Asociación Argentina

de Mecánica Computacional

Mecánica Computacional Vol XLI, pp. 237-246 C.I. Pairetti, M.A. Pucheta, M.A. Storti, C.M. Venier (Eds.) R. Jaca, D. Felix (Issue eds.) Rosario, November 5-8, 2024

MODELADO DE LA FALLA DEL TUBO DE FUEGO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

MODELING OF THE FIRE TUBE FAILURE IN A HEAT EXCHANGER

Noemí Subelza^a, Horacio D. Calabró^a, Rossana C. Jaca^a y Eduardo M. Sosa^b

^aUniversidad Nacional del Comahue, 8300 Neuquén, Argentina. sube_09@outlook.com, danycalabro@yahoo.com.ar, rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar

^bDepartment of Mechanical, Materials, and Aerospace Engineering, West Virginia University, Morgantown, 26505, West Virginia, United States. <u>eduardo.sosa@mail.wvu.edu</u>

Palabras clave: Tubos de Fuego, Elementos Finitos, Daño, Sobrecalentamiento, No linealidad geométrica y material.

Resumen. El equipamiento usado en la industria de destilación y procesado de petróleo se encuentra sometido a exigentes condiciones de servicio y demandas crecientes. En particular, los intercambiadores de calor permiten la separación del agua contenida en el petróleo y disponen en su interior tubos de fuego donde los gases de combustión generan la temperatura necesaria para el proceso de separación. Este trabajo presenta un análisis de la respuesta estructural de un tubo que presenta grandes deformaciones en un sector localizado próximo al quemador, con el objetivo de identificar las causas que produjeron esa falla. El análisis de falla contribuye a mejorar las condiciones de trabajo y evitar interrupciones en la producción. Un estudio previo de la metalografía del material indica un crecimiento de grano excesivo congruente con una exposición a temperaturas elevadas en la zona del daño. Se modela el tubo con elementos finitos sólidos y se considera la variación de las propiedades mecánicas del acero con la temperatura. Se implementa un análisis no lineal geométrico incluyendo plasticidad del material con el objeto de reproducir el mecanismo de falla. El estudio muestra la necesidad de monitorear la distribución de temperaturas en el tubo para reducir la posibilidad de formación de zonas con concentración de altas temperaturas.

Keywords: Fire Tubes, Finite Elements, Damage, Overheating, Geometric and material nonlinearity.

Abstract. The equipment used in the oil distillation and processing industry operates under highly demanding conditions and increasing requirements. Heat exchangers separate water from oil and include fire tubes where combustion gases generate the necessary temperature for the separation process. This study analyzes the structural response of a fire tube that exhibits significant deformations on a localized sector near the burner, aiming to identify the causes of its failure. Failure analysis allows for the improvement of working conditions and contributes to preventing production interruptions. A previous metallographic study of the material revealed excessive grain growth consistent with exposure to high temperatures in the damaged area. The fire tube is modeled with solid finite elements, and the steel's mechanical properties with temperature variation are also considered. We conduct a geometric nonlinear analysis, including material plasticity, to replicate the failure mechanism. The study demonstrates the need to monitor the tube's thermal distribution to avoid areas of high-temperature concentration.





1 INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo utiliza equipamiento que opera bajo condiciones de servicio extremadamente exigentes y enfrenta demandas crecientes. Durante la operación rutinaria de esos equipos, uno o varios componentes resultan con daños que afectan el funcionamiento seguro en el procesamiento ininterrumpido del crudo. En particular, los intercambiadores de calor se usan típicamente para la separación de emulsiones de petróleo y agua reduciendo el contenido de agua a límites aceptables para su posterior refinación. Estos intercambiadores de calor contienen en su interior tubos de fuego que son parte integral del proceso de separación de agua del petróleo mediante la aplicación controlada de calor.

Dentro de los factores que influyen en el funcionamiento seguro de los tubos de fuego se pueden mencionar el diseño geométrico y los materiales que lo componen, un mantenimiento adecuado y las condiciones operativas. El aumento de temperatura o localización del calor puede generar daños debido a la degradación del material. Varios estudios previos han documentado que los tubos de fuego son susceptibles de daño relacionado a exceso de temperatura. Por ejemplo, Razaq et al. (2023) evaluó las propiedades mecánicas del material y concluyó que la fragilización por altas temperaturas produjo la falla de un tubo de fuego. Srivastava y Katarki (2009) también estudiaron la exposición del tubo a temperaturas excesivas (540–1095°C), en el que la generación de corrosión por oxidación interna resultó ser la causa de la falla de otro tubo de fuego. Pramanick et al. (2017) reporta que los depósitos de óxidos causan la falla de dos tubos de acero adyacentes en el calentador de una planta de energía. Estos depósitos crearon una resistencia significativa a la transferencia de calor, generando un aumento no deseado de la temperatura. Similarmente, Zangeneh et al. (2020) reporta sobre el efecto de la formación de incrustaciones resultantes de la mezcla de petróleo, agua y otros subproductos que se depositan gradualmente sobre la superficie exterior del tubo de fuego.

