



# SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE SOLDADURA PARA LA REPARACIÓN ESTRUCTURAL DE UN GASODUCTO, A PARTIR DE UN MODELO SIMPLIFICADO BIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS FINITOS. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES FÍSICAS DEL ACERO

HÉCTOR C. SANZI, GUSTAVO F. ELVIRA, ALEJANDRO M. TUREL

Universidad Tecnológica Nacional  
Grupo de Investigación Ingeniería Estructural, Facultad Regional Haedo  
París 532 Haedo (1706) Buenos Aires, Argentina

(Recibido 30 de diciembre de 2014, revisado 7 de mayo de 2015, para publicación 5 de enero de 2016)

**Resumen** – Las tuberías y componentes instalados en plantas de proceso, refinerías, compresoras y aquellas derivadas del petróleo, son diseñadas en acuerdo con la norma ANSI/ASME B31.8 [1] y construidas, utilizando procedimientos adecuados y calificados mediante aporte de material por soldadura. Para ello las normas de aplicación en estructuras y recipientes contenedores de presión, *American Welding Society* [2] y *American Society Mechanical Engineering ASME IX* [3], permiten diseñar todo tipo de uniones y calificar soldadores. Ante una falla detectada en un gasoducto en operación, la posibilidad de llevar a cabo una “Soldadura en Servicio” requiere de una cuidadosa planificación, teniendo en cuenta que la tubería se encuentra con presión y fluido. El procedimiento de reparación, presentado en este trabajo, consiste en la colocación de una camisa alrededor de la sección dañada, “Encamisado”, con un material de características similares y permitiendo de esta manera recuperar estructuralmente el sector dañado. En base a estudios previos, realizados mediante “Técnicas Avanzadas de Análisis”, a través del Método de Elementos Finitos, se llevó a cabo la simulación del proceso de soldadura. En esta oportunidad, a partir de un modelo simplificado bidimensional de elementos finitos, se estudia la influencia de considerar la dependencia de las propiedades físicas con respecto a la temperatura, tales como la conductividad térmica, el calor específico y la densidad, en los resultados finales.

**Palabras clave** – Reparación en servicio, soldadura en servicio, elementos finitos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las tuberías y componentes instalados en plantas de proceso, refinerías, compresoras y aquellas derivadas del petróleo, son diseñadas en acuerdo con la norma ANSI/ASME B31.8 [1] y construidas, utilizando procedimientos adecuados y calificados mediante aporte de material por soldadura.

Para ello las normas de aplicación en estructuras y recipientes contenedores de presión, *American Welding Society* [2] y *American Society Mechanical Engineering ASME IX* [3], permiten diseñar todo tipo de uniones y calificar soldadores.

La calificación de los procedimientos de soldadura se realiza de acuerdo al Apéndice B de la Norma API 1104 [4]. En todos los casos, la intención práctica en la ejecución del adecuado procedimiento de soldadura, consiste en evitar el quemado o perforación de la cañería y la fisuración en frío.

Ante una falla detectada en un gasoducto en operación, la posibilidad de llevar a cabo una “Soldaduras en Servicio” requiere de una cuidadosa planificación, teniendo en cuenta que la tubería se encuentra con presión y fluido.

El procedimiento de reparación, presentado en este trabajo, consiste en la colocación de camisas alrededor de la sección dañada, “Encamisado”, con un material de características similares y permitiendo de esta manera recuperar estructuralmente el sector dañado.

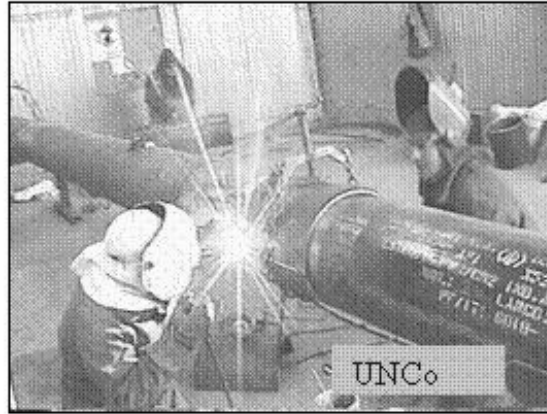


Fig. 1. Reparación en un tramo de Gasoducto (fotografía tomada de referencia [8]).

