

## EVALUACIÓN DE FALLAS EN EL TUBO DE FUEGO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

### EVALUATION OF FAILURES IN THE FIRE TUBE OF HEAT EXCHANGERS

Noemí Subelza<sup>a</sup>, Horacio D. Calabró<sup>a</sup>, Carlos Burgos<sup>a</sup>, Alejandro Aguilera<sup>a</sup>,  
Rossana C. Jaca<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén Argentina,  
sube\_09@outlook.com, [daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar](mailto:daniel.calabro@fain.uncoma.edu.ar), [carlosburgoss@hotmail.com](mailto:carlosburgoss@hotmail.com),  
[alejandroeaguilera@outlook.com](mailto:alejandroeaguilera@outlook.com), [rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar](mailto:rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar)

**Palabras clave:** Tubos de Fuego, Elementos Finitos, Pandeo Térmico, Fisuras.

**Resumen.** Las plantas industriales asociadas a la actividad petrolífera poseen equipos que pueden sufrir daños que afectan su funcionalidad o integridad. Recientemente se han detectado fallas en intercambiadores de calor usados para aumentar la temperatura de fluidos y separar componentes. Estos equipos son recipientes a presión que contienen un tubo de fuego (TDF) en su interior, por el que circulan gases de combustión producidos por un quemador. En este trabajo se estudian tres TDF de distintas geometrías en los que se presentan daños asociados a las condiciones de servicio. Los TDF se modelan por elementos finitos evaluando tensiones para diferentes distribuciones de temperatura y el pandeo térmico mediante un análisis de bifurcación lineal (LBA). Inspecciones visuales pusieron en evidencia grandes deformaciones localizadas y fisuras en las soldaduras de unión de los tubos con las placas rigidizadoras. Un estudio metalográfico permite inferir que el acero estuvo sometido a temperaturas superiores a las de trabajo del material. El análisis de tensiones confirma una concentración de tensiones en la zona de fisuras. La comparación de modos de pandeo con las excesivas deformaciones en el tubo indica la importancia de controlar las temperaturas alcanzadas en el tubo y reducir el depósito de impurezas en la cara externa del tubo por evaporación de superficie.

**Keywords:** Fire Tubes, Finite Elements, Thermal Buckling, Cracks.

#### Abstract.

Industrial facilities linked to oil activity have equipment which can bear damage that affects their functionality or integrity. Recently, failures have been detected in heat exchangers used to increase the temperature of fluids and to separate components. This equipment are pressure vessels that contain a fire tube inside, through which combustion gases produced by a burner circulate. This paper presents the study of three fire-tubes of different geometries in which damages associated with service conditions. The fire-tubes are modeled by finite elements for different temperature distributions, evaluating stresses and thermal buckling using a linear bifurcation analysis (LBA). Visual inspections revealed large localized deformations and cracks in the welds joining the tubes with the stiffening plates. A metallographic study allows us to infer that the steel was subjected to temperatures higher than the working temperatures of the material. The stress analysis confirms a stress concentration in the crack zone. The comparison of buckling modes with the excessive deformations in the tube indicate the importance of controlling the temperatures reached in the tube and reduce the deposit of impurities on the external face of the tube by surface evaporation.

## 1 INTRODUCCIÓN

La actividad hidrocarburífera en Argentina presenta una importante expansión vinculada al desarrollo de reservorios de baja permeabilidad, llamados hidrocarburos no convencionales. Ante esta demanda creciente existe equipamiento que opera en condiciones extremas con posibilidad de que se produzcan fallas en algunos componentes. Los intercambiadores de calor son usados para emulsiones de petróleo y agua reduciendo el contenido de agua a límites aceptables para su posterior refinación. Los mecanismos usados son calor, segregación por gravedad, aditivos químicos o corriente eléctrica.

Existen reportes de fallas en los tubos de fuego (TDF) dispuestos en el interior de los intercambiadores de calor. El TDF está en contacto con el fluido en la superficie exterior, mientras que, en la superficie interior, un quemador brinda el calor necesario para aumentar la temperatura del petróleo y separar el agua. Entre los daños reportados en tubos de fuego se pueden detallar la presencia de fisuras que generalmente se produce en las uniones soldadas, formación de incrustaciones producto del depósito que se produce sobre la superficie exterior del tubo en contacto con la mezcla de petróleo, agua, gas y otros subproductos (Zangeneh et al., 2020). Srivastava y Katarki (2009) analizaron el colapso de tubo de fuego usado en la industria del gas y del petróleo indicando que las temperaturas excesivas (540–1095°C) resultaron en corrosión por oxidación interna lo que provocó la falla. Del análisis cristalográfico observaron grietas intercrystalinas que provocaron una reducción del espesor. Simulaciones numéricas por elementos finitos fueron realizadas por Rueda et al. (2016) para analizar pandeo por temperatura en tuberías y validar datos experimentales. Patil y Anand (2017) evaluaron fatiga térmica en un recipiente a presión mostrando diversos modos de falla.