En este trabajo se analiza un tubo de fuego con daño localizado con el objetivo de investigar sobre las posibles causas que generaron ese daño. El daño consiste en excesivas deformaciones en un sector localizado en las proximidades del quemador y sujeto a las mayores temperaturas de operación. En un estudio previo sobre el mismo tubo, Steimbreger y Zalazar (2022) analizaron la microestructura del acero y reportaron evidencia de crecimiento de grano excesivo, congruente con la exposición a temperaturas elevadas. En este estudio se implementa un modelo de elementos finitos del tubo formado por elementos sólidos tridimensionales. Se plantean diferentes combinaciones de presión y distribución térmica constante o variable en el espesor del tubo con el objetivo de determinar posibles escenarios de carga y temperatura que indujeron dicha falla localizada.

2 CASO DE ESTUDIO

2.1 Geometría y modo de falla

El tubo de fuego estudiado consiste en dos tubos longitudinales unidos en un extremo por un codo que le dan la forma característica de "U", como se muestra en la Figura 1. Todo el conjunto tiene una longitud de 12.39 m, un diámetro de 0.762 m y espesor de 15.87 mm (5/8"). El tubo completo forma parte de un intercambiador de calor que se utiliza para calentar de manera directa una mezcla de petróleo, arena y agua que circula por el exterior del tubo para su posterior separación. El interior del segmento más largo del tubo está conectado a un quemador que libera gas y combustiona cuando entra en contacto con la llama del piloto. Los gases resultantes de la combustión circulan por el interior del segmento más largo hacia el segmento más corto a través del codo resultando en una variación de temperatura a lo largo del tubo. Mediante un proceso de transferencia de calor, el cambio de la viscosidad del fluido que rodea la superficie exterior del tubo permite la separación de los diferentes componentes del fluido.



Figura 1: Geometría del tubo de fuego estudiado.

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.

La falla del segmento mayor del tubo presenta deformaciones localizadas severas en una zona próxima al quemador, que se registraron a los pocos años de montaje y operación del equipo. La Figura 2(a) muestra la falla localizada y la Figura 2(b) muestra un esquema de la posición del óvalo que circunscribe la región de falla localizada. En una observación detallada en el tramo del tubo sujeto a mayores temperaturas se identificaron incrustaciones generadas por el depósito de material circundante. Estas incrustaciones presentan espesor variable y se especula que potencialmente pudieron afectar el proceso de transferencia de calor.



Figura 2: Falla en tubo de fuego. a) Vista exterior de la zona de daño, b) Relevamiento de daño localizado.

2.2 Materiales

El material del tubo corresponde a un acero ASTM SA-516 Gr70. El tubo está diseñado para operar a una temperatura de diseño de 250°C y una presión externa P = 650 kPa. El aumento de la temperatura provoca modificaciones en la microestructura cristalina del acero y las propiedades mecánicas varían gradualmente con el aumento de la temperatura (Steimbreger y Zalazar, 2022). En este estudio se considera la variación del módulo de elasticidad (E) y de la tensión de fluencia (f_y) con la temperatura siguiendo los valores reportados en ASME BPVC (2010) y graficados en la Figura 3. El módulo de Poisson se considera constante y con un valor de 0.3 y el coeficiente de dilatación de 1.2*10⁻⁵ 1/°C.

2.3 Campo térmico

En un trabajo anterior realizado por los autores (Subelza et al., 2023) se utilizaron distribuciones térmicas presentadas por Zangeneh et al. (2020). En dicho trabajo se presentaron tres variaciones de temperatura en función del espesor de la capa de impurezas que se depositan en forma de sedimento por evaporación. Este sedimento forma una capa de material que afecta la transferencia de calor en el tubo de fuego. Las cargas térmicas tienen una distribución radial y de variación lineal a lo largo del tubo más largo conectado al quemador. En este trabajo se

implementa la distribución que proporciona mayores temperaturas asociadas a una capa de impurezas de espesor de 4 cm. La Figura 4(a) muestra la variación lineal de temperatura en la dirección Z en el tramo largo del tubo, cuya expresión se indica en la Figura 4(b). En el codo se adopta una temperatura constante de 77°C y en el tramo corto del tubo una temperatura constante de 62°C.