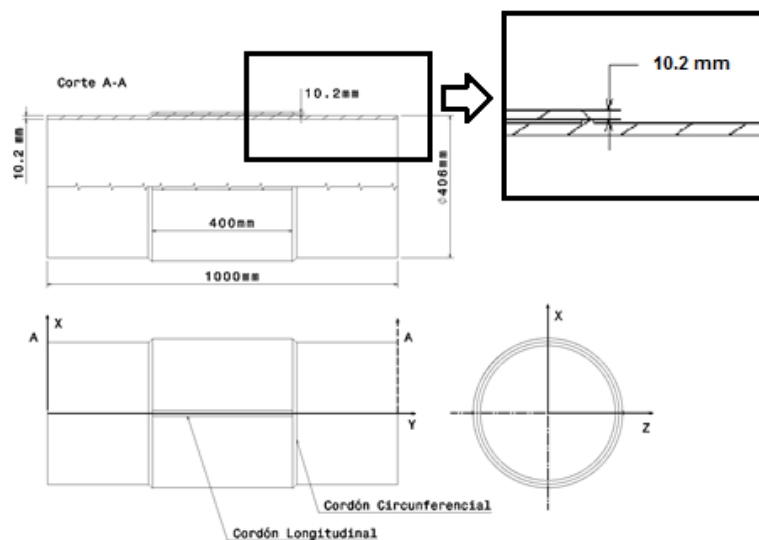


Fig. 2. Esquema dimensional de la reparación.

Diferentes fenómenos metalúrgicos, cambios físicos y mecánicos se producen durante el proceso de soldadura. Es de importancia conocer y predecir dichos cambios con el objeto de asegurar la integridad de los componentes durante el servicio, en particular aquellos fenómenos que se producen cuando se modifican las propiedades físicas del acero con la temperatura.

Estudios recientes de varios investigadores, han desarrollado modelos analíticos y numéricos, con la intención de conocer el comportamiento térmico y mecánico, especialmente, predecir las distorsiones o tensiones residuales que se desarrollan durante el proceso [5, 6].

En este camino y en un trabajo anterior, se propuso un modelo simplificado bidimensional de elementos finitos [7] para representar el comportamiento térmico del proceso de soldadura, pero adoptando valores constantes con la temperatura de las variables antes mencionadas con la temperatura. Dichos resultados se compararon con los obtenidos de ensayos de laboratorio, a través de mediciones con termocuplas [8], circulando agua forzada por el interior de la cañería.

En esta oportunidad, utilizando el modelo simplificado bidimensional se estudia la influencia en considerar la dependencia de las propiedades físicas en función de la temperatura, tales como la conductividad térmica, el calor específico y la densidad del acero.

En la Fig. 1 se presenta una fotografía de una reparación, realizada sobre un tramo de cañería de transporte de gas, mientras que en la Fig. 2 se presenta un esquema constructivo y dimensional de la reparación.

Se trata de un gasoducto presurizado de DN16" y espesor 11.5 mm, fabricados con acero al carbono calidad tipo API 5L Grado X60, sin costura, mientras que el refuerzo tipo "Encamisado" de material tipo ASTM A516 Gr70 o equivalente, considerando un ancho de 400 mm. El procedimiento de reparación está en acuerdo con la norma API 1104 [4].

La chapa de refuerzo es rolada, cuyo espesor resulta del cálculo ya presentado, siendo su valor, incluyendo la corrosión admisible, de 10.2 mm.