En este trabajo se analizan tres tubos de fuego con daños localizados para intentar discernir las posibles causas que los produjeron. En uno de los casos se presentan fisuras en la unión de una chapa rigidizadora con las paredes del tubo y en los otros dos se produjeron excesivas deformaciones en un sector localizado en el tramo sometido a las mayores temperaturas, en las proximidades del quemador. Steimbregger y Zalazar (2022) analizaron la microestructura del acero indicando evidencia de crecimiento de grano excesivo, congruente con la exposición a temperaturas elevadas. Se realiza una modelación numérica para evaluar tensiones y deformaciones para acción térmica y presión exterior y también un análisis de bifurcación lineal (LBA) para determinar las temperaturas a las que puede producirse pandeo térmico.

## 2 CASOS DE ESTUDIO

En este trabajo se estudian tres tubos de fuego de geometrías variables que forman parte de intercambiadores de calor utilizados en la industria del petróleo. Dos de ellos son usados para separar petróleo del agua contenida en el producto del proceso de extracción mientras que el otro forma parte de un equipo de regeneración de glicol, utilizado para calentar una mezcla de glicol y agua que circula por el exterior. Estos TDF poseen un quemador conectado en uno de los extremos que aplica una llama directa en el interior de tubo y mediante un proceso de transferencia de calor cambia la viscosidad del fluido que los rodea para poder separar los diferentes componentes. La Figura 1a muestra una de las geometrías de los TDF (Caso 2) para separar petróleo del agua y la Figura 1b se presenta el TDF de la glicolera (Caso 3). El otro caso estudiado (Caso 1) es similar en su forma al mostrado en Figura 1(a) pero con una longitud total de 8.30 m, un diámetro de 0.508m (20") y un espesor de chapa de 0.02018m. El tubo se une al intercambiador de calor mediante una brida abulonada que permite considerar esta conexión como un apoyo empotrado. En el interior del intercambiador, el tubo de fuego se apoya sobre soportes internos con rodillos que facilitan el montaje del tubo en su interior. Para la modelación del tubo de fuego, los apoyos internos se consideran como apoyos simples o dobles según su

disposición en el interior del intercambiador de calor. En el TDF de la glicolera el quemador se ubica a  $45^\circ$  del eje vertical de tubo, también dispone de una brida abulonada y apoya sobre dos soportes internos, que se consideran apoyos simples para la modelación. En el extremo de los TDF se producen uniones soldadas entre cada tramo que representan puntos de concentración de tensiones. El tubo del Caso 3 presenta un rigidizador soldado que conecta los tramos del tubo en el extremo inicial.

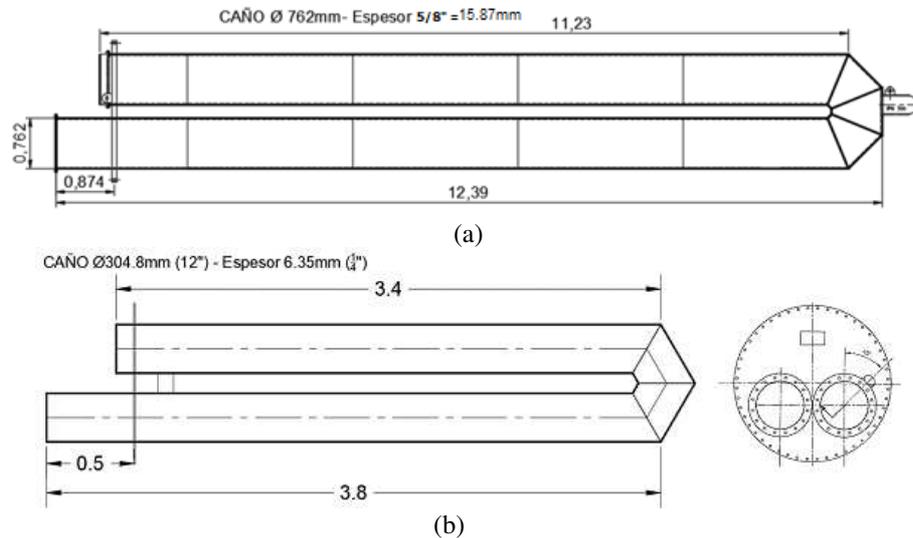


Figura 1: Geometría de casos de estudio. a) Caso 2, para separación de petróleo y agua, b) Caso 3, para separación de glicol y agua.

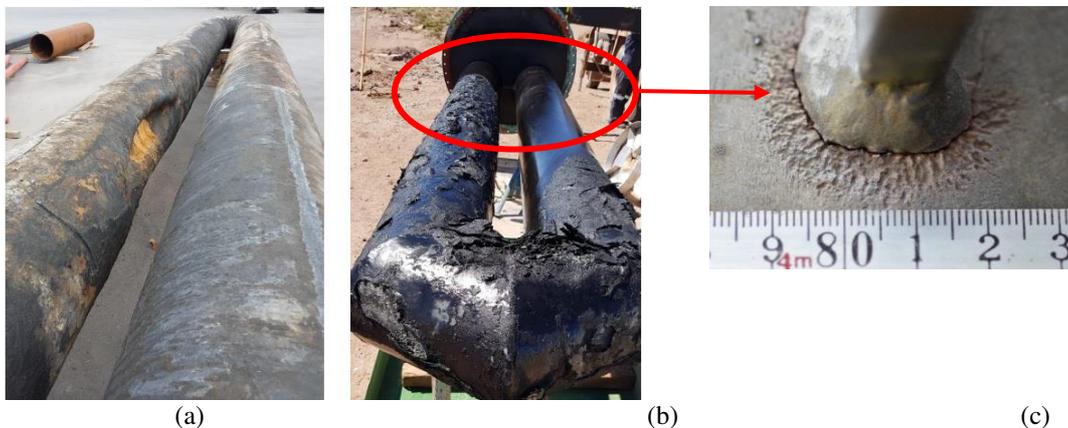


Figura 2: Fallas detectadas. a) Deformaciones localizadas (Caso 1 y 2), b) Incrustaciones sobre la superficie exterior, (c) Fisuras en unión en chapa rigidizadora y tubo (Caso 3).

