

COMPORTAMIENTO POSCRÍTICO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE SOMETIDOS A LA ACCIÓN DE VIENTO Y FUEGO

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

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

^bUniversidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina,
snespinosa@gmail.com

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

Palabras clave: Tanque, Viento, Fuego, Imperfecciones, Comportamiento poscrítico.

Resumen. Un escenario de incendio en una batería de tanques de almacenamiento de combustible presenta muchas variables involucradas que interaccionan entre sí y modifican la distribución de temperaturas que actúan sobre un tanque en particular. Los tanques adyacentes a otro en situación de incendio son susceptibles de daño estructural que puede contribuir al desarrollo de un efecto dominó involucrando a otros tanques en el incendio. En trabajos anteriores se analizó la existencia de viento actuando simultáneamente con fuego en un tanque, esta acción produce una inclinación de la llama y una modificación de la distribución de temperaturas sobre el tanque en estudio. Este trabajo plantea un análisis estructural de un tanque metálico considerando simultáneamente la acción del viento sobre la estructura y la distribución de temperaturas obtenida por transferencia de calor desde la llama inclinada por el viento. El tanque en estudio se modela por elementos finitos mediante un código de propósitos generales (ABAQUS) y se realiza un análisis no lineal geométrico con imperfecciones geométricas para evaluar el comportamiento poscrítico. El viento actuando sobre el tanque genera una deformada que actúa como una imperfección geométrica sobre la estructura perfecta que afecta el comportamiento poscrítico. Se consideran como imperfecciones geométricas las formas de modo asociadas a la carga térmica y viento, y además la deformada por acción del viento. En el análisis se incluye la variación de las propiedades mecánicas del acero con la temperatura. Para esta simulación de fuego estudiada, el comportamiento inestable se produce a temperaturas del orden de la mitad de las correspondientes al estado estacionario.

1 INTRODUCCIÓN

En las décadas pasadas han ocurrido varios accidentes catastróficos vinculados con incendios en la industria de procesos químicos y petroquímicos, como en Hertfordshire Oil Storage Terminal en el Reino Unido (Buncefield, 2008) y en Caribbean Petroleum Refining en Puerto Rico (Batista Abreu y Godoy, 2011), en los que se produjeron explosiones y fuego en tanques de almacenamiento de petróleo. Más recientemente en Argentina hubo incidentes del tipo en una destilería de YPF en Ensenada, La Plata, en 2013, y en Marlagüe, Mendoza, en 2014. El estudio de accidentes ocurridos en el pasado resulta de interés porque son una fuente de datos experimentales reales que es muy difícil obtener de otra manera aportando conocimiento sobre el inicio del incendio, características de las plantas donde se produjeron, materiales involucrados, estado final de estructuras existentes, entre otros. En la mayoría de estos eventos catastróficos, en general, está presente lo que se denomina “efecto dominó” vinculado a las características de propagación del incendio a la casi totalidad de la batería de tanques (Reniers y Cozzani, 2013). Las consecuencias resultan en pérdidas de vidas humanas, impacto ambiental y enormes pérdidas económicas.

Más de la mitad de los accidentes con incendios y explosiones se produjeron en baterías o granjas de tanques metálicos destinados al almacenamiento de petróleo y derivados (Chang y Lin, 2006). Modelar la falla de equipamiento o estructuras expuestas a fuego es una tarea muy compleja y requiere de un enfoque multi-disciplinario. Las fallas en los tanques están vinculadas a desperfectos en mecanismos, como puede ser las trabas de los techos flotantes, y/o pérdidas de integridad de la envolvente cilíndrica del tanque o en el techo, en general asociadas al pandeo de las cáscaras.

Landucci et al. (2009) modelaron el comportamiento mecánico estructural y el problema de transferencia de calor de manera aproximada, a fin de estimar probabilidades de ocurrencia de efectos tipo dominó. La radiación emitida por la llama y la radiación incidente sobre los tanques adyacentes es afectada por las dimensiones y diseño de los tanques y sus distancias de separación (Sengupta et al., 2011; Da Silva Santos y Landesmann, 2014). La llama se inclina por viento (Jiang and Lu, 2016), incrementando la velocidad de combustión y la radiación incidente sobre los tanques ubicados en tal dirección, con el consiguiente aumento de la temperatura superficial y de la vulnerabilidad estructural de los mismos. Liu (2011) consideró la transferencia de calor entre un fuego externo adyacente y un tanque, para representar la distribución de temperatura sobre la pared del tanque. Mansour (2012) realizó algunos ensayos en tanques de almacenamiento de pequeña escala calentando la parte exterior de la pared del tanque para simular un fuego adyacente. Mediante termocuplas se midieron temperaturas en la pared del tanque, líquido y en el espacio de vapor superior para evaluar la variación espacial y temporal de las temperaturas.

Trabajos previos de los autores permitieron representar la distribución de temperaturas obtenidas sobre un tanque en estudio proveniente de otro en situación de incendio mediante un modelo numérico de transferencia de calor (Espinosa y Jaca, 2016) y además se simuló la respuesta estructural del tanque estudiado bajo la acción del campo térmico generado previamente (Jaca et al., 2016).

En este trabajo se pretende evaluar el comportamiento pos-crítico de un tanque sin fluido en el interior expuesto a la acción del fuego proveniente de un tanque en situación de incendio cuya llama está inclinada por viento. Se considera simultáneamente la acción del viento y la distribución de temperaturas obtenidas por transferencia de calor desde el tanque con fuego desde la parte inferior. El análisis numérico se implementa en forma secuencial, de manera que en una primera etapa se determinan los perfiles de temperatura sobre el tanque en estudio a través de un modelo de transferencia de calor y posteriormente se estudia el pandeo de las

cáscaras que componen el tanque al ser sometido a ese campo térmico y viento.

La Sección 2 presenta una descripción del caso estudiado y en la Sección 3 se describen las cargas de viento y temperaturas usadas en el trabajo. Un análisis de la respuesta estructural de tensiones y deformaciones en el tanque para la combinación de cargas consideradas se muestra en la Sección 4 y en la Sección 5 un análisis de estabilidad del equilibrio evaluando el comportamiento poscrítico de la estructura.

2 CASO DE ESTUDIO

El incendio accidental de un tanque dentro de una batería de tanques de combustible es analizado utilizando un escenario simple. Se consideran dos tanques de iguales características geométricas separados entre sí por un diámetro, en uno de los tanques representado se origina la llama (tanque fuente) y el tanque sobre el que incide la radiación (tanque objetivo) es aquel en el que se analiza el comportamiento estructural. Ambos tanques tienen un diámetro $D = 11.44\text{m}$ y altura de la envolvente cilíndrica $H=11.44\text{m}$ y en el tanque en estudio se considera un techo cónico de altura $h=1.0\text{m}$, resultando una altura total del tanque de 12.44m . El espesor de la cáscara cilíndrica (t) es de 0.0064m ($1/4''$), diseñando en base a la norma [API 650 \(2010\)](#), y el techo presenta el mismo espesor. Las principales dimensiones del tanque se muestran en la Figura 1.

En este tipo de tanque suele disponerse un conjunto de vigas radiales y circunferenciales para otorgarle mayor rigidez a la cáscara cónica, estos elementos no se consideran en la modelación y para representar ese aporte de rigidez en el techo se modela el techo con una cáscara equivalente de mayor espesor. Un trabajo previo de los autores ([Burgos et al., 2015](#)) demostró que modelos con techo equivalente con espesores entre 2 y 5 veces el espesor de la cáscara tiene formas de modos similares a modelos con las vigas rigidizadoras en el techo. El mismo tanque fue estudiado para diferentes condiciones de llama por los autores ([Jaca et al, 2016](#)) concluyéndose que la modelación considerando un techo de espesor equivalente de tres veces el espesor del cilindro aporta resultados adecuados. En el presente trabajo también se considera un espesor equivalente de tres veces es el espesor de la envolvente cilíndrica del tanque.