La soldadura que plantea la reparación está compuesta por la unión de dos medias cañas para conformar el "Encamisado", mediante una soldadura circunferencial. Los datos del procedimiento de soldadura son:

- Temperatura de precalentamiento,  $T_0$             20°C
- Tensión de soldadura,  $V$                             27 V
- Corriente de soldadura,  $I$                         105 A
- Eficiencia de soldadura,  $\eta$                         0.85
- Velocidad avance del electrodo,  $v$             1.6 mm/seg

La secuencia del procedimiento de soldadura aplicado, del tipo SMAW, consistió en la realización de cuatro pasadas de soldadura con electrodo del tipo E7018. El aporte térmico ( $Q$ ) de la soldadura, en términos de potencia disipada efectiva, utilizando las expresiones dadas en Bibliografías según referencias [9,10], es de 2400 Watts.

La secuencia propuesta para el procedimiento de soldadura, consiste en la realización de cuatro capas o pasadas, es decir la ejecución completa de cuatro cordones de soldadura.

El estudio está centralizado en el análisis del comportamiento térmico y estructural sobre los cordones de soldaduras circunferenciales, ya que los longitudinales entre ambas mitades de la camisa, no presentan un riesgo estructural.

El mecanismo de transferencia de calor está dado por efectos de conducción, se desprecian los fenómenos de radiación, mientras que la conductividad y calor específico se consideran función de la temperatura.

A continuación, en las Figuras 3 a 5, se presentan gráficos de la variación con la temperatura de la conductividad térmica, el calor específico y densidad del acero utilizado [11, 12].

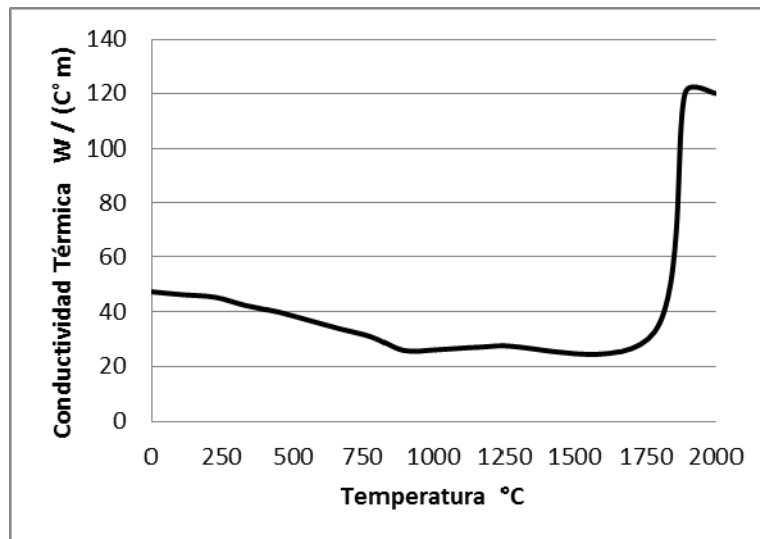


Fig. 3. Variación de la conductividad con la temperatura [11].

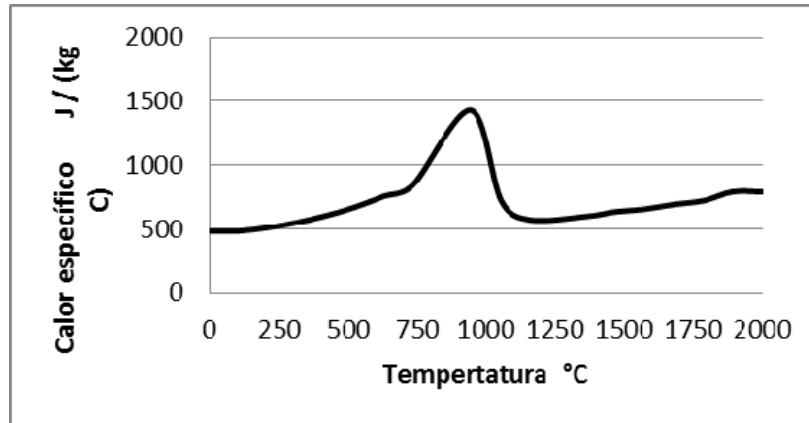


Fig. 4. Variación del calor específico con la temperatura [11].