La Figura 2a muestra la deformación localizada que se produjo en los Casos 1 y 2, mientras que la Figura 2c presenta las fisuras detectadas en la unión entre el tubo y la chapa de vinculación entre las dos ramas del TDF (Caso 3). En los tres tubos se observan depósitos e incrustaciones (Figura 2c) sobre la superficie exterior del tubo, que produce un aumento del espesor y modificaciones en la transferencia de calor.

### 3 MATERIALES

En la modelación de los tres casos de estudio se caracterizó los materiales de los tubos de fuego de acuerdo a los valores expresados por la Norma ASME BPVC (2010). Las especificaciones técnicas de los equipos indican que la fabricación de los tubos se realiza con aceros SA-516GR70 y SA-106GRB, según se trate de tubos o chapas. En alguno de los casos, se utiliza tubos de acero con costura lo que indica que los mismos se fabrican con aceros SA-

516GR70. La Figura 1a muestra la variación de la tensión de fluencia ( $f_y$ ) respecto de la temperatura ( $T$ ) y la Figura 1b muestra la variación del módulo de elasticidad ( $E$ ) respecto a la temperatura ( $T$ ). En la modelación de cada uno de los casos de estudio, se asignó estas variaciones de tensión de fluencia y módulo de elasticidad respecto a la temperatura a cada una de las partes del tubo de fuego.

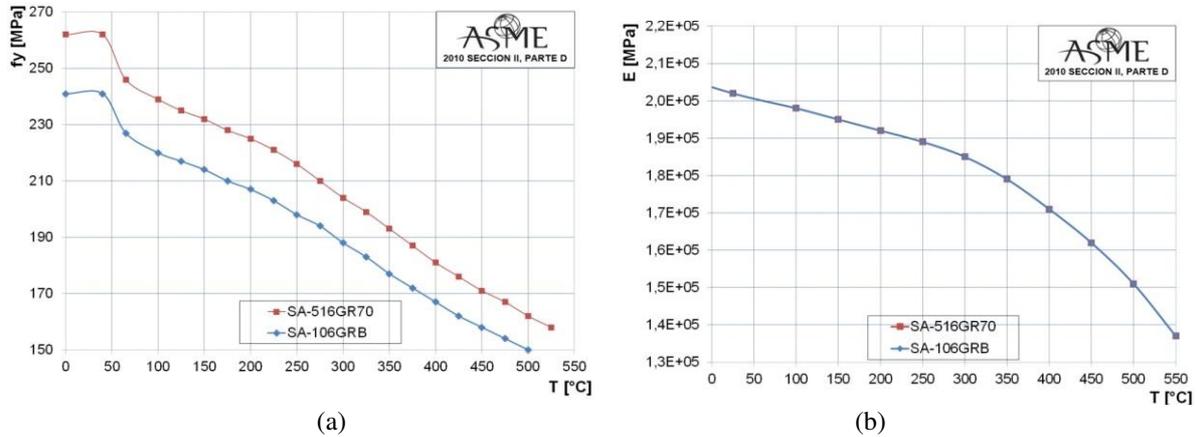


Figura 3: Aceros SA-516GR70 y SA-106GRB. a) Variación de  $f_y$  respecto de la temperatura  $T$ , b) Variación de  $E$  respecto de la temperatura  $T$ .

### 4 CAMPO TÉRMICO

Zangeneh et al. (2020) presenta tres distribuciones térmicas obtenidas por un análisis de transferencia de calor para un tubo de fuego de similares características al Caso 2. Estas variaciones térmicas se ven afectadas por la evaporación superficial del fluido que rodea al tubo y el depósito de impurezas contenidas en el mismo que se depositan en forma de sedimento formando una capa gruesa, la cual afecta la transferencia de calor en el tubo de fuego. Las cargas térmicas son radiales del tipo cono invertido. La Figura 4 describe las tres variaciones térmicas determinadas para un tubo de fuego con sobre espesor de 4cm (T1), con sobre espesor de 2cm (T2) y sin sobre espesor (T3).

