. Para mayores detalles del modelo se refiere al lector a trabajos previos (Espinosa y Jaca, 2016).

Los efectos térmicos fueron evaluados para el conjunto tanque fuente-tanque objetivo considerando diámetros $D=11.44$ m y $D=17.16$ m, altura $H=D$, y 4 distancias de separación entre los tanques que varían desde la distancia mínima reglamentaria hasta $d=2D$.

La Figura 2 muestra resultados de la radiación neta (W/m^2) emitida por llama y la radiación incidente sobre el tanque objetivo para $d=1D$.

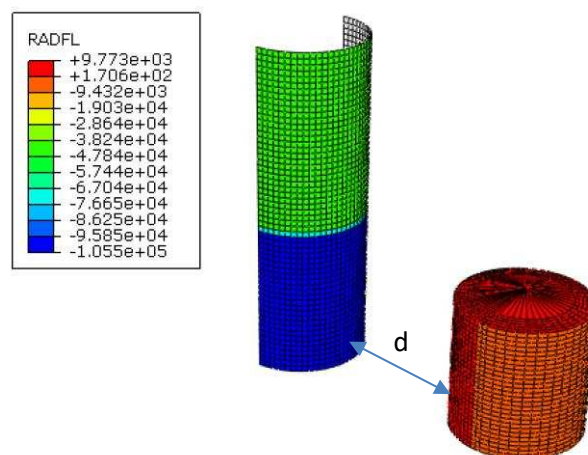


Figura 2: Radiación neta intercambiada [W/m^2] entre llama y tanque objetivo.
 $D=H=11.44$ m, $d=1D$.

Puede observarse que la zona inferior de la llama (llama clara) emite una radiación del orden de 10^5 W/m², mientras la zona superior, oscurecida por la formación de humo, emite una radiación promedio de 5×10^4 W/m². La máxima radiación incidente sobre el tanque objetivo es de 9773 W/m² y se verifica sobre la superficie lateral enfrentada a la llama. La Tabla 4 compara este valor con los correspondientes a diferentes distancias de separación.

	d reglamentaria	d=1D	d=1.5D	d=2D
D=H=11.44 m				
q_{rad}, [W/m²]	20620	9773	6315	4450
t, [°C]	623	406	306	235
D=H=17.16 m				
q_{rad}, [W/m²]	20230	8982	5719	3975
t, [°C]	615	383	284	216

Tabla 4: Máxima radiación neta incidente sobre el tanque objetivo y temperatura máxima

En los trabajos de [Sengupta et al. \(2011\)](#) y [Abbassi et al. \(2014\)](#), las distancias mínimas consideradas seguras se obtuvieron fijando un flujo de calor máximo incidente sobre tanques adyacentes de 4732 W/m². Según el SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, se espera que ningún material se incendie si recibe una radiación menor a dicho valor. Observando los resultados dados en la Tabla 4, los tanques considerados en este trabajo deberían estar separados una distancia mínima de 2D para cumplir con este criterio.

En la Figura 3 se observan los patrones de distribución de temperaturas para el tanque objetivo sobre la superficie enfrentada a la llama para las distancias de separación extremas consideradas en este trabajo. Los patrones son similares a los hallados en trabajos previos ([Liu, 2011](#); [Da Silva et al, 2014](#)) para tanques de diámetro D=11.44 m separados una distancia d=1D. Los valores máximos de temperatura se indican en la Tabla 4 para los casos estudiados en el presente trabajo.