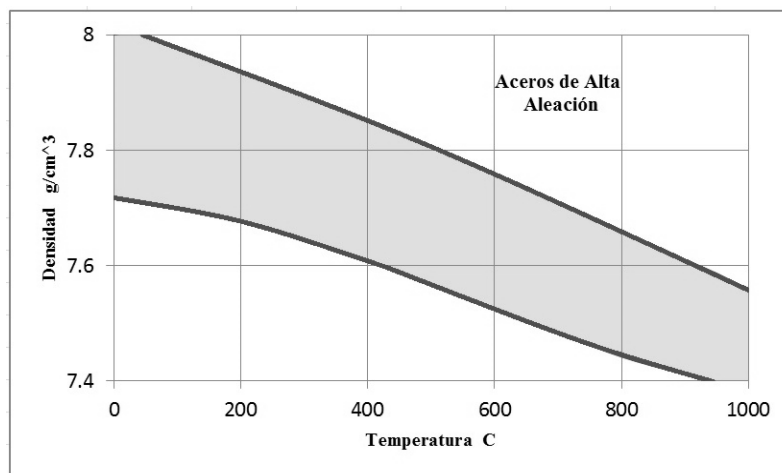


Fig. 5. Variación de la densidad con la temperatura [12].

## 2. MODELO COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS

Con el fin de verificar la integridad estructural del tramo del gasoducto, incluyendo la zona de reparación, se propone un modelo localizado bidimensional del tipo Axil-simétricos del Programa COSMOS/M [13], teniendo en cuenta la simetría que presenta la zona de reparación (gasoducto y refuerzo), respecto de un plano transversal, modelando la mitad del mismo y colocando las condiciones de borde adecuadas. El modelo quedó conformado por 6923 elementos cuadráticos Fig. 6.

Conservativamente se han considerado espesores corroídos en aquellas zonas del componente en contacto con el gas, incluyendo el interior del refuerzo, suponiendo que el defecto es pasante.

## 3. SIMULACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Respecto al tratamiento relacionado con el proceso de soldadura, el modelo considera la energía aportada por cada cordón completo, en su recorrido circunferencial, durante el proceso.

Para la primer pasada, la geometría del cordón de soldadura fue modelada por 47 elementos (volumen que representa la cantidad de material de aporte y la potencia calórica que ingresa al modelo), identifica-

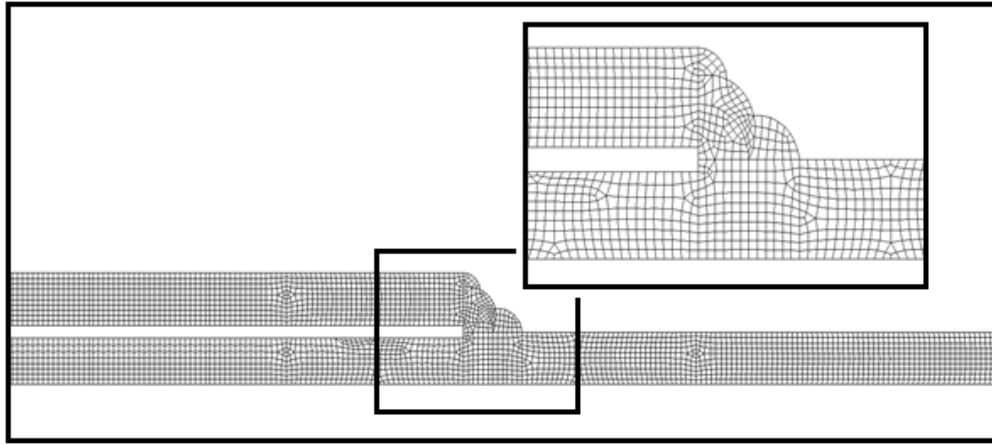
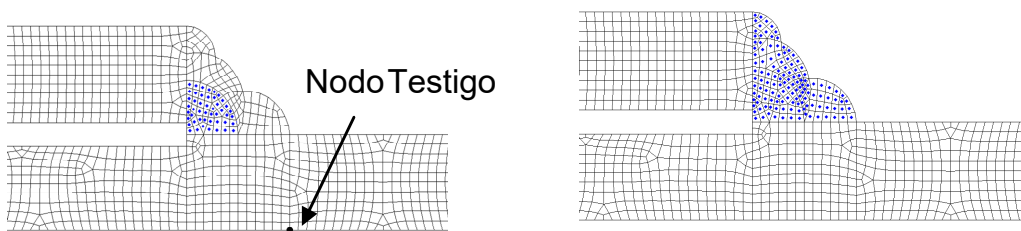