Figura 3: Variación del módulo de elasticidad (E) y tensión de fluencia (f_y) con la temperatura (T).



Figura 4. Distribución térmica: (a) Temperaturas adoptadas de Zangeneh et al, (2020), (b) Variación longitudinal en el tramo más largo del tubo de fuego.

El análisis metalográfico reportado en Steimbreger y Zalazar (2022) reveló una microestructura transformada en la parte central compatible con un calentamiento del material por encima de la temperatura de diseño, con temperaturas en la zona más distorsionada por encima de 800°C. También indicó que, por la asimetría y localización del daño, se puede inferir que la llama del mechero incidió en forma preferencial sobre una porción pequeña del tubo, favoreciendo el calentamiento y el colapso en la zona observada. Por esta razón, se plantea afectar las temperaturas en la zona del daño por factores de incremento con el objetivo de poner en prueba la hipótesis de desviación de la llama hacia ese sector. Se consideraron factores de 1.2 y 1.7 siguiendo la función lineal planteada en el tramo largo del tubo, como se muestra en la Figura 4(b).

3 MODELO NUMÉRICO

La modelación del tubo de fuego se realiza mediante elementos finitos utilizando un código de propósitos múltiples Simulia/Abaqus (2017). Las propiedades geométricas y de materiales descriptas en las Secciones 2.1 y 2.2 se utilizan como base para la creación del modelo.

En un estudio previo realizado por los autores (Subelza et al., 2023), se implementó un modelo del tubo de fuego formado por elementos de cáscara. Si bien la implementación de un modelo con elementos de cáscara resultó computacionalmente económica, los resultados obtenidos no capturaron apropiadamente la falla observada en el tubo mostrado en la Figura 2(a). En este estudio se cambia la estrategia de simulación con la adopción de elementos sólidos que permiten representar variaciones de temperaturas en el espesor del tubo. De esta forma, la

discretización se hace mediante elementos sólidos hexaédricos de interpolación cuadrática con integración reducida (C3D20R). Se consideran dos capas de elementos en el espesor del tubo. Se realizó un análisis de convergencia adoptándose un tamaño promedio de 0.10 m con un total de 9436 elementos (52050 nodos) para el análisis no lineal geométrico y 0.05 m para un análisis de bifurcación lineal con un total de 40138 elementos (221071 nodos). Las dos mallas implementadas en este estudio se muestran en la Figura 5(b).

Por otro lado, se consideraron las siguientes condiciones de borde (Figura 5(a)):

- <u>Restricción 1 (R1)</u>: En el extremo del tubo largo se restringen los desplazamientos y giros en X, Y y Z.
- \circ <u>Restricción 2 (R2)</u>: Tapa brida a 0.874 m del extremo del tubo largo, se encuentran restringidos los desplazamientos en la dirección Z e Y.
- <u>Restricción 3 (R3)</u>: Apoyos simples del tubo ubicados en 4 zonas diferentes.
- <u>Restricción 4 (R4)</u>: Conexión del tubo de fuego a un perfil IPN con restricción de desplazamientos en X, Y, Z. Esta restricción surge de una condición de tope del tubo contra el extremo de la carcasa exterior del intercambiador de calor. Se considera que puede haber restricción o no, de desplazamientos dependiendo de la rigidez de la placa de fondo del cilindro exterior. Se considera la situación más desfavorable para cada tipo de análisis, en los análisis de bifurcación lineal se considera desplazamiento nulo y para el análisis no lineal geométrico no hay restricción de desplazamientos o rotaciones.



Figura 5: Modelo de elementos finitos: (a) Condiciones de borde, (b) Mallas de elementos utilizadas.