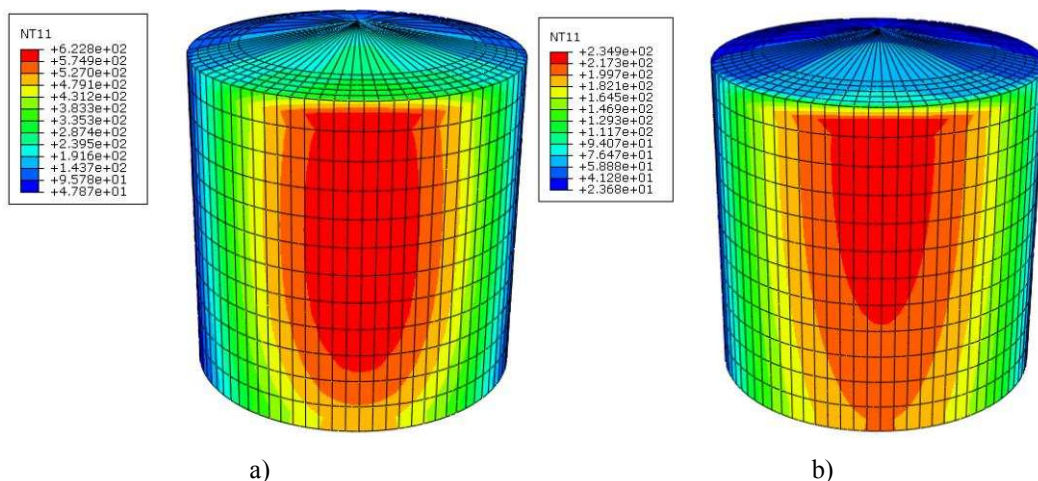


Figura 3: Distribución de temperaturas [°C] para el tanque objetivo (D=H=11.44 m) con distancias de separación respecto a la llama: a) distancia reglamentaria, b) d=2D.

La Figura 4 presenta los perfiles de temperatura y flujo de calor para los nodos ubicados sobre la coordenada vertical del lateral cilíndrico directamente enfrentada a la llama. El eje de abscisas se mide desde la parte superior hasta la base del tanque y se ha normalizado de modo

que sea posible la comparación entre tanques de diámetros diferente. Como se esperaba, para cada uno de los diámetros considerados, las magnitudes son significativamente superiores cuando se computan a la distancia mínima reglamentaria. Sin embargo, el cambio en la forma de las curvas no resulta tan obvio. Para explicarlo debemos recordar que el flujo de calor representado resulta del intercambio de calor por conducción, convección y radiación, siendo este último el más relevante de los tres modos de transferencia. La magnitud de la radiación neta incidente sobre el tanque objetivo depende fundamentalmente de la temperatura efectiva de la llama y del factor de visión, que tiene en cuenta la forma geométrica y posición relativa del tanque objetivo y la llama. La Figura 4 muestra que cuando los tanques adyacentes están suficientemente separados de la llama (1.5D y 2D), los valores máximos de temperatura y flujo de calor se establecen en los nodos superiores del tanque objetivo y disminuyen hacia la zona inferior. Por el contrario, al disminuir la separación, el aumento de la temperatura efectiva de la llama (ver Tabla 3) combinado con un aumento en el factor de visión incrementa el flujo de calor y las temperaturas en la zona central del tanque objetivo. Este comportamiento es más marcado cuando la distancia de separación es la reglamentaria.