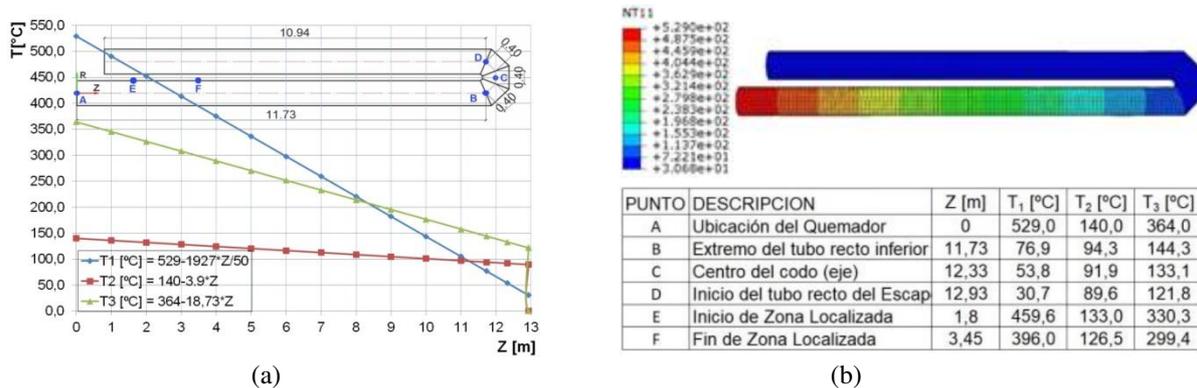


Figura 4. Distribuciones térmicas en función del sobre espesor de sedimentos (Zangeneh et al, 2020), (a) Temperaturas T1, T2 y T3, b) Temperaturas en puntos relevantes del TDF.

La Figura 4a muestra las tres distribuciones térmicas y el tubo de fuego a escala, donde el eje Z corresponde a la longitud del eje del tubo de fuego, con valores constantes de temperatura en codo y tramo superior del tubo. La Figura 4b muestra una tabla con las temperaturas asignadas para las tres distribuciones térmicas. Estas distribuciones se extrapolaron para el TDF del Caso 1 que presenta una menor longitud total.

El TDF del Caso 3 tiene dimensiones muy diferentes y, además, como el interés del estudio está centrado en analizar la formación de fisuras asociadas a variaciones en la distribución de

temperaturas, se optó por considerar temperaturas en el tramo donde se encuentra el quemador con un valor máximo de 500°C, 400°C, 360°C y 300°C llegando a 200°C al final del tramo. En el codo se considera un valor uniforme correspondiente a 200°C y posteriormente un valor constante de 180°C a lo largo de tramo izquierdo. Estos últimos valores se establecieron en función de los registros de temperatura del fluido. La carga térmica en el primer tramo se plantea en base a una expresión analítica mostrada en la Figura 5, para temperaturas iniciales de 500°C, 400°C, 360°C y 300°C respectivamente, junto con la distribución para T° inicial de 400°C.

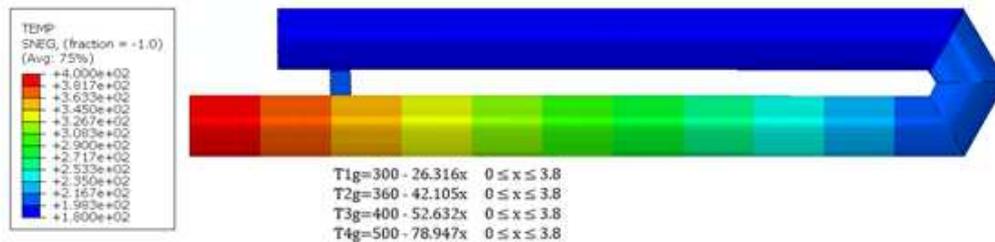


Figura 5: Distribución térmica sobre el tubo de fuego para T° inicial de 400°C.

## 5 MODELACIÓN NUMÉRICA

El análisis estructural de los tubos de fuego se realiza mediante modelos de elementos finitos a través del código de propósitos múltiples ABAQUS (2006). Los Casos 1 y 2 presentan similares características de falla por lo que se detalla el análisis del Caso 2. Este TDF tiene una longitud de 12.39m, un diámetro de 30" y espesor de 15.88mm (5/8"), el acero utilizado es SA-516GR70. El TDF del Caso 3 presenta una longitud aproximada de 3.8m, diámetro de 0.3048m (12") y espesor de 0.00635m (1/4"), el acero es SA-106GRB. Para la modelación, en ambos casos se utilizan elementos de cáscara triangulares (tipo S3) y rectangulares (tipo S4R) de aproximación lineal, de un tamaño promedio de 0.10m para el Caso 2. En el Caso 3 se usa una malla más densa en la zona del rigidizador y del codo de tubo (tamaño de 0.005m) y 0.02m en el resto de los tramos.

En el Caso 2, se consideraron las siguientes condiciones de contorno (Figura 6a):

**Restricción 1:** en los extremos del tubo, se restringen los desplazamientos y giros en X, Y y Z.

**Restricción 2:** tapa brida a 0.874m del extremo del tubo, se encuentra restringidos los desplazamientos en la dirección Z e Y.

**Restricción 3:** apoyos simples del tubo ubicados en 4 zonas diferentes.

**Restricción 4:** conexión del TDF a perfil IPN con restricción de desplazamientos en X, Y, Z.

En el Caso 3, las condiciones de contorno son (Figura 6b):

**Restricción 1:** tapa brida a 0.5m del extremo del tubo, se considera empotrada.

**Restricción 2:** rigidizador soldado al tubo y restringe todo giro y desplazamiento relativo.

**Restricción 3:** apoyos simples del tubo en el extremo cerca del codo, cuyo desplazamiento se encuentra restringido en la dirección Z.