Fig. 6. Modelo de Elementos Finitos Gasoducto DN16".

Fig. 7. Generación interna de calor en zona de aporte – 1<sup>er</sup> y 4<sup>to</sup> cordón. Punto “Test”.

dos con un punto en la Fig. 7, mientras que para la última pasada, en cuatro cordones, se involucran 130 elementos.

El proceso de avance de cada cordón completo se representa mediante funciones temporales, adecuadamente definidas y que actúan en forma sucesiva en los Volúmenes de Carga, activando y desactivando estos volúmenes de acuerdo a la secuencia programada, los cuales en su conjunto, conforman o representan el aporte de soldadura.

En la Fig. 7, se identifica el nodo donde se ubica la termocupla, denominado “Nodo Testigo”, con el objeto de comparar los resultados del modelo con los obtenidos del ensayo [8].

El mecanismo de transferencia de calor está dado por efectos de conducción y convección, se desprecian los fenómenos de radiación, mientras que la conductividad y calor específico se consideran variables con la temperatura.

Las condiciones de contorno térmicas son:

#### 1. Condiciones Convectivas

- Interior del caño, circulación de agua forzada a 20°C, adoptando un valor de convección (h) de 1200 W/m<sup>2</sup> °C
- Exterior del caño, circulación aire calmo a 20°C, adoptando un valor de convección (h) de 30 W/m<sup>2</sup> °C

#### 2. Condiciones Temporales

- Se plantea que en el proceso en el instante inicial, t = 0 seg., la temperatura es de 20°C.

El aporte de calor que aporta el electrodo, en su recorrido en la dirección circunferencial a medida que se van conformando las pasadas, va generando la distribución de temperaturas o isothermas, desarrolladas sobre el componente.