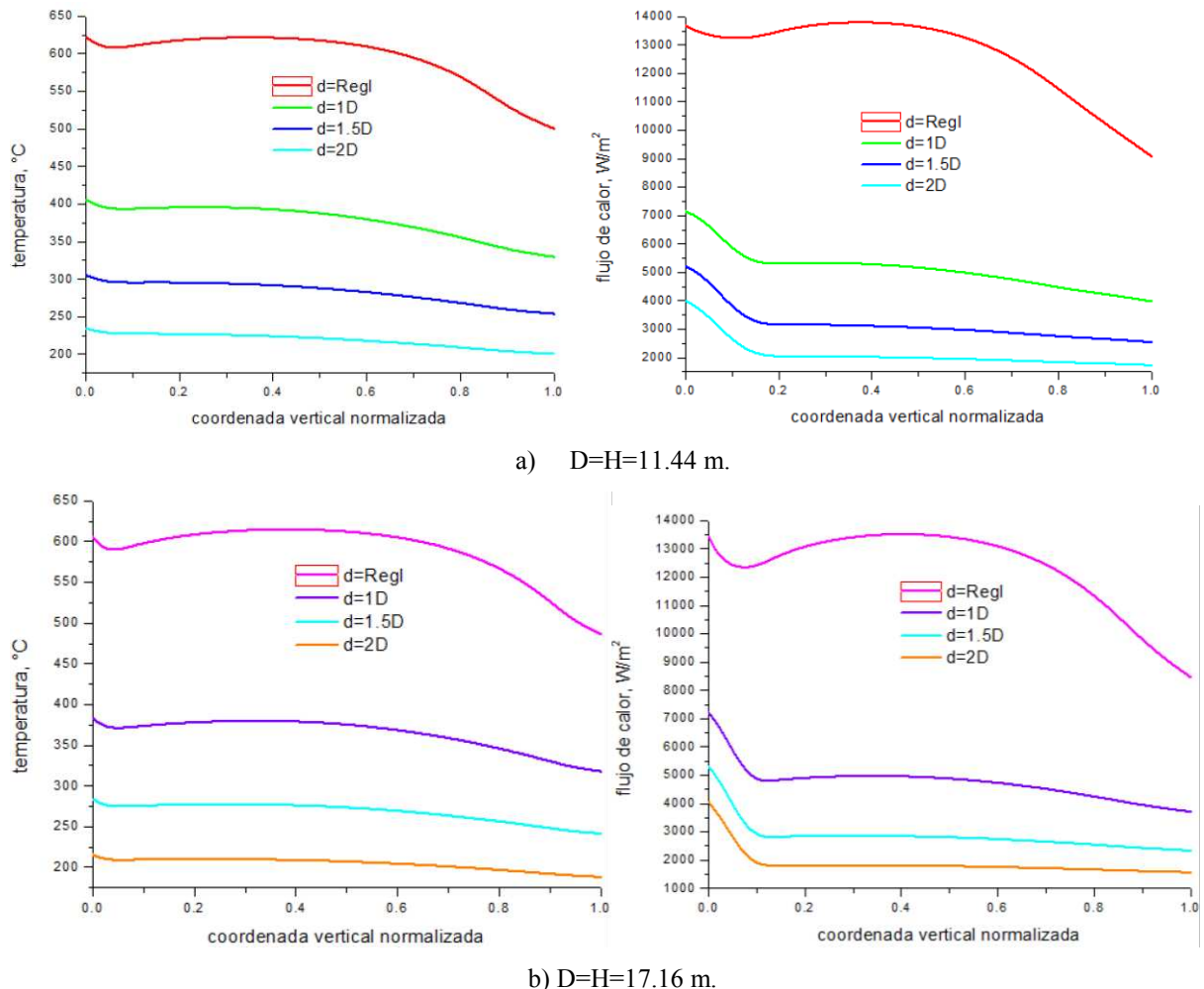


Figura 4: Perfiles de temperatura y flujo de calor sobre la coordenada vertical del tanque objetivo para distintas distancias de separación, d , entre los tanques.

Cuando se comparan los perfiles de temperatura para tanques de diferentes diámetros separados la misma distancia entre sí (ver Figura 5a), se observan temperaturas superiores para el caso de menor diámetro. Este comportamiento se observa también en la Figura 5b para el flujo de calor, y es el resultado de la disminución de la potencia emisiva de la zona superior de

la llama con el incremento del diámetro del tanque como consecuencia de una combustión menos eficiente.

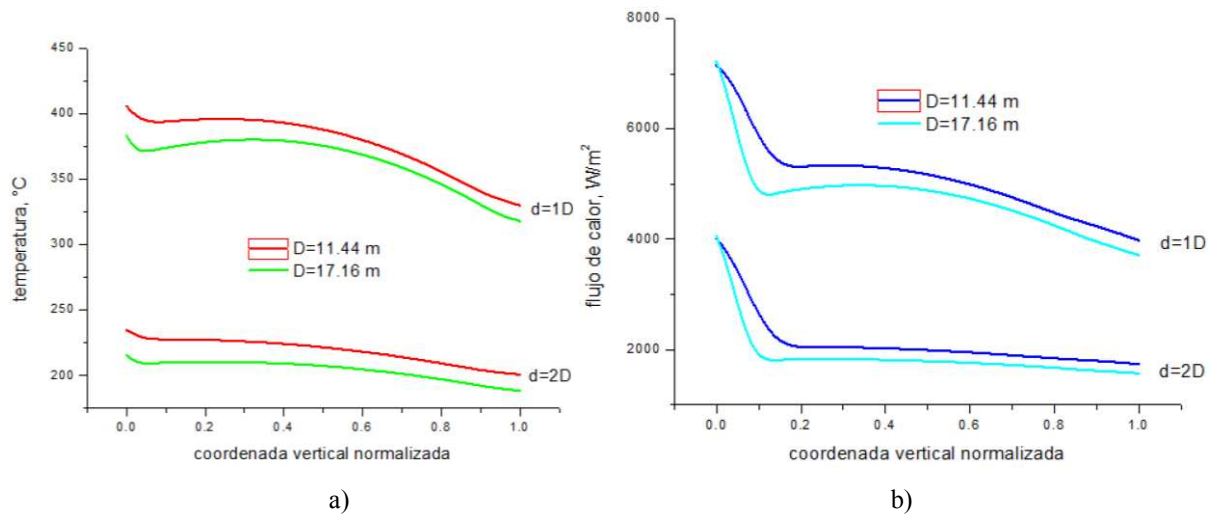


Figura 5: Comparación de temperaturas (a) y flujo de calor (b) sobre la coordenada vertical del tanque objetivo considerando 2 diámetros y 2 distancias de separación entre los tanques.