El material constitutivo del tanque es acero A36 con un módulo de elasticidad (E) a 20°C de valor 201MPa y un coeficiente de Poisson (ν) de 0.3 . Como condición de apoyo se consideran apoyos fijos, con restricción de desplazamientos solamente.

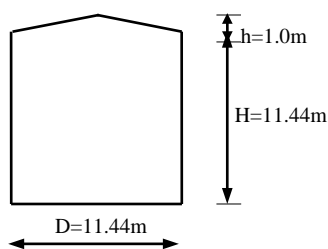


Figura 1: Dimensiones de tanque en estudio.

La determinación de la radiación es uno de los parámetros relevantes de la simulación y requiere representar en forma realista la geometría y radiación emitida por la llama mediante modelos rigurosos de transferencia de calor. La magnitud de la radiación incidente sobre un tanque adyacente depende principalmente del tipo y propiedades del combustible que se está quemando, de la geometría y distancias de separación de los tanques fuente y objetivo, y de la velocidad del viento que modifica la inclinación de la llama. Los resultados varían considerablemente de acuerdo a la posición de la llama primaria, la que normalmente se

origina en la superficie superior del tanque fuente y puede extenderse posteriormente a todo el tanque, radiando calor desde su base. Previamente se tuvieron en cuenta ambos casos para determinar los perfiles de temperatura sobre el tanque objetivo (Espinosa y Jaca, 2016). En el presente trabajo asumimos que la llama está actuando desde el nivel del suelo, a efectos de considerar la situación térmica más desfavorable.

El viento actuando sobre la llama produce una inclinación de la misma en la dirección del viento hacia el tanque en estudio. Para evaluar los parámetros geométricos de la llama se considera una velocidad del viento de 45 km/h que tiene una alta frecuencia de ocurrencia en la zona patagónica, la que por ser zona productora de petróleo, cuenta con un número considerable de baterías de tanques para almacenamiento de petróleo y derivados. La Figura 2 muestra la modelación considerada del tanque bajo fuego y el tanque objetivo. Mayores detalles sobre los parámetros geométricos de la llama y temperaturas máximas alcanzadas, se presenta en un trabajo previo (Espinosa y Jaca, 2016). Se supone que la llama se produce por combustión de gasolina.

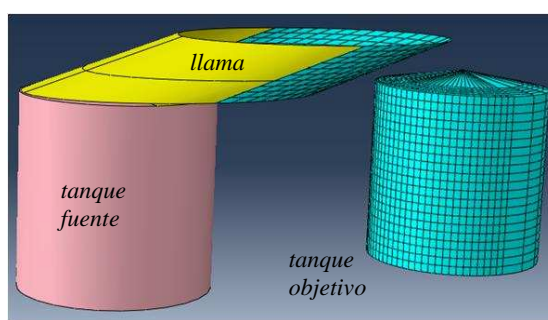


Figura 2: Simulación de situación de incendio.

3 EVALUACIÓN DE ACCIONES SOBRE EL TANQUE ESTUDIADO

En este análisis se considera simultáneamente la acción de viento actuando como una carga de presión sobre el tanque objetivo y la carga térmica generada por la llama inclinada por el viento en dirección al tanque objetivo.

3.1 Cargas de Viento

La distribución de presión de viento adoptada sobre el tanque es la correspondiente a las expresiones dadas por CIRSOC 102 (2005), considerando una distribución de presión constante en la dirección vertical. La distribución circunferencial aplicada en la cáscara cilíndrica de los coeficientes de presión (C_p) está dada por la siguiente expresión:

$$C_p = \sum_{i=0}^5 c_i \cos(i\theta) \quad (1)$$

con los siguientes coeficientes de Fourier: $C_0 = -0.5$, $C_1 = 0.4$, $C_2 = 0.8$, $C_3 = 0.3$, $C_4 = -0.1$ y $C_5 = -0.05$, donde θ es el ángulo con respecto a la dirección del viento. Los coeficientes de Fourier dados anteriormente son los usados como c_i en la Ec. (1). Las presiones externas se obtienen en base a

$$p = G C_p q_h \quad (2)$$

con un coeficiente de ráfaga $G=0.85$ y una presión dinámica (q_h) calculada a la altura h de la

envolvente cilíndrica, de valor 11.44m en este caso. La presión dinámica se calcula según la expresión

$$q_h = 0.613 K_h K_{zt} K_d I V^2 \quad (3)$$

donde V es la velocidad básica del viento expresada en [m/s] y q_h es la presión dinámica básica ejercida por el viento expresada en [N/m^2]. K_{zt} es el factor topográfico cuyo valor para terreno plano es $K_{zt}=1$, K_d es el factor de direccionalidad del viento, usado en combinación de cargas, adoptando en este caso el valor $K_d=1$, I es el factor de importancia, que adopta para Categoría III (Instalaciones petroquímicas o instalaciones para almacenamiento de combustible) el valor $I = 1.15$, y K_h es el factor de exposición a presión dinámica que para $h=11.44\text{m}$ toma el valor $K_h=1$, constante en altura. Para una velocidad de viento $V=12.5\text{m/s}$ equivalente a 45km/h, las presiones resultan

$$p = 93.63 C_p \quad (4)$$

expresadas en [N/m^2]. En la envolvente cilíndrica se considera la distribución de coeficientes de presión dadas por la ecuación (1) y para el techo cónico $C_p = -0.8$ en un sector angular denominado A en la zona a barlovento y en el resto del techo del tanque (Sector B) $C_p = -0.5$. De esta manera en la zona A la presión resulta una succión de valor $74.9\text{N}/\text{m}^2$ y $46.81\text{N}/\text{m}^2$ en el sector B. Sobre el cilindro las presiones se aplican como un campo predefinido en coordenadas cilíndricas según la ecuación (4) y en el techo como valores constante en cada sector. La Figura 3 muestra una representación esquemática de las presiones de viento sobre el tanque estudiado.

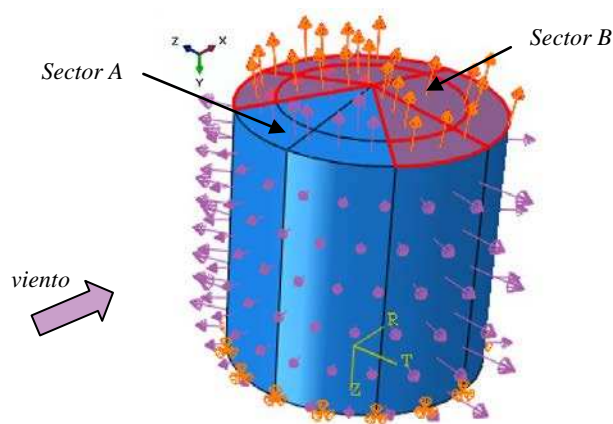


Figura 3: Presiones de viento sobre el tanque estudiado.