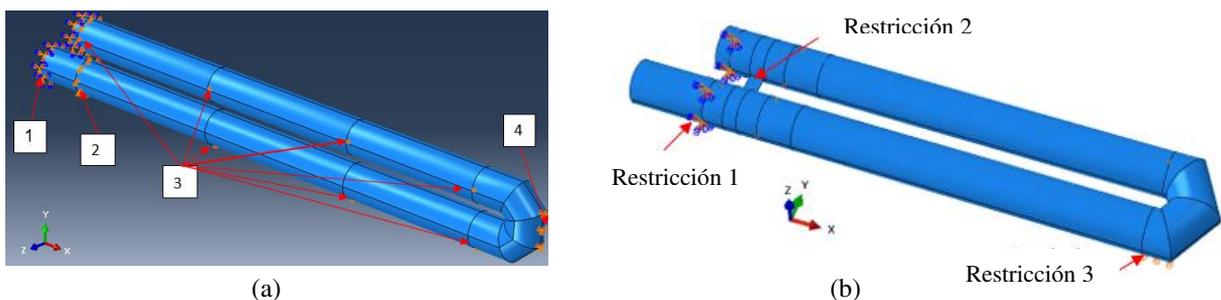


Figura 6: Condiciones de Contorno, (a) Caso 2, (b) Caso 3.

## 6 ANALISIS ESTRUCTURAL

### 6.1 Tubo de fuego de intercambiador de calor de petróleo (Caso 2)

El tubo de fuego relevado presenta una falla en una zona localizada próxima al quemador, (Figura 7a y 7b). Un estudio metalográfico del material (Zalazar y Steimbregger, 2021) de ese sector muestra un daño en la metalografía compatible con altas temperaturas. Esto indica que el sector ha sido expuesto a una temperatura ampliamente superior a la que fue diseñado. Esta falla puede originarse por un incremento localizado de temperatura por el desajuste de la llama del quemador y/o al depósito de sedimentos en el exterior del tubo por procesos de evaporación del fluido que rodea al tubo. La Figura 7c muestra la acumulación de sedimentos en diferentes sectores del tubo de fuego. El relevamiento de la zona deformada se observa en la Figura 7d.



Figura 7: Falla en tubo de fuego. a) y b) Vistas exterior e interior de la zona localizada, c) Acumulación de sólidos en el tubo de fuego, d) Relevamiento de zona localizada.

Esta zona localizada es considerada en el modelo numérico para cambiar el espesor relativo del tubo de fuego y plantear variaciones en la distribución térmica. La variación del espesor en el tubo de fuego busca modelar los diferentes espesores que puede tener el mismo por la acumulación de sedimento bajo las condiciones de servicio. Las variaciones en la distribución térmica, buscan estudiar el desajuste de la llama del quemador desviándose hacia la zona localizada de deformación generándose un calentamiento no uniforme del tubo de fuego.

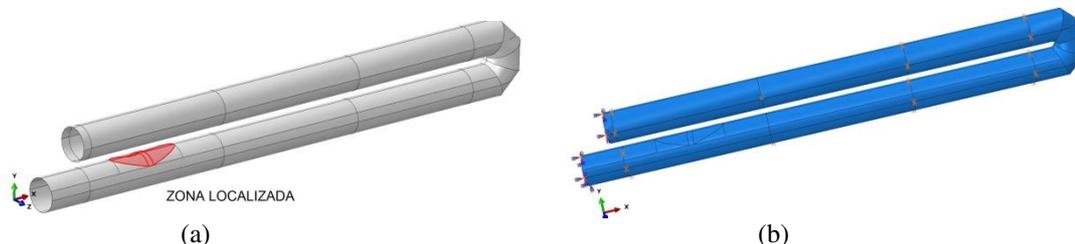


Figura 8: Modelo de Tubo de Fuego del Caso 2, (a) Sector localizado, (b) Condiciones de contorno.

La Figura 8 muestra el modelo del tubo de fuego para el caso 2. Se indica la ubicación de la zona localizada de acuerdo a las dimensiones indicadas en la Figura 7d.

**Análisis de pandeo térmico:** El análisis de pandeo se realiza mediante un análisis de autovalores y autovectores. La Figura 9a muestra el análisis de pandeo en función del cambio de espesor en la zona localizada para las tres distribuciones térmicas indicadas en la Figura 4. El espesor de chapa del TDF es 15.88mm. La determinación de la temperatura crítica ( $T_{cr}$ ) se

realizó para cada distribución térmica (T1, T2 y T3) reduciendo el espesor del tubo en la zona localizada, simulando la diferencia de espesor entre zonas con y sin acumulación de sedimentos.