En este punto es importante aclarar que cuando los tanques de almacenamiento contienen combustible almacenado, los perfiles de temperatura se modifican en las superficies de contacto del líquido con la pared del tanque, pero permanecen idénticos a los estimados en este trabajo en las superficies de contacto con el aire interno. La Figura 6 permite apreciar este comportamiento cuando se comparan perfiles de temperatura resultantes para un tanque con combustible hasta la mitad de su altura y el mismo tanque vacío. El efecto refrigerante del líquido combinado con su gran capacidad de almacenamiento de calor, reduce significativamente las temperaturas en la pared del tanque desde su base hasta el nivel del líquido, sin alterar las magnitudes de los efectos térmicos máximos alcanzados en la zona superior, en contacto con el aire. Para mayor detalle del aspecto considerado, se remite al lector a trabajos previos (Espinosa y Jaca, 2016).

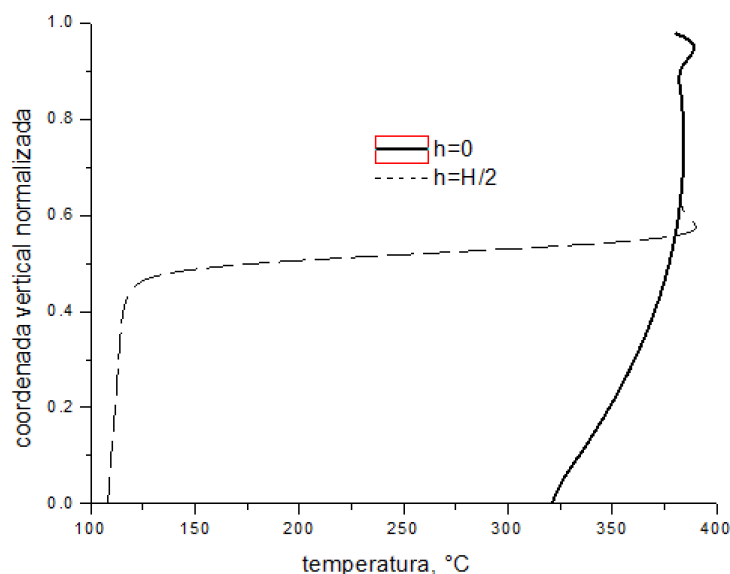


Figura 6: Comparación de temperaturas alcanzadas sobre la superficie lateral de un tanque vacío y el mismo tanque con combustible almacenado hasta la mitad de su altura.

4 CÁLCULO DE TENSIONES Y DEFORMACIONES TÉRMICAS

La deformación termo-estructural del tanque objetivo se computó por medio de un análisis secuencial implementado en ABAQUS introduciendo la distribución nodal de temperaturas como un campo predefinido en el análisis lineal acoplado de tensión-deformación. El análisis se realizó considerando comportamiento geométrico lineal. En esta etapa del cálculo es necesario introducir las propiedades elásticas del acero. Se consideró un módulo de Poisson (ν) constante de 0.3 y un módulo de elasticidad (E) dependiente de la temperatura. El espesor de la cáscara cilíndrica (t) es de 0.0064m (1/4") calculado de acuerdo a la norma [API 650 \(2010\)](#), mientras que el espesor del techo se asume igual a $3t$, donde t es el espesor de la cáscara cilíndrica, para tener en cuenta el efecto rigidizador de las vigas radiales y circunferenciales utilizadas en este tipo de tanques ([Burgos et al., 2005](#)). En la Tabla 1 el espesor asignado al techo responde a esta práctica. Puesto que el combustible líquido almacenado tiene un efecto estabilizante sobre la estructura ([Jaca et al., 2016](#)), la simulación de tanques vacíos llevada a cabo en este trabajo, permite analizar el peor escenario para tanques adyacentes a la llama.