4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

4.1 Temperatura constante en el espesor del tubo

El pandeo térmico se evalúa mediante un análisis de autovalores y autovectores considerando la distribución de temperaturas constante en todo el espesor del tubo (Figura 4(a)), con las condiciones de borde de la Figura 5(a). La temperatura crítica resultante es $T^{C} = 887^{\circ}C$ y el modo crítico presenta deformaciones concentradas en la zona del codo, similar al hallado con elementos de cáscara (Subelza et al., 2023), como se muestra en la Figura 6(a). Estos resultados son consistentes con los obtenidos con elementos de cáscara, pero no reflejan deformaciones en la zona del tubo con daño. Si se considera un aumento de temperatura en el óvalo que representa el sector dañado (Figura 6(b)), la forma de modo permanece similar bajando levemente la temperatura crítica a un valor de 851°C cuando en el óvalo la temperatura llega a 1000°C. Si no se adopta restricción de desplazamiento en el codo (Restricción 4), las formas de modo siguen produciendo deformaciones en el codo con un aumento de la temperatura crítica a 2285°C, valor que no tiene sentido físico. Para este caso el modo 10 presenta deformaciones en el óvalo con una temperatura asociada aún mayor ($T^{C}_{10} = 3121^{\circ}C$), la cual se considera completamente irreal.



Figura 6: Análisis de Bifurcación Lineal: (a) Modo crítico en el codo para temperaturas de Figura 4(a) (T^C = 887°C); (b) Distribución térmica con aumento de temperatura en el óvalo.

Para la misma distribución de temperatura, un análisis no lineal geométrico permite hacer una evaluación más detallada de la respuesta estructural mediante un seguimiento de trayectoria de fuerza-deformación específica. Este análisis se realiza a través del método de Riks (1979) implementado en Abaqus/Standard (Simulia/Abaqus, 2017), considerando las propiedades mecánicas del material variable con la temperatura presentadas en la Figura 3, y considerando que el fluido circundante se encuentra a la presión de diseño de P = 650 kPa. En la Figura 7(a) se muestra la deformada global del tubo y se puede apreciar que los mayores desplazamientos se producen nuevamente en la zona del codo. La Figura 7(b) muestra la trayectoria de equilibrio de un nudo en la zona del tubo donde está ubicada la falla (región ovalada mostrada en la Figura 2) en donde se observa que las temperaturas aumentan hasta valores compatibles con lo analizado en la microscopía, pero con la magnitud de desplazamientos aún muy pequeños y en sentido contrario al daño observado en la Figura 2. Cambios en la magnitud de la presión circundante resultaron en un comportamiento similar.



Figura 7: Análisis de no lineal geométrico: (a) Deformada a T = 677°C, (b) Trayectoria de equilibrio de Nodo A en el centro del óvalo.

4.2 Temperatura variable entre la cara interna y externa del tubo

La distribución de temperaturas planteada en la Sección 4.1 corresponde a un estado en el que todo el tubo está funcionando a la mayor temperatura que puede aportar el quemador, sin considerar la transferencia de calor al fluido. El funcionamiento del quemador se controla en función del nivel de temperatura del fluido, que se mide en el extremo opuesto a la posición del quemador.

Una hipótesis de funcionamiento que se explora es que el fluido se encuentre a una temperatura que requiera el encendido del quemador. Bajo esa condición la cara exterior del tubo y el espesor se encuentran a una temperatura próxima a la del fluido (T_{ext} y T_{esp} , respectivamente en la Figura 8(a)). Al encenderse el quemador, la cara interior del tubo está sometida a la distribución de temperatura T_{int} que sigue la distribución mostrada en la Figura 4(b), vinculada al encendido del quemador. Además, se considera que la capa de incrustaciones en la superficie externa del tubo provoca que no haya un contacto directo entre el exterior del tubo y el fluido, y que puede mantener al tubo en temperaturas algo más elevadas que el fluido.

La hipótesis de encendido del quemador (H₁) por requerimiento de baja temperatura en el fluido, se expresa en el modelo considerando que la temperatura en la superficie exterior (T_{ext}) y en el espesor del tubo (T_{esp}) tienen la distribución indicada en la Figura 4(b), pero afectada por un factor $F_{TE} = 0.2$ y en la superficie interior con factor $F_{TI} = 1.0$ como se esquematiza en la Figura 8(a).

Por otro lado, la hipótesis de desviación del quemador (H₂) con la llama incidiendo en la zona del óvalo se cuantifica con la introducción de un factor amplificador de temperatura aplicado en todo el espesor de la zona ovalada (F_{TO}), como se esquematiza en la Figura 8(b). Este factor F_{TO} indica que la temperatura en el óvalo tiene una magnitud de 1.2 o 1.7 veces la distribución sin inclinación del mechero como se grafica en la Figura 4(b).



igura 8: (a) Esquema de distribución de temperatura en hipótesis de encendido de quemador (H₁) (b) Distribución de temperatura en zona localizada (H₂).