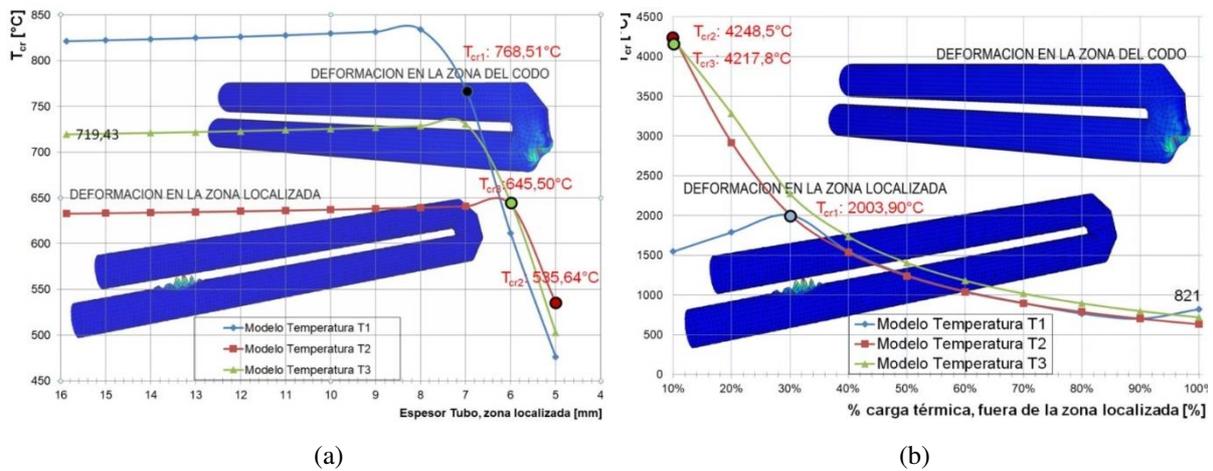


Figura 9: Temperaturas críticas ( $T_{cr}$ ): (a) Variación de espesor en la zona localizada, (b) reducción de temperatura fuera de la zona localizada.

Las curvas obtenidas para las tres distribuciones térmicas muestran el mismo patrón de deformación el cual se concentra en la zona del codo, con temperaturas críticas que van desde  $630^{\circ}\text{C}$  a  $834^{\circ}\text{C}$ . Estas deformaciones se mantienen hasta alcanzar espesores de 8mm en la zona localizada, que representa una reducción del 49% del espesor del tubo. A partir de una reducción del 56% del espesor del tubo (7mm), se observan modos de deformación en la zona localizada, próxima al mechero y compatibles con las deformaciones observadas en la Figura 7. El patrón de deformación se mantiene en la zona localizada para reducciones superiores al 56% (<7mm), con una reducción del rango térmico que va entre  $535^{\circ}\text{C}$  a  $768^{\circ}\text{C}$ .

Para estudiar el calentamiento heterogéneo del tubo de fuego producto del desvío de la llama del quemador se determina la carga crítica de pandeo ( $T_{cr}$ ) realizando reducciones de la carga térmica fuera de la zona localizada. En la zona localizada se aplicó la carga térmica T1, T2, T3 y sobre el resto del tubo se aplican porcentajes de la distribución térmica (Figura 9b). Los patrones de deformación en el codo se mantienen hasta reducciones del 40% de la carga térmica. La aplicación del 30% T1 produce el primer modo de deformación en la zona localizada con una  $T_{cr1} = 2003,9^{\circ}\text{C}$ . En el caso de las distribuciones T2 y T3 se requiere aplicar el 10% de la carga térmica fuera de la zona localizada para obtener un patrón de deformación en la zona localizada, con temperaturas críticas del orden de  $4250^{\circ}\text{C}$ . Estos valores no son compatibles con las temperaturas de uso de equipos y materiales utilizados.



Figura 10: Temperaturas críticas de pandeo en función de una combinación de la reducción de espesor en la zona localizada y reducción de carga térmica fuera de la zona localizada.

La Figura 10 muestra las temperaturas críticas combinando la reducción en la zona localizada y la reducción de la carga térmica fuera de la zona localizada. Hasta una reducción del espesor del 37% (10mm), con 40% de la carga térmica el patrón de deformación se mantiene en el codo con temperaturas entre 630° a 1950°C. Para espesores menores a 9mm y reducciones inferiores al 30% de la temperatura, el primer modo de deformación se ubica en la zona localizada con un descenso de las temperaturas críticas para las tres distribuciones térmicas. La temperatura crítica para el último punto de análisis, para el 10% de la carga térmica, con un 68% del espesor (5mm) es 971°C.

En la determinación de la carga crítica ( $T_{cr}$ ) que produce deformaciones como en la Figura 7, se puede concluir que plantear una reducción de espesores en la zona localizada genera resultados compatibles con las temperaturas de operación de los equipos. La evaluación numérica considerando las tres distribuciones térmicas cambia la temperatura crítica a valores que van de 535°C a 768°C, con lo cual es importante realizar mediciones de la distribución térmica de acuerdo al grado de acumulación de sedimentos en el tubo de fuego. El calentamiento heterogéneo del tubo de fuego, planteando una reducción uniforme de toda la carga térmica fuera de la zona localizada y manteniendo la carga térmica en la zona localizada no permitió obtener patrones de deformación en la zona próxima al mechero a temperaturas de operación del equipo. En consecuencia, el análisis combinado entre reducción de espesores y patrones heterogéneos de temperatura no permite obtener temperaturas críticas coherentes.

## 6.2 Tubo de fuego de intercambiador de calor de glicolera (Caso 3)

En este caso se estudia el comportamiento tensional del tubo sometido a variaciones del campo térmico y la posibilidad de plastificación y formación de fisuras en las zonas del codo y en las proximidades del rigidizador que une ambas ramas del tubo.

En un inicio las tensiones y deformaciones respetan una ley de proporcionalidad. Cuando el nivel de tensiones llega a la tensión de fluencia del material en algún lugar de la estructura, se puede asegurar que ésta se ha plastificado y el material de la estructura comienza a trabajar en régimen plástico, deformándose sin aumento de tensiones.