La Figura 7 muestra las tensiones generadas por efecto térmico sobre la cáscara y techo del tanque objetivo cuando se modifican las distancias de separación respecto al tanque bajo fuego. En dicha figura se representan las tensiones máximas principales (S_{max}) de tracción, indicadas en color rojo, y las tensiones mínimas principales (S_{min}) de compresión, indicadas en azul. Las máximas tensiones de tracción se verifican sobre la superficie frontal del techo y en la región lateral a 90° de la superficie enfrentada a la llama, mientras que las máximas tensiones de compresión se presentan en la parte inferior del tanque en la zona que enfrenta el fuego. Estos valores máximos positivos y negativos en el cuerpo cilíndrico del tanque se producen en el sector próximo al apoyo asociados a las restricciones de desplazamiento que impone el borde inferior del tanque. Predominan las tensiones axiales con valores máximos de tracción de $3.192 \times 10^8 \text{N/m}^2$ y máximos de compresión de $4.53 \times 10^8 \text{N/m}^2$, cuando los tanques están separados la distancia reglamentaria. Al comparar con las tensiones mostradas en la Figura 7(a), se observa que es la principal componente de las tensiones máximas principales ya que los valores son prácticamente los mismos. Las mayores tensiones circunferenciales de compresión están concentradas en la parte inferior frente a la llama y toman un valor de $2.84 \times 10^8 \text{N/m}^2$.

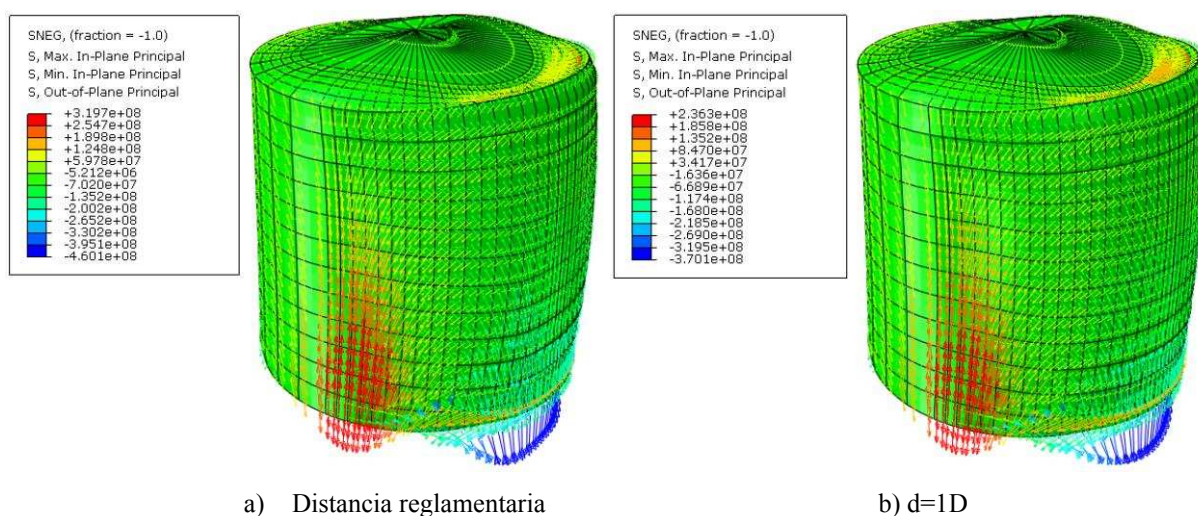


Figura 7: Comparación de tensiones térmicas [N/m²] en tanques de igual diámetro a diferentes distancias de la llama. D=H=11.44 m

La comparación con las tensiones máximas al aumentar la distancia entre tanques desde la distancia reglamentaria a una vez el diámetro (Figura 7(b)), muestra una distribución similar de

las tensiones y una reducción del 26% para las de tracción y de 19.5% para las de compresión. Considerando una tensión de fluencia para el acero de $2.15 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, se presenta un comportamiento plástico en el sector inferior que enfrenta el fuego y el resto de la estructura permanece en el campo elástico.

En la Figura 8 puede observarse el patrón de desplazamiento seguido por la superficie lateral y el techo del tanque adyacente al tanque bajo fuego. Este patrón es similar en todos los casos estudiados en este trabajo. La magnitud del desplazamiento es mayor en la unión de la cáscara cilíndrica y el techo, lo que podría ocasionar la separación de ambas superficies, en lo que se conoce como “fish mouth” por su parecido con la boca de un pez. Las consecuencias de esta abertura pueden ser decisivas para que se produzca un efecto de escalado. El ingreso de aire y partículas incandescentes al interior del tanque con algún nivel de combustible almacenado, puede ocasionar una nueva llama, dando lugar a un evento secundario (Mansour, 2012). La deformada global es compatible con una dilatación de todo el cuerpo cilíndrico y una leve inclinación en dirección contraria a la llama, el techo sufre desplazamientos hacia abajo.