3.2 Cargas térmicas

Se ha observado experimentalmente que la combustión de hidrocarburos presenta dos zonas, una inferior de llama clara en la base del fuego y una zona superior de humo denso con porciones de llamas calientes emergiendo en forma intermitente (Mansour, 2012). La llama se representa a través del modelo de llama sólida bicapa mediante un cilindro elíptico inclinado por efecto del viento, dividido en dos zonas o capas que representan la llama clara inferior donde la combustión es más eficiente y la llama oscurecida por formación de humo, de menor eficiencia por la presencia de humo. El diámetro de la llama se asume igual al del tanque fuente donde se origina la misma (*pool fire*) y el resto de los parámetros geométricos se obtienen a partir de modelos empíricos como función del diámetro de la llama, velocidad de combustión del combustible y velocidad del viento, entre otros. Jaca et al. (2016) mostraron

que la condición más desfavorable se produce para llama actuado desde la base, para tener en cuenta la posibilidad de derrame del combustible encendido como se muestra en la Figura 4(a). De esta manera se considera que la superficie del tanque con fuego tiene las características de la llama clara, es decir que la llama rodea todo el tanque fuente adoptando su geometría y se eleva sobre el tanque con una inclinación que es función de la velocidad del viento. En la Figura 4(b) se muestran los parámetros característicos del modelo de llama inclinada, como la longitud total de la llama sobre el tanque fuente (L), la longitud de llama clara (L_c), el desplazamiento de la llama por el viento (D), las temperaturas de la llama clara ($T=933^\circ\text{C}$) y de la llama oscura ($T=662^\circ\text{C}$) y la inclinación de la llama correspondiente a una velocidad de viento de 45km/h . Estos valores son calculados en [Espinosa y Jaca \(2016\)](#).

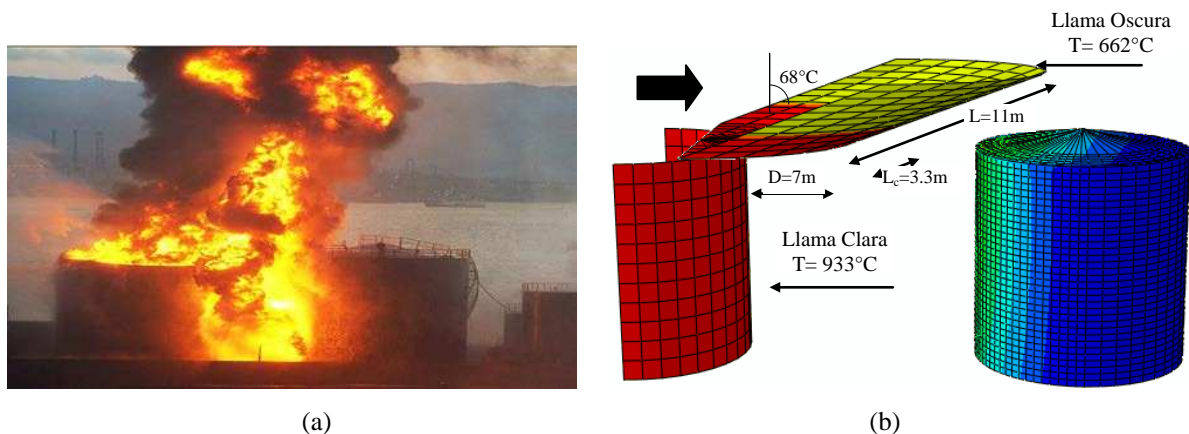


Figura 4: Caracterización de la llama, (a) Llama actuando desde la base del tanque, (b) Modelo de llama inclinada por viento.

La carga térmica neta resulta fundamentalmente del calor transferido desde la llama al tanque objetivo por radiación y convección. A medida que el tanque objetivo recibe la carga de calor, la cáscara se calienta y el calor se transfiere aumentando la temperatura del combustible y del aire en su interior. En este trabajo se considera que el tanque objetivo no contiene combustible líquido ya que estudios anteriores mostraron que ese escenario es el más desfavorable para la respuesta estructural de la cáscara.

En el análisis de transferencia de calor se tuvieron en cuenta las siguientes contribuciones para el tanque objetivo:

1. Conducción a través del acero.
2. Convección natural y forzada según el caso.
3. Intercambio de radiación entre llama-tanque-ambiente.
4. Radiación interna a través del aire interno.

Para hallar las distribución de temperaturas en el tanque objetivo se implementa un análisis de transferencia de calor en [ABAQUS-Simulia \(Dassault Systems, 2006\)](#). El estudio se plantea como un problema estacionario de transferencia de calor no acoplado incluyendo efectos de radiación de cavidad y convección. En la definición de radiación de cavidad es necesario identificar las superficies de la cavidad y las propiedades de radiación de cada superficie. En este estudio se usan elementos de cáscara lineales de transferencia de calor, cuadrangulares y triangulares de 3 y 4 nodos (DS3 y DS4) respectivamente. La superficie de la llama y del tanque objetivo es discretizada con estos elementos, indicando las superficies interior y exterior en cada caso para asignarle las correspondientes propiedades de convección y radiación externa e interna. El material de la cáscara es acero A36 con propiedades térmicas variables con la temperatura.

Como condición inicial se considera un campo predefinido de temperatura de valor 20°C sobre el tanque objetivo, aplicado como paso inicial. Como condición de borde se definen la temperatura de llama clara ($T=933^{\circ}\text{C}$), en los elementos del sector del tanque con fuego y la parte inferior de la llama inclinada por el viento, y la temperatura de la llama oscura ($T=662^{\circ}\text{C}$) en la parte superior de la llama, como se muestra en la Figura 4(b).

Las características de convección y radiación se consideran en ABAQUS como interacciones definidas en las superficies interior y exterior. Para la convección se definen los coeficientes de película en el interior y exterior de la pared del tanque objetivo. La radiación exterior se define como radiación de cavidad indicando la emisividad de la llama para la superficie de la llama y la emisividad del acero para el tanque objetivo. Las emisividades del acero A36 tabuladas en literatura varían entre 0.3 y 0.8, para superficies no oxidadas y oxidadas, respectivamente. En este trabajo se asume una emisividad de 0.8 para la superficie externa del tanque objetivo, considerando que el acero en contacto con las llamas se tizna y probablemente se oxida. Esto no ocurre con la superficie interna, para la cual se utiliza una emisividad de 0.3. Mayores detalles de los valores adoptados de coeficiente de película y características de la radiación se presentan en Espinosa y Jaca (2016).

La Figura 5 muestra la distribución de temperaturas obtenidas para el tanque objetivo en estado estacionario, se puede observar que la temperatura máxima es $T_{\max}=518.7^{\circ}\text{C}$ y se presenta en la parte superior de la envolvente cilíndrica y el techo, en la zona enfrentada con el tanque en llamas. Esta distribución térmica es usada posteriormente para realizar un análisis secuencial térmico- tensión para evaluar la respuesta estructural del tanque. En este estudio se considera el viento actuando simultáneamente con la carga térmica.

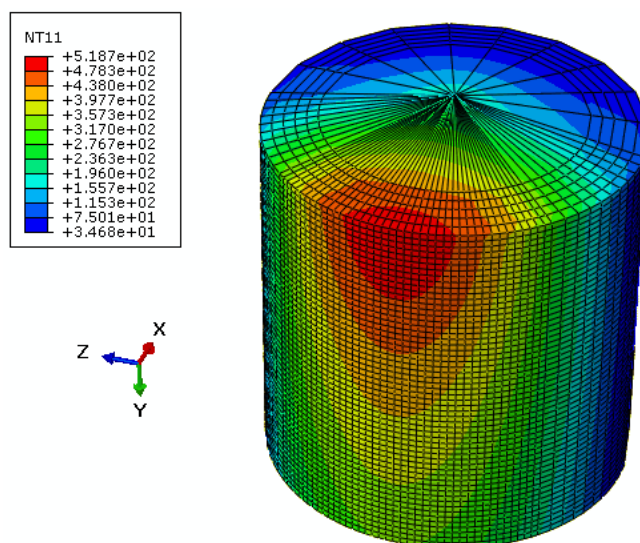


Figura 5: Distribución de temperaturas sobre el tanque en estudio para estado estacionario ($T_{\max}=518.7^{\circ}\text{C}$).