Se realiza un Análisis Estático General considerando no linealidad geométrica y la variación del módulo de elasticidad y tensión de fluencia con la temperatura. Una de las teorías de falla más ampliamente utilizada en materiales dúctiles es el de von Mises. La tensión de von Mises representa una magnitud física proporcional a la energía de distorsión y se puede calcular a partir de las tensiones principales del tensor de tensión en un punto de un sólido deformable.

Cuando el valor de la tensión de von Mises calculada supera la tensión de fluencia del material se puede asegurar que el material deja de trabajar en régimen elástico.

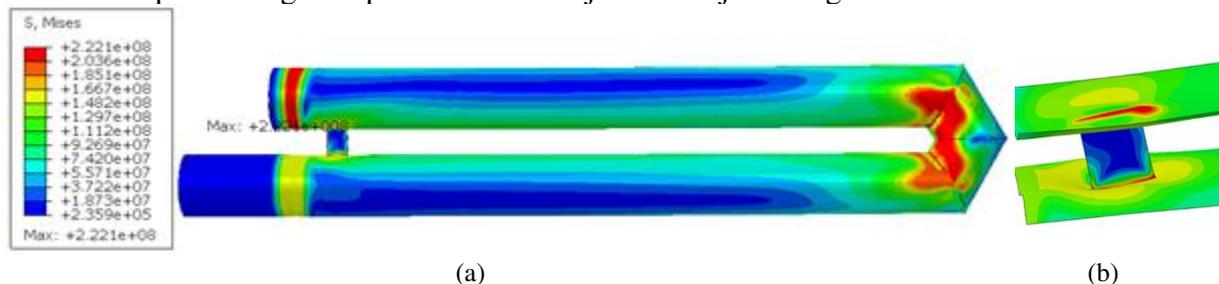


Figura 11: Tensiones de von Mises ( $T_g = 500^\circ\text{C}$ ), (a) Vista general del tubo, (b) Detalle de zona de rigidizador.

La Figura 11 muestra las tensiones de von Mises halladas para la distribución térmica T4g mostrada en la Figura 5 con un valor máximo de  $T_g = 500^\circ\text{C}$ . Se observa que las máximas tensiones se concentran en el rigidizador, en la ubicación de la brida y en el codo del tubo de fuego. Este comportamiento se repite para las diferentes distribuciones cambiando levemente los valores máximos de las tensiones de von Mises.

Tg [°C]	von Mises (MPa)		Máximas Principales (MPa)		S11 (MPa)		S22 (MPa)	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
300	220.0	4.8	132.6	-241.5	102.1	-23.5	-1.1	-240.6
360	221.4	5.2	210.6	-244.3	153.1	-19.2	7.4	-239.7
400	221.4	7.4	225.6	-245.7	169.6	-17.4	11.3	-239.0
500	222.1	8.6	237.0	-250.3	191.6	-98.1	16.1	-239.8

Tabla 1: Tensiones máximas y mínimas para las distribuciones de temperatura T1g, T2g, T3g y T4g.

En la Tabla 1 se muestran los valores de tensiones de von Mises y las tensiones máximas principales y los valores de tensiones longitudinales (S11) y circunferenciales (S22) para la variación de temperaturas planteada. Se observa un aumento de las tensiones S11 y S22 con el aumento de la temperatura máxima en el tubo, compatibles con la aparición de fisuras en la zona. La Figura 12 muestra esta concentración de tensiones que se produce en la pared del tubo donde se encuentra la chapa que une ambas ramas del TDF. Se observa que los valores máximos se encuentran en la zona inferior de la chapa (parte del tubo con mayor temperatura) y a medida que aumenta la temperatura las tensiones en el tubo también se incrementan.

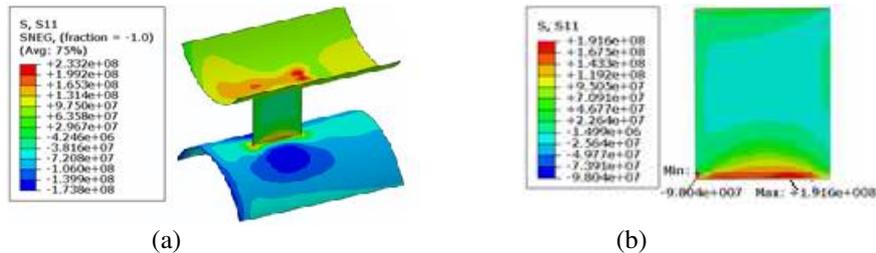


Figura 12: Tensiones longitudinales (S11) en la zona del rigidizador para Tg=500°C, (a) Detalle de tubo y placa rigidizadora, (b) Chapa rigidizadora.

La deformación plástica equivalente (PEEQ) es un escalar representativo de la deformación plástica acumulada, producida por variaciones en el tensor de deformaciones plásticas. La Figura 13 muestra la deformación plástica equivalente (PEEQ) para la temperatura de 500°C en todo el TDF, en el sector de unión del tubo y la placa y en la placa, que presenta un valor del orden de 5.07E-3. En la Tabla 2 se resumen los valores de deformación plástica equivalente y desplazamientos máximos encontrados para las diferentes temperaturas.