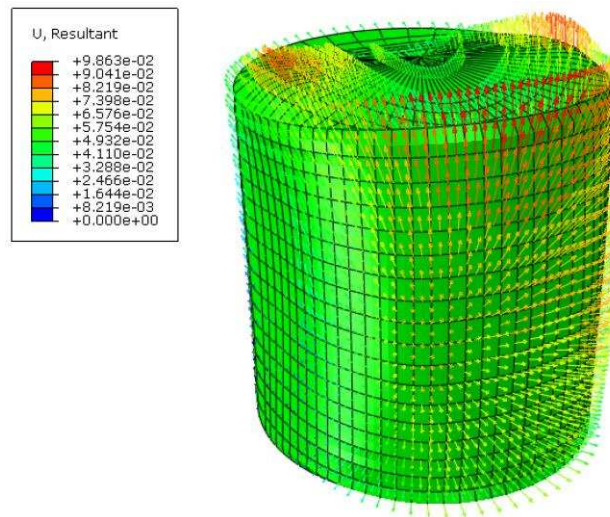


Figura 8: Vectores de desplazamiento ocasionados por efecto térmico

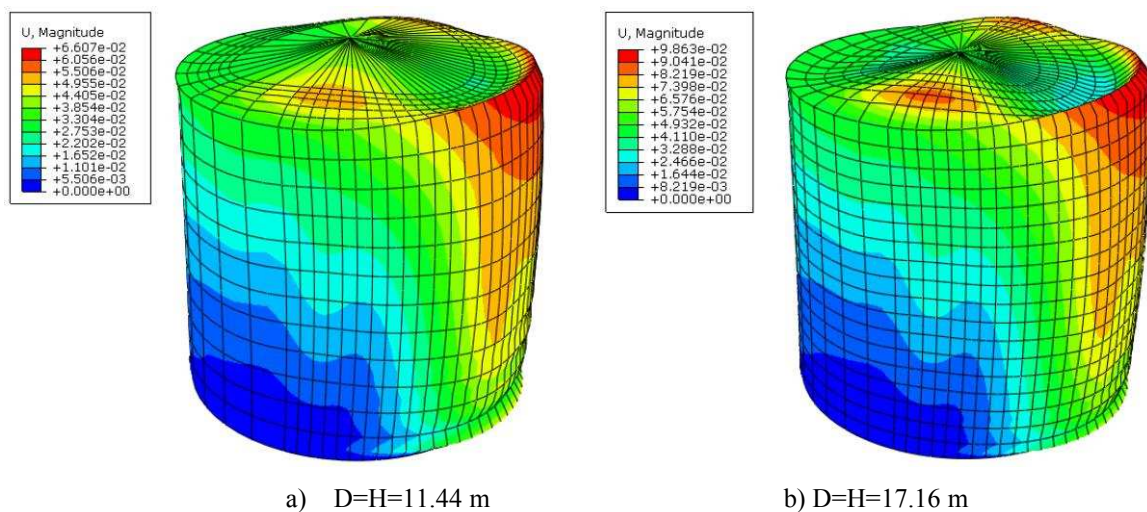


Figura 9: Deformaciones ocasionadas por efecto térmico en tanques de diámetros distintos y distancia mínima reglamentaria entre cáscaras. Vista lateral.

La distribución completa de deformaciones para tanques de diámetros diferentes con separaciones mínimas entre tanques se observa en la Figura 9. En ambos casos mostrados en la Figura 9 se observa una deformada similar con mayores valores en el tanque de mayor diámetro y una respuesta de dilatación global del tanque como se mencionó anteriormente. Al aumentar el diámetro del tanque, el máximo desplazamiento aumenta un 42%. La Tabla 5 permite comparar los valores máximos de tensión-desplazamiento para todos los casos estudiados en este trabajo. Se presentan los valores de tensión principal máxima de tracción (S), desplazamiento máximo (U) para las separaciones: reglamentaria, de un diámetro y dos diámetros entre tanques, y además los porcentajes de reducción con respecto a los valores correspondientes a la distancia reglamentaria de separación.

	d reglamentaria	d=1D		d=2D	
			% reducción		% reducción
D=H=11.44 m					
$S_{\max} \times 10^{-8}$ [Pa]	3.20	2.36	26	1.37	57
$U \times 10^{-2}$ [m]	6.61	4.57	31	2.73	58
D=H=17.16 m					
$S_{\max} \times 10^{-8}$ [Pa]	3.28	2.33	30	1.33	58
$U \times 10^{-2}$ [m]	9.86	6.66	32	3.85	61