4 ANÁLISIS SECUENCIAL DE DEFORMACIONES Y TENSIONES

Se plantea un análisis secuencial multipaso para evaluar el estado de tensión-deformación en función de un campo de temperatura obtenido previamente debido a que la distribución de temperatura es independiente de la deformación estructural pero no a la inversa. El campo térmico se calcula en base al ítem 3.2 mediante un análisis no acoplado de transferencia de calor. Para el análisis de tensiones y deformaciones se considera que el viento se presenta simultáneamente con el incendio del tanque fuente de manera que se plantean dos pasos de

carga (*Step* en ABAQUS) sobre el tanque objetivo: un primer paso incluye la carga de viento calculada en el ítem 3.1 y un segundo paso, al final del paso previo, que incluye la carga térmica evaluada en función de la llama inclinada por el viento, en ambos casos se asume una velocidad de viento de 45km/h. Las temperaturas nodales se almacenan en el archivo de resultados del análisis de transferencia de calor y posteriormente son requeridas en el paso de carga térmica, como un campo predefinido que no cambia durante el análisis.

En el análisis térmico se incluyen propiedades térmicas del material variables con la temperatura, como la conductividad y el calor específico del acero. Cualquier propiedad mecánica tal como la elasticidad es ignorada en el análisis de transferencia de calor pero es necesaria para el análisis de tensión-deformación. La Tabla 1 muestra la variación del módulo de Elasticidad (E) del acero con la temperatura, estos valores son los usados en el análisis de tensión-deformación. El módulo de Poisson se toma constante con valor 0.3.

Temperatura (T) [°C]	Módulo de Elasticidad (E) [MPa]
0	201
20	201
100	201
200	180
300	160
400	140
500	120
600	62
700	26
800	18
900	13.5
1000	9
1100	4.5
1200	4.5

Tabla 1: Módulo de Elasticidad del acero variable con la temperatura.

El tanque objetivo es modelado con elementos de cáscara lineales de 3 y 4 nodos (S3R y S4R, definidos a través de los mismos nodos de la discretización usada en el procedimiento de transferencia de calor, compatibles con los elementos de transferencia de calor DS3 y DS4. Se realiza un análisis estático de tensiones y deformaciones con la carga de viento (Figura 3) y a continuación con las temperaturas nodales correspondientes al estado estacionario, mostrado en la Figura 5.

La Figura 6(a) muestra los desplazamientos en el tanque en estudio correspondientes al final del paso de carga de viento y la Figura 6(b) presenta los desplazamientos obtenidos al final del paso de carga térmica ($T_{\max}=518.7^{\circ}\text{C}$). Se puede observar que los desplazamientos hallados para la carga de viento de velocidad 45km/h son de muy bajo valor, en el techo $U_{\max}^{\text{techo}}=0.12\text{mm}$ y en el cilindro $U_{\max}^{\text{cilindro}}=0.033\text{mm}$, mientras que para las temperaturas de estado estacionario aplicadas posteriormente los desplazamientos máximos son del orden de 31,8mm concentrados en la parte superior de la envolvente cilíndrica y en el techo en el sector donde las temperaturas son mayores. Los desplazamientos en general se corresponden con una dilatación del material por la acción térmica y una inclinación en sentido contrario a la cara del tanque expuesta al fuego, como se muestra en la Figura 7 a través de los vectores desplazamientos.

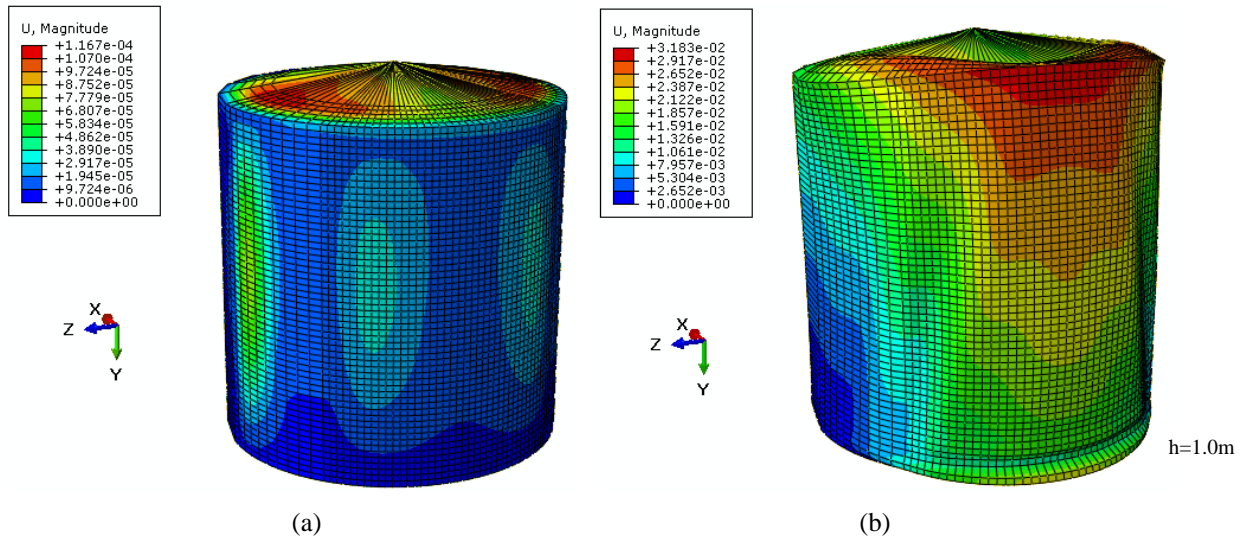


Figura 6: Desplazamientos del tanque en estudio, (a) Carga de viento (*Step 1*), (b) Carga térmica (*Step 2*), $T_{\max}=518.7^{\circ}\text{C}$.

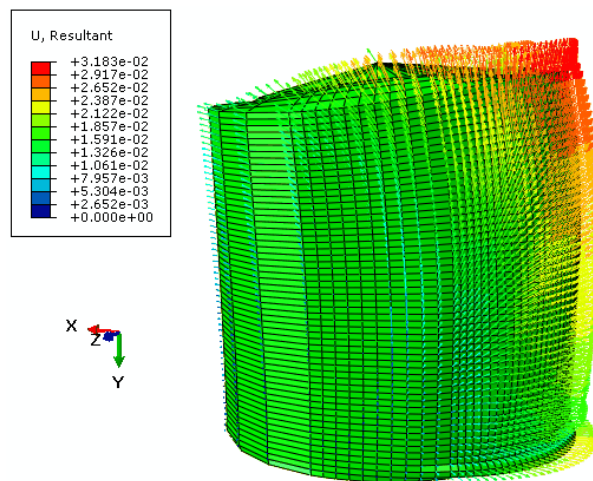


Figura 7: Vectores desplazamientos en tanque en estudio para temperaturas máximas.

La Figura 8 muestra las tensiones circunferenciales (S11) y axiales (S22) halladas en la cáscara, se observa que los mayores valores de tracción o compresión se producen en la zona que enfrenta el fuego próximo al apoyo, a barlovento. La Figura 9 muestra las tensiones de Von Mises, considerando una tensión de fluencia de $\sigma_f=215\text{MPa}$. Se observa que solamente aparecen deformaciones plásticas en la zona inferior del tanque cerca del apoyo donde las tensiones toman los mayores valores. El resto del tanque se mantiene en estado elástico.