Con estas distribuciones de temperatura se realiza un análisis no lineal geométrico considerando una presión exterior de 650 kPa y para ambos factores de aumento de temperatura en la zona del óvalo ($F_{TO} = 1.2 \text{ y } 1.7$). La alternativa sin aumento de temperatura en el óvalo conduce a deformadas no compatibles con el daño.

La Figura 9(a) muestra las trayectorias de equilibrio obtenidas en cada factor. Las trayectorias de equilibrio corresponden a un nudo ubicado en la zona oval (Nodo A) con máximo desplazamiento graficado en función del factor de proporcionalidad de las cargas (LPF) calculado por el algoritmo de Riks (Simulia/Abaqus, 2017). El LPF indica el incremento de estado de cargas base de temperatura y presión. Las trayectorias de la Figura 9(a) muestran un comportamiento inicial casi lineal, con desplazamiento en correspondencia con la aparición de una inestabilidad. La secuencia de la Figura 9(b) correspondiente al caso de $F_{TO} = 1.7$, muestra que el Nodo A inicialmente se desplaza ligeramente hacia arriba hasta alcanzar un valor de LPF = 1.558. Posteriormente aparece una respuesta inestable con desplazamientos crecientes hacia abajo hasta alcanzar un LPF = 1.334 y a continuación, para valores crecientes de LPF, el Nudo A continúa desplazándose hacia abajo y la deformada en la zona ovalada comienza a tomar la forma curvada mostrada en la Figura 2(a).



Figura 9: Hipótesis de encendido de quemador (H₁): (a) Trayectorias de equilibrio P = 650 kPa, (b) Deformadas para factor amplificador de temperatura en el óvalo $F_{TO} = 1.7$.

Con el objeto de evaluar la influencia de la presión también se calcularon las trayectorias para valores de presión menores (P = 325, 202 y 101 kPa), y considerando los dos factores de amplificación de temperatura en el óvalo ($F_{TO} = 1.7 \text{ y } 1.2$). La Figura 10 muestra las trayectorias resultantes para cada combinación de P y F_{TO} . Las trayectorias graficadas en las Figuras 10(a) y (b) muestran formas similares con valores crecientes de LPF a medida que disminuye la presión. Para una misma presión, la magnitud de LPF obtenidos para $F_{TO} = 1.2$ (Figura 10(a)) son ligeramente mayores que para $F_{TO} = 1.7$ (Figura 10(b)).

Por otro lado, en la Figura 11 se muestran los valores de temperatura calculados en el Nodo A para P = 650, 325 y 202 kPa. Las curvas P = 101 kPa no se representan debido a que las temperaturas obtenidas resultaron mayores a 2300°C, las cuales no pueden considerarse físicamente factibles para la falla en consideración. Los resultados de la Figura 11 muestran que, para presiones de 325 kPa y 650 kPa, y un factor $F_{TO} = 1.2$, los valores de temperatura en la zona de mayor deformación son de menor magnitud (entre 1200°C y 800°C, respectivamente) que los valores obtenidos para $F_{TO} = 1.7$ (1600°C y 1200°C, respectivamente). Los valores de temperatura obtenidos para $F_{TO} = 1.2$ son más compatibles con los valores reportados por Steimbreger y Zalazar (2022) como los que serían necesarios para producir un cambio significativo en la microestructura del acero y producir un cambio notable en el comportamiento plástico del mismo.



(a) $F_{TO} = 1.2$, (b) $F_{TO} = 1.7$.

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados presentados en las secciones anteriores evidencian que la respuesta estructural del tubo de fuego depende fuertemente de la distribución de temperaturas en el espesor del tubo sujeto a carga térmica. La modelación del tubo con elementos sólidos permite plantear distribuciones variables de temperaturas en el espesor que, combinadas con la incorporación de

propiedades mecánicas del material variables con la temperatura, posibilitan una representación más realista del caso de estudio.

Dadas las condiciones de funcionamiento del tubo de fuego, el planteo de una distribución térmica en el espesor asociada al encendido del quemador (hipótesis H_1) y la presencia de una posible desviación de la llama orientada al sector del tubo con mayor deformación localizada (hipótesis H_2), en conjunto con la presión del fluido actuando en el exterior del tubo, permiten obtener deformaciones compatibles en forma y magnitud con lo observado en la zona de falla del tubo considerado como caso de estudio.

La Figura 12 muestra una comparación global de la zona de daño en la estructura real con las obtenidas en la simulación para la combinación de presión externa P = 325 kPa y un factor de amplificación de temperatura en la zona dañada de $F_{TO} = 1.7$. La Figura 13(a) muestra una vista más detallada de la zona deformada e ilustra el buen grado de correspondencia entre deformada real y deformadas calculadas por las simulaciones.