Tabla 5: Tensiones y desplazamientos máximos sobre el tanque objetivo

La Figura 10 permite comparar deformaciones en el rango completo de la coordenada vertical incluyendo el techo. Se puede observar la disminución de los desplazamientos a aumentar las distancias de separación, en este caso también se considera una coordenada vertical normalizada con origen en la unión entre el techo y la cáscara cilíndrica. Se puede apreciar que los desplazamientos hacia afuera del cilindro aumentan con la altura del punto considerado y las restricciones de desplazamiento que impone el apoyo del tanque en el suelo.

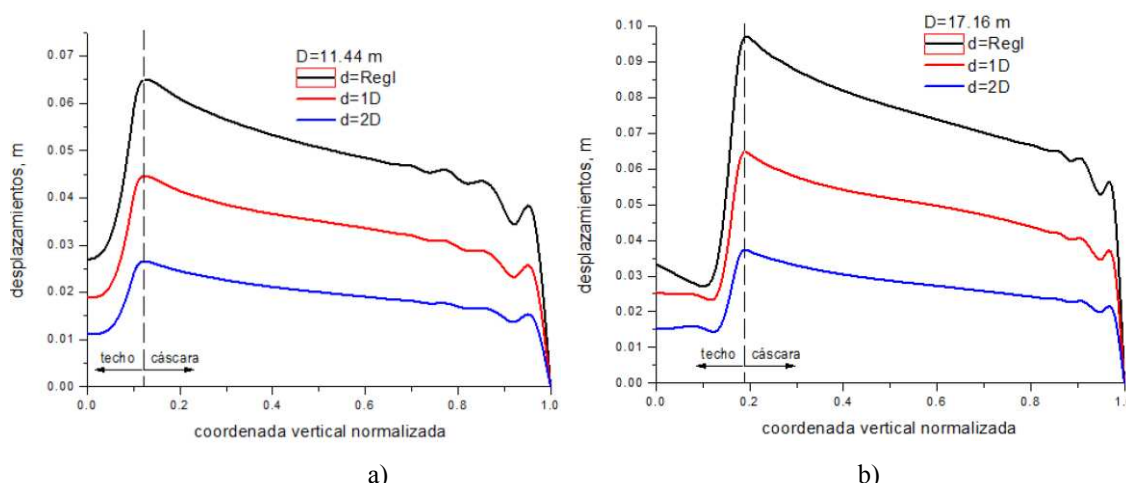


Figura 10: Efecto de la distancia de separación entre tanques sobre las deformaciones en el techo y la pared vertical enfrentada a la llama. A) $D=H=11.44$ m, b) $D=H=17.16$ m.

Los resultados obtenidos corresponden a la distribución de temperaturas del estado estacionario. Trabajos anteriores realizados por los autores (Jaca et al., 2016) han mostrado que para temperaturas inferiores a la máxima de estado estacionario aparecen problemas de inestabilidad del equilibrio que pueden comprometer la integridad de la estructura. Este

aspecto deberá ser estudiado posteriormente para una comprensión más completa de la problemática.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron los efectos termo-estructurales de las distancias de separación entre tanques adyacentes de almacenamiento de gasolina cuando se origina un incendio en uno de los tanques. Por medio de un riguroso modelo de transferencia de calor seguido de un análisis secuencial acoplado implementado en ABAQUS, se determinaron las magnitudes de temperatura, radiación, flujo neto de calor y grado de deformación provocado por efecto térmico sobre tanques adyacentes a la llama. Las simulaciones se realizaron para 4 distancias de separación y 2 diámetros de tanques.

Los resultados hallados indican que en un escenario de fuego con separaciones mínimas entre tanques, la radiación incidente sobre los tanques adyacentes a la llama se duplica con respecto a aquellos valores calculados para separaciones de un diámetro. En este caso, las temperaturas máximas alcanzadas son 200°C superiores a las correspondientes a separaciones de 1 diámetro. Las consecuencias térmicas sobre la estructura implican desplazamientos máximos en la unión del techo con la superficie cilíndrica 30% superiores a los observados con separaciones de 1 diámetro. Este porcentaje se incrementa cuando se consideran tanques de mayor diámetro.