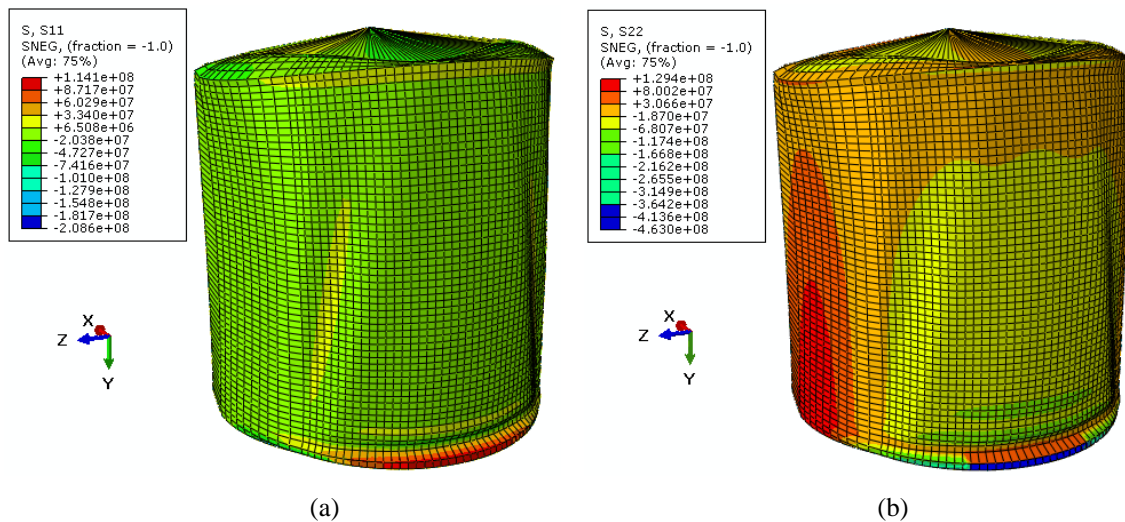


Figura 8: Tensiones en el tanque en estudio bajo carga de viento y temperatura [Pa],
 (a) Tensiones circunferenciales (S11), (b) Tensiones axiales (S22).

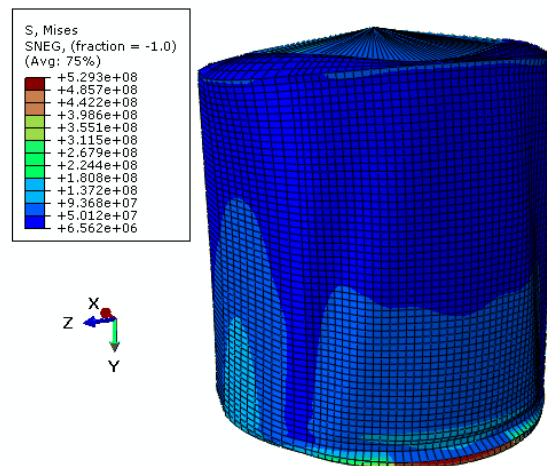


Figura 9: Tensiones de Von Mises en el tanque en estudio bajo carga de viento y temperatura ($\sigma_f=215\text{MPa}$).

5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL EQUILIBRIO

El estudio comprende la evaluación de cargas críticas y formas de modo asociadas mediante un análisis de bifurcación lineal (LBA) en una primera instancia para tener una referencia de los valores a los que pueden aparecer problemas de inestabilidad del equilibrio. Además, se realiza un análisis no lineal geométrico con imperfecciones geométricas (GNIA) por el método de Riks (1972, 1979) para obtener una mejor evaluación de la respuesta de la estructura, exhibiendo el comportamiento poscrítico. Este método permite descubrir la trayectoria de equilibrio planteando un incremento de carga automático en una escala normalizada donde un estado de carga determinado es incrementado proporcionalmente.

5.1 Análisis de Bifurcación Lineal

La estimación de cargas críticas de pandeo elástico se realiza mediante un análisis de autovalores y autovectores para estructuras en las que la respuesta pre-crítica es casi “lineal”. La carga crítica se calcula como un multiplicador del estado de carga base, considerando en este caso la distribución de carga térmica evaluada mediante el modelo de transferencia de

calor.

La temperatura crítica de pandeo se considera como la temperatura a la cual la estructura pande, obtenida en base a un análisis de autovalores y autovectores y planteado en la siguiente expresión

$$\left(\mathbf{K}_0 + \lambda^C \mathbf{K}_G \right) \Phi^C = 0 \quad (5)$$

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

$$T^C = \lambda^C T_{max} \quad (6)$$

La Figura 10 muestra el primer modo crítico obtenido para el tanque bajo la acción del campo térmico resultante de llama actuando desde la base del tanque e inclinada por el viento, con la carga de viento aplicada en el paso previo. El primer autovalor es de valor $\lambda^C=0.565$, que permite obtener a través de la Ecuación (6) una temperatura crítica $T^C=293^\circ\text{C}$. Se observa que la forma de modo presenta deformaciones en el cuerpo cilíndrico del tanque similar a lo hallado en otros trabajos previos. El valor de temperatura crítica hallada en este caso es mayor que las halladas previamente para el mismo tanque, el motivo puede estar asociado a la carga de viento aplicada previamente que genera desplazamientos a barlovento de sentido contrario a la dilatación que aparece en el tanque por acción del campo térmico. En los cálculos previos no se consideraba la variación de las propiedades mecánicas con la temperatura. Ambas condiciones afectan la matriz \mathbf{K}_G que tiene en cuenta las tensiones previas al estado crítico.

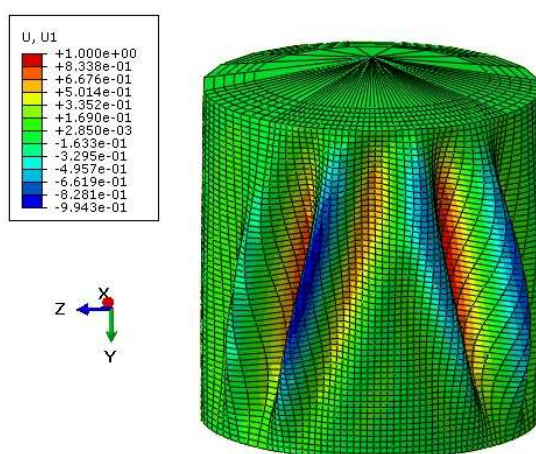


Figura 10: Primer modo crítico para el tanque en estudio bajo carga térmica, con paso previo de carga de viento ($\lambda^C=0.565$, $T^C=293^\circ\text{C}$).

5.2 Análisis No Lineal Geométrico con Imperfecciones (GNIA)

El análisis no lineal geométrico con imperfecciones implementado a través del método de Riks (1972, 1979) permite predecir un comportamiento inestable de la estructura y colapso aportando información más completa que el análisis de autovalores y autovectores. Este

método permite obtener trayectorias de equilibrio estático no lineales en una fase inestable de la respuesta estructural, en el que la carga y/o desplazamiento pueden disminuir cuando la solución evoluciona. Se usa cuando la magnitud de la carga se puede expresar en función de un parámetro escalar de carga de manera que a medida que la carga aumenta proporcionalmente al parámetro, se va descubriendo la solución como una trayectoria de equilibrio simple en el espacio definido por las variables nodales y el parámetro de carga.

El método permite considerar un estado base (P_0) previo a la aplicación de la carga variable que se incrementa desde un valor inicial nulo en función del parámetro λ

$$P = P_0 + \lambda(P_{ref} - P_0) \quad (7)$$

En este caso se considera como estado básico la carga de viento y como estado de referencia la distribución de temperaturas obtenidas mediante transferencia de calor, que aumenta según el parámetro λ .