El estudio paramétrico considerando diferentes combinaciones de presión y factores de amplificación de temperatura también predice la forma general de la zona dañada, pero la amplitud máxima depende de la combinación específica de presión y temperatura. Esta variación se ilustra en la Figura 13(b) donde se presentan secciones transversales de la zona dañada para diferentes combinaciones de presión y temperatura. Se puede observar una adecuada representación del daño en cuanto a la forma e incluso reproduciendo la asimetría de la deformada. Si bien la combinación exacta de presión y amplificación de la temperatura que produjeron la deformación observada en el caso de estudio no se conoce, los resultados de las simulaciones permiten estimar combinaciones factibles de haber provocado el fallo del tubo de fuego.



Figura 12: Comparación de deformada real con resultados numéricos (P = 325 kPa, $F_{TO} = 1.7$).



Figura 13: Deformadas de la zona dañada: (a) Vista superior (P = 325 kPa, F_{TO} = 1.7), (b) Sección transversal de estructura real y de simulaciones para diferentes combinaciones de presión y factores de amplificación de temperatura F_{TO} en la zona de mayor deformación.

6 CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el estudio de una falla localizada en un tubo de fuego de un intercambiador de calor utilizado en la industria del petróleo para separar el petróleo del agua. Se realiza un análisis no lineal geométrico considerando un comportamiento elastoplástico del material con propiedades mecánicas variables con la temperatura.

Un estado estacionario con distribución de temperatura constante en el espesor no produce deformaciones localizadas como la observada en el caso de referencia, aún con un aumento de temperatura en ese sector.

Una distribución variable de temperaturas en el espesor del tubo asociada al encendido del mechero por requerimiento de baja temperatura en el fluido y con un incremento de temperaturas en la zona del daño conduce a deformadas localizadas compatibles con la falla existente. En esas condiciones la respuesta varía en función de la presión existente en el intercambiador, de manera que a presiones próximas a las de diseño se obtienen temperaturas en el sector dañado congruentes con los valores estimados en un análisis de la microestructura del acero. La magnitud de los desplazamientos también es del orden de lo relevado en la falla.

La combinación de mechero desalineado incidiendo en un sector localizado juntamente con presiones en el fluido cercanas a las de diseño del equipo, parecen ser causas factibles y compatibles con la falla observada en el tubo de referencia.

Dadas estas conclusiones, se considera importante controlar las condiciones de mantenimiento y alineamiento del mechero, así como las condiciones de presurización del equipo, para evitar la ocurrencia de fallas como las analizadas en este estudio.

Agradecimientos y Reconocimientos: Este trabajo fue realizado con subsidios de SCyT de UNComa, con la colaboración del Ing. Carlos Burgos e Ing. Alejandro Aguilera. La contribución del Dr. Eduardo M. Sosa a este estudio se originó durante su estancia en UNComa como parte del *Fullbright Specialist Program* completada en marzo de 2024.

REFERENCIAS

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D, Materials Properties (Metric). American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- Simulia/Abaqus. Abaqus User's Manual. Version 2017. Dassault Systèmes. Warwick, Rhode Island, USA, 2017.
- Pramanick, A.K., Das, G., Das, S.K. and Ghosh, M., Failure investigation of superheater tubes of coal-fired power plant. *Case Studies in Eng. Failure Analysis*, 9: 17-26, 2017.
- Razaq, A., Peng, X., Hafeez, M.A., Ali, W., Shehabeldeen, T.A., Yin, Y. and Zhou, J., Failure analysis of oil refinery heater treater's fractured fire tube. *Eng. Failure Analysis*, 154, 2023.
- Riks, E., An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. *International Journal of Solids and Structures*, 15:529-551, 1979.
- Srivastava, S.K., Katarki, M.V. Failure Analysis of Fire Tube Sleeve of Heater Treater. *J Fail. Anal. and Preven.* 9, 310–315, 2009.
- Steimbreger, 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.

Subelza, N., Calabró, H.D., Burgos, C., Aguilera, A., Jaca, R.C., Evaluación de fallas en el tubo de fuego de intercambiadores de calor. *Mecánica Computacional*, 40: 319-328, 2023.

Zangeneh, S., Bakhtiari, R., Veysi, F., Jowzi, M., Thermal/stress analysis of a failed fire-tube heater treater. *Eng. Failure Analysis*, 116, 104762, 2020.