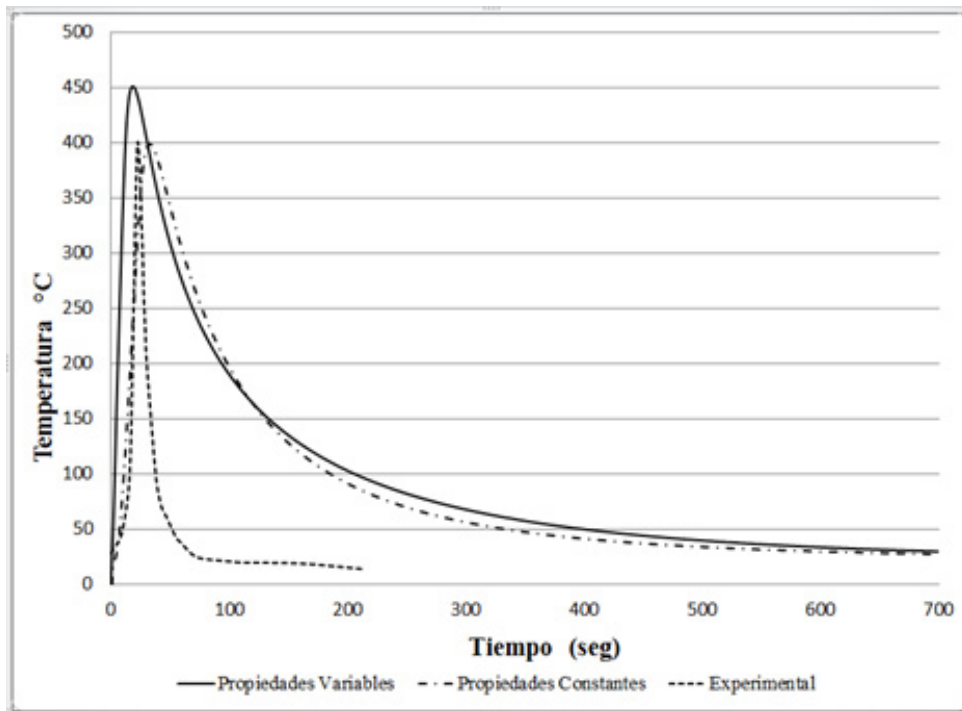


Fig. 8. Evolución térmica mientras avanza el electrodo. Nodo correspondiente al Punto “Testigo”.

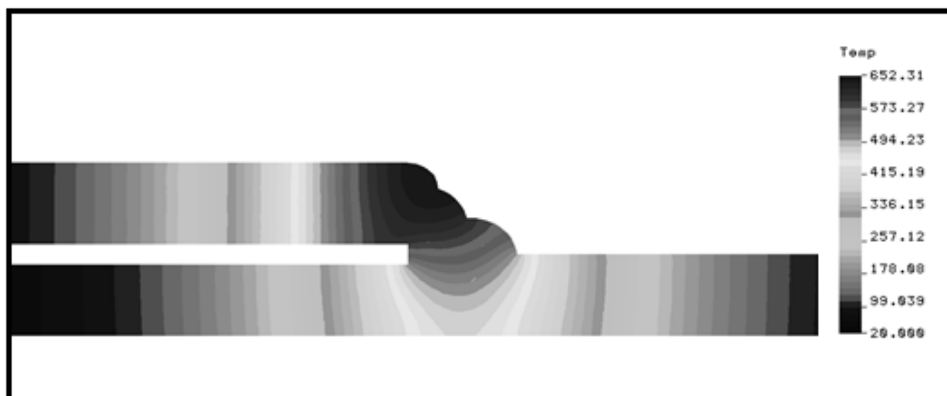


Fig. 9. Distribución de temperaturas durante la última pasada, considerando la dependencia de las propiedades físicas, en función de la temperatura.

#### 4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En la Fig. 8 se muestra la distribución térmica sobre el nodo testigo, para el modelo computacional propuesto y se lo compara con el obtenido en un trabajo anterior, donde se consideraron constantes las propiedades termofísicas con la temperatura [7]. En el gráfico se incluye la distribución térmica obtenida mediante ensayo experimental con la medición mediante una termocupla, según trabajo publicado en referencia [8].

En la Fig. 9 se presenta la distribución de temperaturas de los elementos estructurales de la unión para un instante de tiempo dado, correspondiente a la última pasada, mientras que en la Fig. 10. Se presenta la distribución de temperaturas durante la última pasada, considerando constantes las propiedades físicas, en función de la temperatura [7].

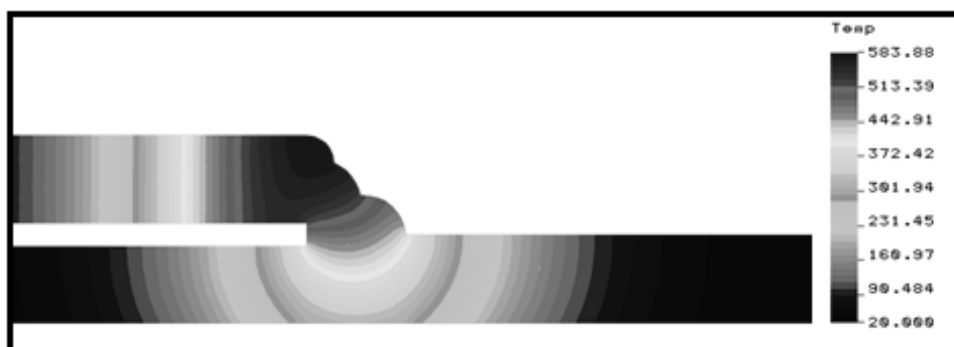


Fig. 10. Distribución de temperaturas durante la última pasada, considerando constantes las propiedades físicas, en función de la temperatura [7].