Imperfección geométrica según deformada de viento (V=45km/h)

El análisis no lineal geométrico con incorporación de imperfecciones (GNIA) permite determinar valores de temperaturas más precisas y reales debido a que las estructuras no son geoméricamente perfectas y se facilita el cambio de trayectoria fuera de la trayectoria fundamental. El viento actuando sobre el tanque previamente a la acción del fuego genera una deformada que funciona como imperfección geométrica con respecto a la geometría perfecta de las cáscaras que conforman el tanque.

Las figuras 11 y 12 muestran los resultados obtenidos considerando una imperfección geométrica generada por la acción del viento y seguido del análisis de seguimiento de trayectoria para un estado base de la carga térmica amplificada por el parámetro λ , que varía proporcionalmente desde un valor nulo hasta el máximo dado por las temperaturas correspondientes al estado estacionario. Se analiza la respuesta estructural en base al desplazamiento de los nodos A, B, C y D distribuidos en diferentes puntos de la superficie, como se muestra en la Figura 11. Los nodos A y B están ubicados en la zona donde las temperaturas son mayores, uno en el techo (Nodo A) y el otro en la parte superior del cilindro (Nodo B). Los otros nodos están ubicados en el sector próximo al apoyo donde los desplazamientos son de mayor valor. La Figura 12(a) muestra las trayectorias de equilibrio obtenidas para las componentes de desplazamiento en sentido perpendicular al meridiano a barlovento (U_1) que son los más representativos en el sector que enfrenta la carga de fuego, en los nodos estudiados.

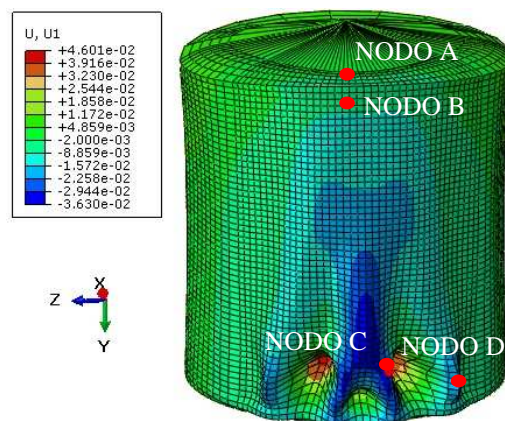


Figura 11: Deformada de tanque para carga térmica con $\lambda=0.50$ ($T^C=259^\circ\text{C}$) y viento previo

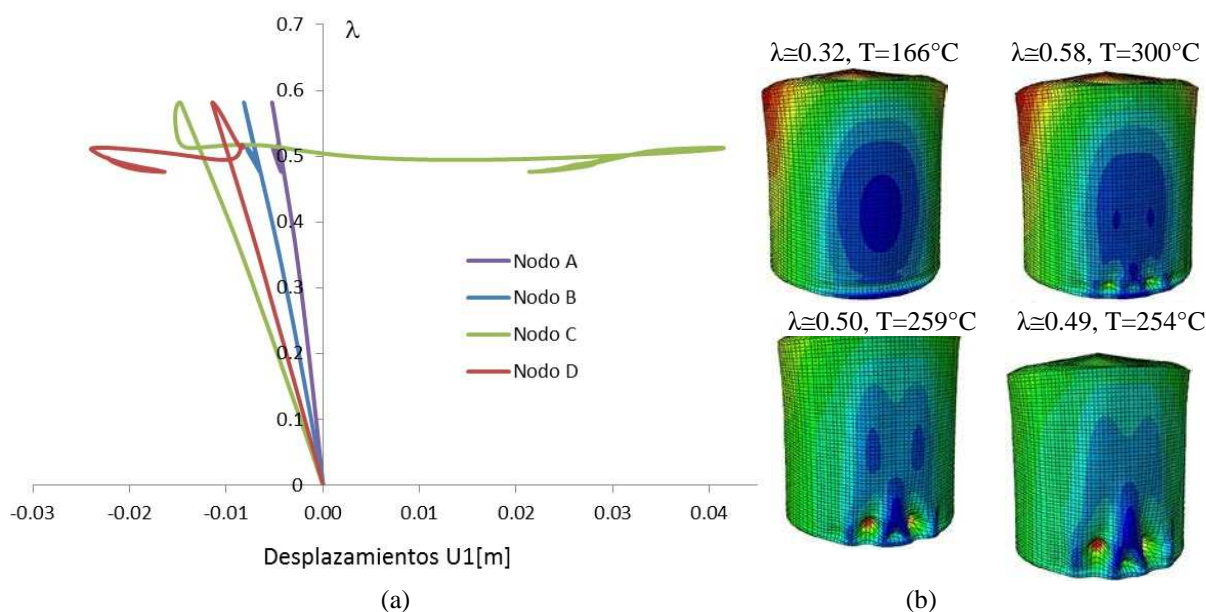


Figura 12: Tanque vacío con llama inclinada por viento y fuego desde la base, con carga previa de viento ($V=45\text{km/h}$) (a) Trayectorias de equilibrio, (b) Deformadas para diferentes valores del parámetro de carga.

El parámetro de carga (λ) alcanza un valor máximo de 0.589, levemente mayor al primer autovalor ($\lambda^C=0.565$), que se corresponde con una temperatura $T=305^\circ\text{C}$, a partir de ese valor sigue una trayectoria secundaria inestable en la que el parámetro disminuye hasta valores de $\lambda=0.5$ aproximadamente cambiando a otra trayectoria terciaria también inestable. Esto se puede observar más claramente en la trayectoria del nodo C. La inestabilidad del equilibrio se produce antes que las temperaturas lleguen al estado estacionario cuya temperatura de referencia máxima es 518.7°C . Para el valor máximo del parámetro aparecen algunas deformaciones plásticas muy próximas al apoyo en sector a barlovento, el resto del tanque permanece con tensiones mucho más bajas.

La Figura 12(b) presenta algunas deformadas que representan la evolución de los desplazamientos a lo largo de la trayectoria de equilibrio. Al inicio de la trayectoria fundamental casi lineal, los desplazamientos son muy pequeños y al llegar el parámetro a un valor 0.32 ($T=166^\circ\text{C}$) aproximadamente el tanque comienza a dilatarse con desplazamientos hacia arriba y hacia afuera de la cáscara. A partir de final del tramo casi lineal ($\lambda=0.58$ y $T=300^\circ\text{C}$) comienzan a aparecer deformaciones más concentradas en las cercanías del apoyo que se van acentuando a medida que el parámetro sigue la trayectoria inestable hasta llegar a $\lambda=0.50$ y $T=259^\circ\text{C}$. Posteriormente las deformaciones se extienden hacia arriba del tanque en la cara que enfrenta el fuego con valores del parámetro de carga que se mantiene en 0.49 con $T=254^\circ\text{C}$.

Es decir, que a pesar que la magnitud de las imperfecciones generadas por un viento de 45km/h es muy pequeña (Figura 6(a)) se produce en la cáscara un comportamiento inestable a temperaturas inferiores a las correspondientes al estado estacionario.

Imperfección geométrica con forma de primer modo crítico para carga térmica

Como otra alternativa de evaluación de la estabilidad estructural, se considera que pueda existir previamente a la acción de viento una imperfección geométrica con la forma del primer modo de pandeo, ya que según la teoría de estabilidad del equilibrio esa forma de imperfección es la que origina una mayor disminución de la carga máxima resistida por la estructura. Es decir que se considera una modificación de la geometría perfecta con la forma

del primer modo mostrado en la Figura 10 que se afecta por diferentes amplitudes (ξ). La acción del viento se superpone con la imperfección modal y a partir de esa deformada total se amplifica la carga térmica en función del parámetro λ . En este caso se representa el desplazamiento de los nodos E y F indicados en la Figura 13 y 14, en función del parámetro λ , estos nodos presentan desplazamientos importantes en la primera forma de modo.