Los desplazamientos que se producen para las temperaturas de estado estacionario con distancias reglamentarias entre los tanques estudiados son importantes, del orden de 0.7m a 1.0m según el diámetro del tanque. Esto puede afectar el comportamiento de la unión entre las cáscaras del techo y el cilindro que se diseña con una junta frágil bajo el concepto que el techo actúe como un fusible y se desprenda ante un aumento de la presión interior en el tanque producida por la acumulación de vapores inflamables. Ya que los mayores desplazamientos se producen en este sector del tanque, es probable que un desprendimiento del techo en la junta entre techo y envolvente favorezca la propagación de fuego entre tanques actuando como un evento secundario en el desarrollo de un efecto dominó.

Las temperaturas máximas alcanzadas sobre el tanque objetivo se reducen a un 75% cuando la distancia aumenta de 1D a 1.5D y 58% para separaciones de 2D. Las reducciones son más marcadas cuando aumenta el diámetro de los tanques. Un diseño de batería con distancias mayores a las reglamentarias reduce las posibilidades de propagación del evento primario de incendio de un tanque a los que lo rodean, puesto de manifiesto a través de la disminución de las temperaturas desarrolladas en los tanques circundantes y a los menores desplazamientos que se producen por efecto térmico.

REFERENCIAS

- Abbassi, M., Benhelal, E., Ahmad, A., Designing an Optimal Safe Layout for a Fuel Storage Tanks Farm: Case Study of Jaipur Oil Depot. *International Journal of Chemical, Nuclear, Metallurgical and Materials Engineering*, 2:157-165, 2014.
- Abaqus. Simulia. Unified FEA. Dassault Systems. Warwick, Rhode Island. USA, 2006
- API 650. Welded steel tanks for oil storage. *American Petroleum Institute*, 2010.
- Argenti, F., Landucci, G., Antonioni, G., Cozzani, V., Frequency Evaluation for Domino Scenarios Triggered by Heat Radiation Exposure. *Chemical Engineering Transactions*, 36:373-378, 2014.
- Babrauskas, V., Estimating Large Pool Fire Burning Rates. *Fire Technology*, 19:251-261, 1983.
- Chang, J. and Lin, C., A study of storage tanks accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19:51-59, 2006.
- Da Silva Santos and 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.
- EPA-UST 2015, *Underground Storage Tank (UST) Technical Compendium about the 2015 UST Regulations*. United States Environmental Protection Agency, USA, 2015
- Espinosa, S.N., Jaca, R.C. y Godoy, L.A., Incidencia del viento en la deformación térmica tanques de almacenamiento de combustible expuestos a fuego, *3º Congreso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio – 3ª CILASCI*, Porto Alegre, Brasil, 2015
- Espinosa, S.N. y Jaca, R.C., Transferencia de calor entre tanques de almacenamiento de combustibles expuestos a fuego. *Mecánica Computacional*, 34:135-149, 2016.
- Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, John Wiley & Sons, 2002.
- 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. *Mecánica Computacional*, 34:163-180, 2016.
- Liu, Y., Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire. PhD Thesis. Institute for Infrastructure and Environment, The University of Edinburgh, Scotland, 2011.
- Mansour, K.A., Fires in large atmospheric storage tanks and their effect on adjacent tanks. PhD Thesis. Loughborough University, London, United Kingdom, 2012.
- Mishra, K., Wehrstedt, K., Krebs, H., Lessons learned from recent fuel storage fires. *Fuel Processing Technology* 107:166–172, 2013
- Mudan, K.S. and Croce, P.A., 1988. Fire Hazard Calculations for Large Open. *Hydrocarbon Fires*. In the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1995.
- NFPA 30:2012, *Flammable and Combustible Liquids Code*. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, USA, 2012.
- Pritchard, M.J. and Binding, T. M., FIRE2: A New Approach for Predicting Thermal Radiation Levels from Hydrocarbon Pool Fires. *ICHEME Symposium*, 130:491-505, 1992.
- Rew, P.J., Hulbert, W.G., Deaves, D.M., Modelling of thermal radiation from external hydrocarbon pool fires. *Trans IChemE*, 75:81-89, 1997.
- Sengupta, A., Gupta, A.K., Mishra, I.M., Engineering layout of fuel tanks in a tank farm. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24:568-574, 2011.
- Sharma, R., Gurjar, B., Wate, S., Ghuge, S., Agrawal, R., Assessment of an accidental vapour cloud explosion: Lessons from the Indian Oil Corporation Ltd. accident at Jaipur, India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26:82-90, 2013.
- Thomas, P. H., The size of flames from natural fires, *9th Int. Combustion Symposium*, 844-859, 1963.