## 5. DISCUSION DE RESULTADOS

En la Fig. 8, se observa que las máximas temperaturas alcanzadas para el Nudo Testigo, en ambos modelos computacionales y comparadas con la medición en la termocupla, son del mismo orden. Esta situación se debe a que el punto de medición del modelo, Punto Test, está alejado de la zona donde se producen los principales cambios de las propiedades físicas con la temperatura, especialmente el calor específico en el rango de los 750-1000°C (Fig. 4), producto del aporte de material líquido del electrodo.

El tiempo de enfriamiento, “ $t_{8/5}$ ”, es un parámetro fundamental para establecer las transformaciones de fase que pueden dar lugar a los conocidos fenómenos de fisuración en frío tanto en la zona afectada por el calor (ZAC) como en el metal de soldadura. De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio, se encuentran diferencias importantes entre ambos modelos computacionales, respecto a los del ensayo. Esta diferencia probablemente, sea consecuencia del rápido enfriamiento de la termocupla, al encontrarse levemente expuesta en el canal interior del caño, por la circulación de agua forzada.

En las Figuras 9 y 10, para un instante dado de la última pasada, se muestra que la distribución y magnitud de las isoterms en el tiempo, para el caso de considerar las variables físicas con la temperatura, están más concentradas y de mayor magnitud, en la zona cercana al cordón. Este aspecto es fundamental para la determinación de tensiones térmicas o residuales en el componente, con mayor detalle en la zona ZAC, por lo cual es recomendable su inclusión, para futuros desarrollos.

Es importante mencionar, que la magnitud de dichas tensiones residuales, surge como consecuencia de analizar o considerar aquella distribución en la cual el gradiente de temperaturas sea máximo, es decir el que ocasione mayores distorsiones sobre la cañería o gasoducto, cuando la misma se enfríe. Esta condición se producirá durante la primera pasada, ya que el gradiente de temperaturas de la capa sucesiva es menor y no influyen en los resultados finales del análisis.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un procedimiento alternativo para determinar la distribución de temperatura que se producen durante la reparación o “Soldadura en Servicio”, de un sector dañado de una tubería a partir de la simulación computacional mediante un modelo simplificado bidimensional (sólido de revolución) de elementos finitos, donde se consideró e incluyó la dependencia de las variables físicas del material con la temperatura, tales como la conductividad térmica, el calor específico y la densidad.

En un trabajo anterior, se propuso un modelo simplificado bidimensional de elementos finitos [7] para representar el comportamiento térmico del proceso de soldadura, pero adoptando valores constantes con la temperatura de las variables antes mencionadas. Ambos resultados se compararon con los obtenidos de

ensayos de laboratorio, a través de mediciones con termocuplas [8], en el cual se hace circular agua forzada por el interior de la cañería.

En esta oportunidad, utilizando el modelo simplificado bidimensional, utilizado en el trabajo previo, se estudió la influencia en considerar la dependencia de las propiedades físicas en función de la temperatura, tales como la conductividad térmica, el calor específico y la densidad.

Es importante entonces, desarrollar soluciones a problemas de integridad en reparaciones de gasoductos, aplicando procedimientos de análisis sistemático y seguro, previos a ensayos de laboratorio, que permitan a especialistas en soldadura e inspectores, aplicar y optimizar procedimientos, reduciendo riesgos y costos. Es decir a partir de este procedimiento de evaluación, es posible determinar la temperatura óptima de precalentamiento para obtener un estado térmico y tensional aceptable, en base a los lineamientos dados por los códigos de aplicación.

Se plantea para un futuro desarrollo, el análisis del comportamiento térmico y estructural de la unión, considerando un modelo tridimensional que incluya la dependencia de las propiedades físicas con la temperatura, con el objeto de ajustar los resultados obtenidos, respecto del modelo bidimensional simplificado propuesto en este estudio.