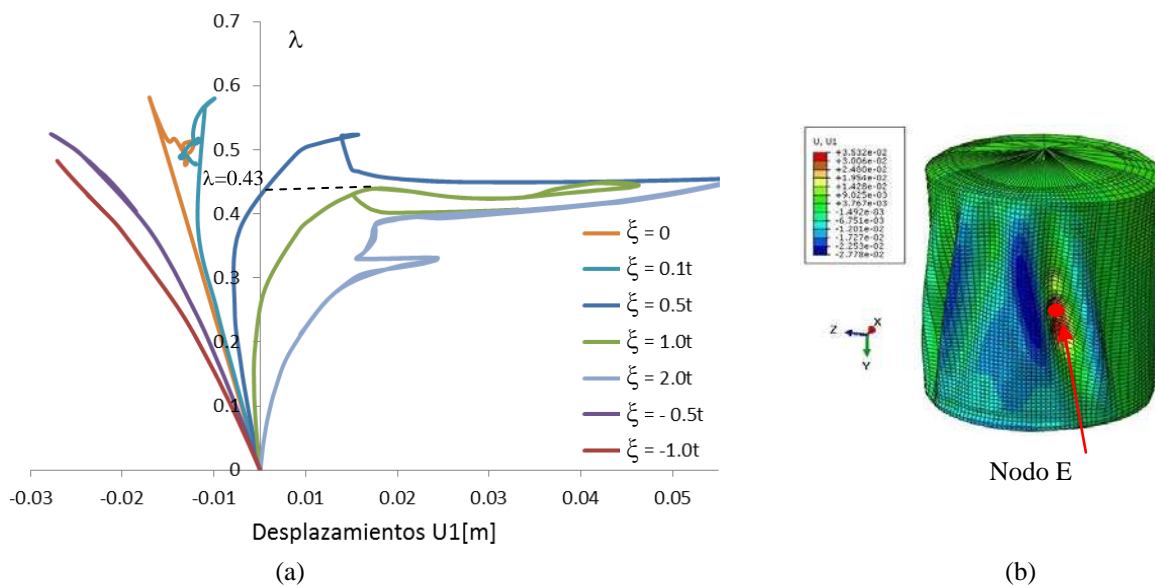


Figura 13: Análisis con carga previa de viento ($V=45\text{km/h}$) e imperfección con forma de primer modo para carga térmica en Nodo E, (a) Trayectorias de equilibrio, (b) Deformada para $\lambda=0.43$ ($T=223^\circ\text{C}$) con $\xi=1.0t$.

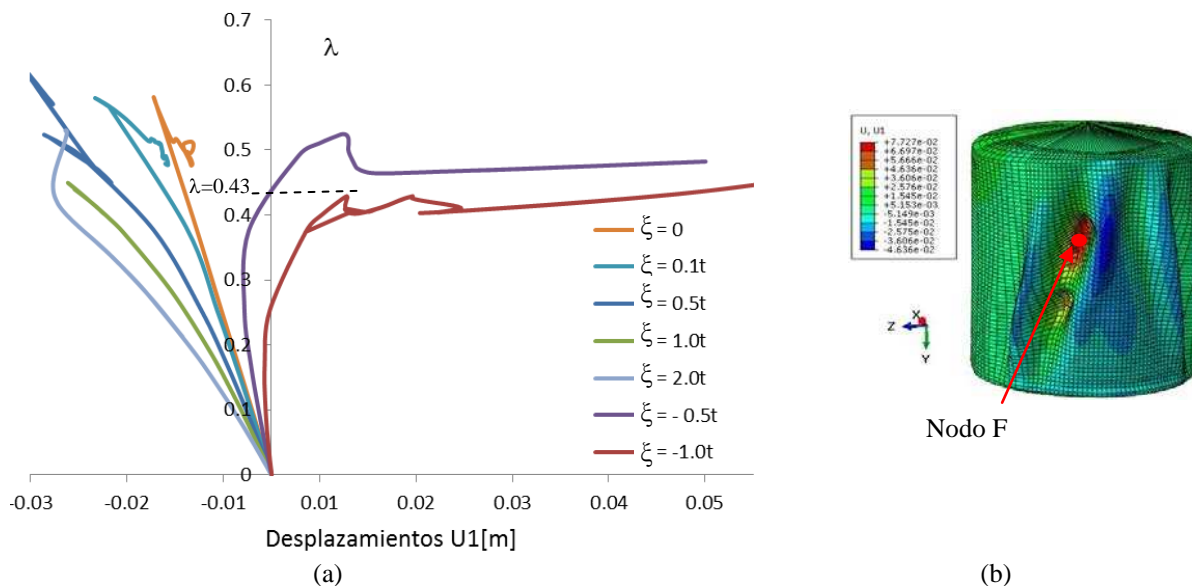


Figura 14: Análisis con carga previa de viento ($V=45\text{km/h}$) e imperfección con forma de primer modo para carga térmica en Nodo F, (a) Trayectorias de equilibrio, (b) Deformada para $\lambda=0.43$ ($T=223^\circ\text{C}$) con $\xi= -1.0t$.

En el análisis de seguimiento de trayectoria por el método de Riks se consideran amplitudes de imperfección (ξ) variables expresadas en función del espesor (t) de la cáscara cilíndrica. Se consideraron valores de amplitud de imperfección de $0.1t$, $0.5t$, $1.0t$ y $2.0t$ aplicadas en el sentido del modo crítico (valores positivos de imperfección) y en sentido contrario (valores negativos de imperfección). El valor nulo de amplitud de imperfección corresponde al estudio anterior teniendo en cuenta solamente la carga de viento sobre el

tanque, previo a la aplicación gradual de la temperatura.

En todas las trayectorias se alcanza un valor máximo que va disminuyendo con la magnitud de imperfección con una trayectoria descendente, inestable en las primeras etapas del comportamiento pos-crítico. Se puede observar que al aumentar la magnitud de imperfección la trayectoria fundamental deja de ser casi lineal y para una amplitud de $\xi=1.0t$ alcanza el valor máximo de $\lambda=0.43$ correspondiente a $T=223^{\circ}\text{C}$, para amplitudes mayores la curva que representa la respuesta estructural cambia de forma debido a que la estructura se aleja demasiado de la geometría perfecta. Este comportamiento se puede apreciar en las figuras 13(a) y 14(a) correspondientes a los nodos E y F respectivamente.

Las figuras 13(b) y 14(b) muestran las deformadas asociadas al valor máximo del parámetros de carga $\lambda=0.43$ para una amplitud de imperfección $\xi=1.0t$ y $\xi=-1.0t$ respectivamente. Las deformadas en estos casos involucran todo el sector de la envolvente cilíndrica con leves deformaciones próximas al apoyo, en la zona que enfrenta el fuego.

En este escenario analizado combinando viento, imperfección con forma de modo crítico para carga térmica y carga térmica variable, se obtiene un comportamiento inestable a menores temperaturas que sin no se incluye en el análisis la imperfección inicial modal.

Imperfección geométrica con forma de primer modo crítico para carga de viento

Dado que en el estudio se incluye carga de viento se incorpora una evaluación de la respuesta estructural considerando como imperfección la primera forma de modo para carga de viento, que para este tanque es la mostrada en la Figura 15.