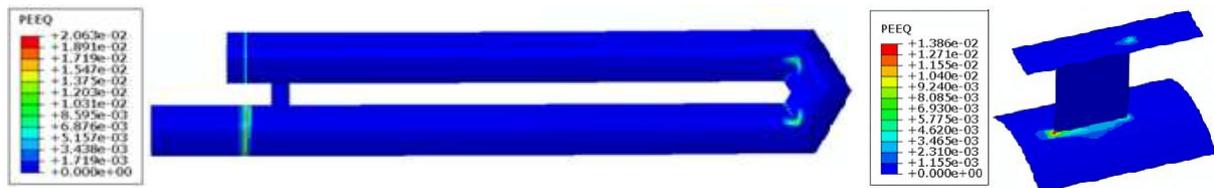


Figura 13: Deformación plástica equivalente (PEEQ), en todo el TDF, en el sector de unión del tubo con rigidizador y en la chapa (Tg=500°C).

Tg [°C]	300	360	400	500
PEEQ <sub>max</sub>	1.164E-03	2.185E-03	2.977E-03	5.073E-03
U [m]	9.610E-04	1.103E-03	1.195E-03	1.430E-03

Tabla 2: Deformación plástica equivalente (PEEQ) y desplazamientos (U) para las Temperaturas adoptadas

La zona de concentración de tensiones y su incremento con las temperaturas cuando se superan la de diseño del equipo (360°C) indica que es posible la aparición de fisuras en la unión del tubo con la chapa rigidizadora como se muestra en la Figura 2c. Otro sector con posibilidad de fisuración es el sector del codo como se presenta en las figuras 11 y 13.

## 7 CONCLUSIONES

En este trabajo se analizan tres tubos de fuego pertenecientes a intercambiadores de calor usados para separar mezclas de petróleo y agua o mezclas de glicol y agua. El estudio incluye análisis de pandeo (LBA) y análisis de tensiones y deformaciones considerando no linealidad geométrica y propiedades mecánicas del acero variables con la temperatura. Los equipos para separar petróleo y agua presentaban fallas localizadas en un sector cercano al quemador y gran cantidad de depósitos de residuos sobre la superficie exterior. En el tubo de la glicolera se hallaron fisuras en la unión de ambas ramas del tubo con un rigidizador, en este caso también hay incrustaciones de residuos, pero en menor cantidad.

Los análisis simulando calentamiento heterogéneo en un sector y/o influencia del cambio del espesor del tubo por la acumulación de incrustaciones indican que la modificación del espesor relativo entre la zona de falla y el resto del tubo tiene una gran influencia en la formación de la comba localizada. En estos análisis, la temperatura crítica de pandeo arroja valores entre 530°C y 800°C que son compatibles con los daños encontrados en el análisis metalográfico. Este sobre espesor no solamente modifica los modos de pandeo que pasan de concentrar deformaciones en el codo a que aparezcan en la zona localizada, sino que también modifica las condiciones de transferencia de calor entre el tubo y el fluido generando diferentes perfiles de temperatura superficial en el tubo.

En el análisis de pandeo térmico, el calentamiento heterogéneo en la zona localizada genera modos con combas en ese sector a temperaturas muy altas, mayores a 1000°C que no resultan posibles con la reducción de las características mecánicas del material con la temperatura.

Estos resultados ponen en relevancia la necesidad de controlar la deposición de sólidos sobre el tubo y la necesidad de tener control sobre las temperaturas de trabajo del tubo.

La aparición de fisuras en la zona de unión entre el tubo y la chapa rigidizadora es compatible con la concentración de tensiones longitudinales y la plastificación que se observa en ese sector. Esto es producto de la rigidez que aporta a esa zona la placa de unión entre los tubos y también al incremento del estado tensional asociado a temperaturas de trabajo mayores a las de diseño del tubo. Ambos aspectos hacen necesario revisar las condiciones de funcionamiento del equipo y evaluar el uso de aceros para aplicaciones a altas temperaturas en el diseño del tubo.

**Agradecimientos:** Este trabajo fue realizado con subsidios de SCyT de UNComa y PICTO Fundación YPF 2022.

## REFERENCIAS

- ABAQUS. Simulia. Unified FEA. Dassault Systemes. Warwick, Rhode Island, USA, 2006.
- Informe LMT-1118-2021 - Petromark -Replicas TUBO DE FUEGO A y B Shell Argentina S. A. Grupo LMT, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, 2021.
- Norma ASME BPVC-Section II-Part D-Materials-Properties (Metric), 2010.
- Patil, R., Anand, S., Thermo-structural fatigue analysis of shell and tube type heat exchanger. *Int J Press Vessel Pip*, 155:35-42, 2017.
- Rueda, E., Marquez, A., Otegui, J.L., Frontini, P.M., Buckling collapse of HDPE liners: Experimental set-up and FEM simulation. *Thin-Walled Structures*, 109:103-112, 2016.
- Srivastava, S.K., Katarki M.V., Failure analysis of fire tube sleeve of heat treater. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 9:310-315, 2009.
- Steimbregger, C. y Zalazar, M., Daño en Tubos de Fuego de intercambiadores de calor de la industria petrolera, 10° Junta Nacional de Inspección de Calderas, Buenos Aires, 2022.
- Zangeneh Sh, Bakhtiari R, Veysi F, Jowzi M., Thermal/stress analysis of a failed fire-tube heater treater. *Engineering Failure Analysis*, 116, 104762, 2020.