Posteriormente, una vez ajustado el modelo de cálculo, producto de la simulación computacional, se deberán evaluar las tensiones térmicas o residuales de los elementos estructurales que conforman la unión, con el objeto de encontrar las tensiones máximas, junto con el resto de los distintos estados de cargas operativos presentes.

Un estudio como el presentado, utilizando “Técnicas Avanzadas de Análisis”, permite verificar el grado de integridad y riesgo que involucra una reparación en campo, simulando y analizando el proceso más eficiente, que asegure su aptitud durante el servicio.

## REFERENCIAS

- [1] ANSI/ASME B31.8. USA. ed. *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*, American Society of Mechanical Engineers, USA (2010)
- [2] Norma de Soldadura, AWS American Welding Society (2010)
- [3] ASME Section IX. USA. *Boiler and Pressure Vessel Code, Welding and Brazing Qualifications*, Includes 2011 Addenda Reprint. American Society of Mechanical Engineers USA (2010)
- [4] API 1104 Edición 2010. *Welding of Pipelines and Related Facilities, Pipeline Segment*, American Petroleum Institute, Reaffirmed April (2010). API Publishing Services, Washington, D.C. (2005)
- [5] Sanzi, H. et al., Evaluación del ciclo térmico de un proceso de soldadura tipo GMAW, en chapas de acero, mediante el método de elementos finitos. Análisis de la influencia de las variables físicas del acero, Congreso SAM/CONAMET 2009, Buenos Aires, Anales del Congreso (Argentina) (2009)
- [6] Anca, A., Cardona, A., Risso, J.M., “3D-Thermo-mechanical simulation of welding processes”, *Mecánica Computacional*, Vol. XXIII, 2301-2318, Bariloche, Argentina, November (2004)
- [7] Sanzi, H., Elvira, G., Turel, A., Simulación Computacional del Procedimiento de “Soldadura en Servicio”, empleado en la Reparación Estructural de un Gasoducto. Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica CAIM, Argentina (2012)
- [8] Zalazar, M., Asta, E., Análisis de soldaduras en servicio para cañerías aplicando diferentes procesos de arco. Publicación ESAB\_CONARCO Nro 128, (Argentina) (2007)
- [9] Lindon T., *Fundamentals of Heat Transfer*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA (1980)
- [10] *Heat Flow in Welding*, McGraw-Hill, Chapter 3, 66-87 (1993)
- [11] ASM Metal Handbook – Volume 1 - *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM International; 10 Ed. (1990)
- [12] Radaj, D., *Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen, Rechen und Massverfahren*, Fachbuchreihe Schweißtechnik, DVD – Verlag GmbH, Duesseldorf (2000)
- [13] Finite Element Program, ANSYS Versión 14.5



## **SIMULATION OF A WELDING PROCESS FOR A STRUCTURAL REPAIR OF A GAS PIPELINE, FROM A SIMPLIFIED TWO-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT MODEL. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PHYSICAL VARIABLES OF STEEL**

**Abstract** – The pipes and components installed in process plants, refineries, compressors and those derived from petroleum, are designed in accordance with ANSI / ASME B31.8 [1] and constructed, using appropriate and qualified procedures by addition of welding material. For this implementation rules structures and pressure vessels, American Welding Society [2] and American Society Mechanical Engineering ASME IX [3], allows to design all kinds of joints and qualify welders. Since a failure is detected in an operation pipeline, the ability to conducting a "Weld in Service", the repair procedure requires careful planning, considering that the pipe is under pressure and with fluid. The repair procedure presented in this paper, involves the placement of a structural reinforcement around the damaged section, with a material having similar characteristics and thus allowing structurally recover of the damaged sector. Based on previous studies, conducted by "Advanced Analysis Techniques", through the Finite Element Method, a simulation of the welding process was carried out. On this occasion, from a simplified two-dimensional finite element model, considering the influence of the temperature dependent of the physical properties with respect to temperature, such as thermal conductivity and specific heat, is studied in the final results.

**Keywords** – Pressure vessel, In service welding repair, Finite Element.