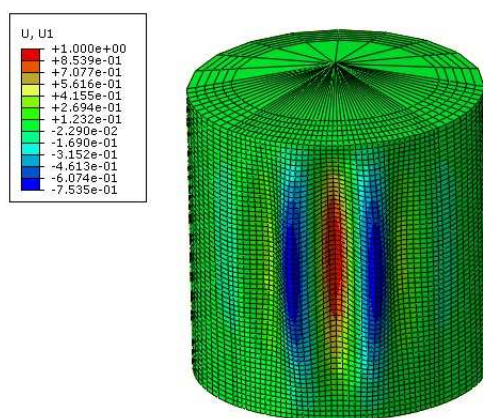


Figura 15: Primer modo crítico para carga de viento.

Se realiza un análisis de Riks considerando una imperfección geométrica asociada al primer modo crítico por acción de viento y la carga de viento actuando sobre el tanque previamente a la carga térmica variable según el parámetro λ .

Se consideran diferentes magnitudes de imperfección, como en el caso anterior, pero en este caso la respuesta hallada para las diferentes amplitudes resulta independiente e esta amplitud. La Figura 16(a) muestra las trayectorias de equilibrio para una magnitud de imperfección $\xi=0.1t$ para algunos de los nodos evaluados anteriormente, se obtiene resultados iguales para amplitudes de valor hasta 2.0t.

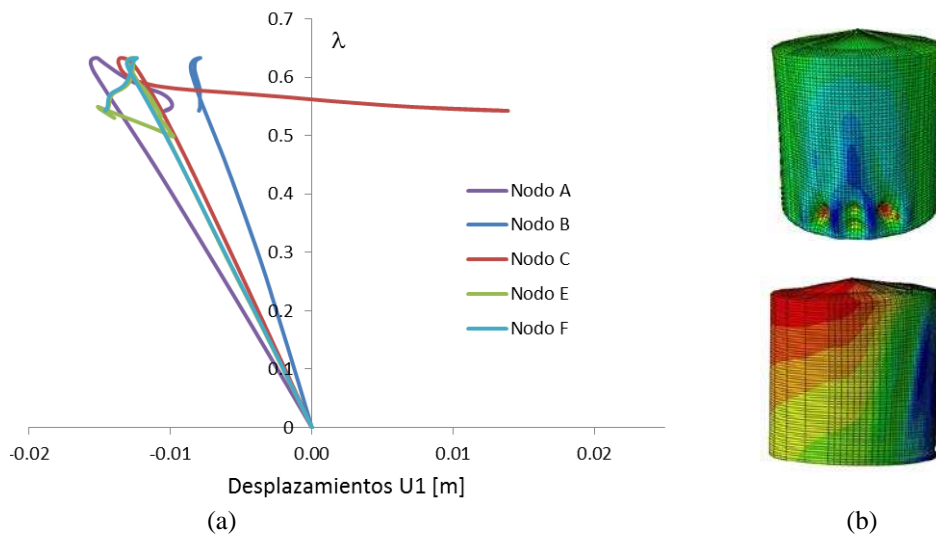


Figura 16: Análisis con carga previa de viento ($V=45\text{km/h}$) e imperfección con forma de primer modo para carga de viento con $\xi=0.1t$, (a) Trayectorias de equilibrio, (b) Deformadas para $\lambda=0.53$ ($T=275^\circ\text{C}$), vista frontal y lateral.

Estas curvas son similares a las halladas sin tener en cuenta la imperfección con la forma del primer modo de viento como lo mostrado en la Figura 13(a). La Figura 16(b) muestra las deformadas obtenidas para un valor del parámetro $\lambda=0.53$ ($T=275^\circ\text{C}$), produciéndose en este escenario también las mayores deformaciones concentradas en el sector próximo al apoyo en la cara frente al fuego.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una evaluación de un tanque en situación de incendio con fuego proveniente de otro tanque de iguales dimensiones separados un diámetro. Se considera la acción simultánea de viento y fuego cuya llama está inclinada por el viento hacia el tanque estudiado. La carga térmica es evaluada mediante un modelo de transferencia de calor, en estado estacionario no acoplado. Se realiza un análisis secuencial de carga térmica-tensiones incluyendo la acción del viento y un análisis de inestabilidad del equilibrio.

Para el estado térmico estacionario se obtienen deformadas compatibles con una dilatación global del tanque y una inclinación hacia los sectores con menor temperatura. Las tensiones en el tanque son menores a las correspondientes a un comportamiento plástico del material salvo en el sector muy cercano al apoyo frente al fuego donde las tensiones toman mayores valores por las restricciones impuestas por el apoyo.

El pandeo se produce a una temperatura inferior al estado estacionario y en la evaluación del comportamiento pos-crítico se obtienen trayectorias inestables para imperfecciones asociadas a la acción del viento actuando sobre el tanque para una temperatura del orden de 275°C . En un escenario en el que además se considera una imperfección con la forma del primer modo crítico para carga térmica combinada con viento la respuesta inestable se produce a temperaturas aun menores, del orden de 223°C que es la mitad de la temperatura de estado estacionario.

La combinación de estas acciones, viento y carga térmica, genera sobre la estructura una condición desfavorable respecto a la posibilidad de daño estructural o colapso. El caso estudiado corresponde a un tanque sin combustible líquido en el interior y está orientado a evaluar daño estructural. Trabajos posteriores deberían incluir también la acción del fluido para estimar la posibilidad que el daño estructural favorezca la propagación a otros tanques

ante la posibilidad que la integridad estructural del cuerpo del tanque resulte afectada. En ese escenario, el daño estructural formaría parte del mecanismo de escalada en accidentes que involucran un efecto dominó en su desarrollo.

Agradecimientos: Este trabajo fue realizado con subsidios de Universidad Nacional del Comahue, SECYT/Universidad Nacional de Córdoba y CONICET (PIP 0126).

REFERENCIAS

- ABAQUS. *Simulia. Unified FEA*. Dassault Systemes. Warwick, Rhode Island. USA, 2006
- API 650. Welded steel tanks for oil storage. *American Petroleum Institute*, 2010.
- Batista-Abreu, J.B. y Godoy, L.A., Investigación de causas de explosiones en una planta de almacenamiento de combustible en Puerto Rico, *Rev. Int. Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 11: 109-118, 2011.
- Buncefield Major Incident Investigation Board (2008). “The Buncefield Incident, 11 December 2005”, The final report of the Major Incident Investigation Board, Vol. 1, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom.
- Burgos, C., Batista-Abreu, J., Calabró, D., Jaca, R.C. and Godoy, L.A., Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder. *Thin Walled Structures*, 91:29-37, 2015.
- Chang, J.I. and Lin, Ch., A study of storage tanks accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18:51-59, 2006.
- 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. *Mecánica Computacional*, 34:135-149, 2016.
- Jiang P. and Lu S., Pool fire mass burning rate and flame tilt angle under crosswind in open space. *Procedia Engineering*, 135: 261-274, 2016.
- 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.
- Landucci, G., Gubinellia, G., Antonioni and G., Cozzani, V., The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Analysis and Prevention*, 41:1206–1215, 2009.
- Liu, Y., Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire, Phd Thesis, The University of Edinburgh, 2011.
- Mansour, K.A., Fires in large atmospheric storage tanks and their effect on adjacent tanks, Phd Thesis, Loughborough University, 2012.
- Reniers, G. and Cozzani, V., *Domino Effects in the Process Industries. Modeling, Prevention and Managing*, Elsevier, 2013.
- Riks, E., An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, *International Journal of Solids and Structures*, 15:529-551, 1979.
- Riks, E., The application of Newton’s method to the problem of elastic stability, *Journal of Applied Mechanics*, 39:1060-1065, 1972.
- 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.