

**EVOLUCIÓN TÉRMICA EN CAÑOS DE USO PETROLERO, DEBIDO
A UN PROCESO DE SOLDADURA.
APLICACIÓN DE UN MODELO SIMPLIFICADO DE ELEMENTOS
FINITOS.
SU COMPARACIÓN CON SOLUCIONES ANALÍTICAS**

Gustavo Elvira, Marcelo Kloster y Héctor Sanzi

Grupo de Ingeniería Estructural GIIE, Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Haedo
París 532 Haedo (1706), Buenos Aires, Argentina
tecsaing@fibertel.com.ar

Key words: Soldadura, Elementos Finitos, Transferencia de Calor

Resumen. *Se presenta un trabajo en donde se determina, a partir del planteo de un modelo simplificado de Elementos Finitos utilizando sólidos tridimensionales, la distribución de temperaturas desarrollada durante un proceso de soldadura del tipo manual, sobre la costura longitudinal de una cañería de uso petrolero, realizada en la planta como consecuencia de una reparación.*

Los resultados obtenidos de la Simulación son comparados con los obtenidos por recientes estudios analíticos realizado por diferentes investigadores, con el objeto de acotar el error de la modelización.

La ventaja en el planteo y desarrollo previo de un modelo como el propuesto, permite optimizar los tiempos de ingeniería para la resolución de un problema como el presentado y proceder en forma adecuada para el diseño del correspondiente procedimiento de soldadura.

1 INTRODUCCIÓN

En todos los procesos de soldadura, se inducen deformaciones y tensiones de origen térmico en el componente, las cuales deben ser evaluadas correctamente ya que pueden comprometer su integridad estructural.

En este camino, se presenta un trabajo en donde se determina la distribución de temperaturas que se desarrolla durante un proceso de soldadura del tipo manual, sobre la costura longitudinal de una cañería de uso petrolero, realizada en una planta industrial como consecuencia de una reparación. Para el estudio se plantea un modelo simplificado de Elementos Finitos utilizando sólidos tridimensionales.

En el análisis se considera que mientras se desarrolla el proceso de soldadura, no hay pérdidas de calor al medio ambiente, es decir se consideran condiciones de borde adiabáticas, y que las transformaciones producidas en el material debido a los cambios de fase no producen modificaciones de las propiedades del material de aporte y base.

Este estudio permitirá conocer la sensibilidad y la validez del modelo propuesto, como así también determinar y ajustar los parámetros que intervienen y controlan el proceso de soldadura.

Los resultados de la Simulación son comparados con los obtenidos por recientes estudios analíticos desarrollados por distintos investigadores, tales como Nguyen, Ohta, Matsuoka, Suzuki y Taeda [1], en donde se utilizó una fuente del tipo doble elipsoidal tridimensional en continuo movimiento.

A continuación se desarrolla cada uno de los procedimientos mencionados.

2 GEOMETRÍA DE LA CAÑERÍA Y DATOS DE PROCESO DE SOLDADURA

La cañería a reparar presenta un Diámetro DN 16" SCh 10 y corresponde a un material del tipo de Acero al Carbono ASTM A106 Gr B. En la Figura 1 se muestra una fotografía del tipo de cañería que será reparada mediante el procedimiento de soldadura del tipo manual, mientras que en la Figura 2 se presenta un esquema general con las dimensiones principales del componente y de la zona de ejecución de la soldadura, es decir detalle de los bordes, raíz y de los biselés.



Figura 1: Fotografía de la cañería a reparar

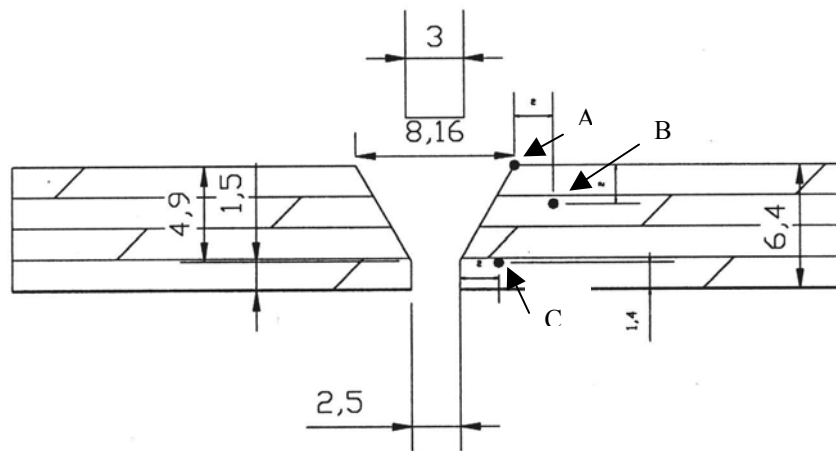


Figura 2 - Geometría de la soldadura y ubicación de Puntos de Evaluación

Los datos del proceso de soldadura son:

| | |
|--|--|
| $T_0 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ | Temperatura de Pre calentamiento |
| $V = 32 \text{ Volts}$ | Tensión en implemento soldador |
| $I = 110 \text{ A}$ | Corriente en implemento soldador |
| $\eta = 0.85$ | Eficiencia de soldadura |
| $\rho = 7700 \text{ kg / m}^3$ | Densidad del material |
| $c = 600 \text{ Joule / kg } ^\circ\text{C}$ | Calor específico del material |
| $r_h = 1.5 \text{ mm}$ | Radio de la semiesfera fuente de calor (asimilada a la punta soldadora que ejecuta el trabajo) |
| $v = 0.0067 \text{ m / s}$ | Velocidad de avance del electrodo |
| $\alpha = k / \rho c$ | Difusividad térmica del material |
| $k = 30. \text{ Watt / m } ^\circ\text{C}$ | Conductividad térmica |

El proceso de soldadura consiste en la realización de una primera pasada de raíz con el electrodo y sucesivamente completar la piletta con varias pasadas hasta alcanzar la altura o espesor de la cañería de 6.4 mm.

El Calor generado por la fuente de calor, en términos de potencia disipada efectiva, esta dado por [6,7]:

$$Q = V \cdot I \cdot \eta = 2992 \text{ Watts} \quad (1)$$

3 SOLUCIÓN ANALÍTICA (Nguyen, Ohta, Matsuoka, Suzuki y Taeda)

Recientes investigaciones realizadas por Nguyen, Ohta, Matsuoka, Suzuki y Taeda [1], proponen un modelo analítico que consiste en una fuente doble elipsoidal tridimensional en continuo movimiento, que irradia calor en todas direcciones sin condiciones de contorno, Figura 3, tal que:

$$T = T_0 + \frac{3\sqrt{3}Q}{\rho c \pi \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{dt'}{[12a(t-t') + r_h^2]^{3/2}} e^{\left(\frac{-(x-vt')^2 + y^2 + z^2}{4a(t-t')} \right)} \quad (2)$$

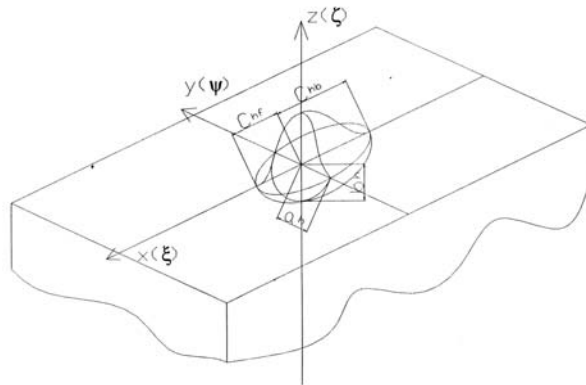


Figura 3 – Parámetros geométricos y modelo de fuente calórica

Las coordenadas x , y y z son las coordenadas espaciales de los diferentes puntos sobre la cañería en donde se desea conocer la temperatura. Entonces a partir de tres puntos definidos sobre la cañería, se determina la distribución térmica utilizando la expresión anterior, tales como:

Punto A = (0.6384, 0.0028, -0.00012), sobre la superficie exterior cercano a la última pasada.

Punto B = (0.6384, 0.004995, -0.00312), longitud intermedia entre la raíz y la superficie.

Punto C = (0.6384, 0.003, -0.00512), cercano a la raíz.

En una segunda etapa, estos resultados serán comparados con los obtenidos y publicados por Salazar et al. realizado por el Laboratorio Metalográfico y de Soldadura de la Universidad Nacional del Comahue [2].

En las figuras 4 a 6 se muestra la evolución térmica, calculada para los tres puntos indicados y que corresponden a la primera pasada. Dichos resultados y sus gráficos fueron obtenidos a través de la implementación de la expresión (2), en el programa de cálculo Matemática [3].

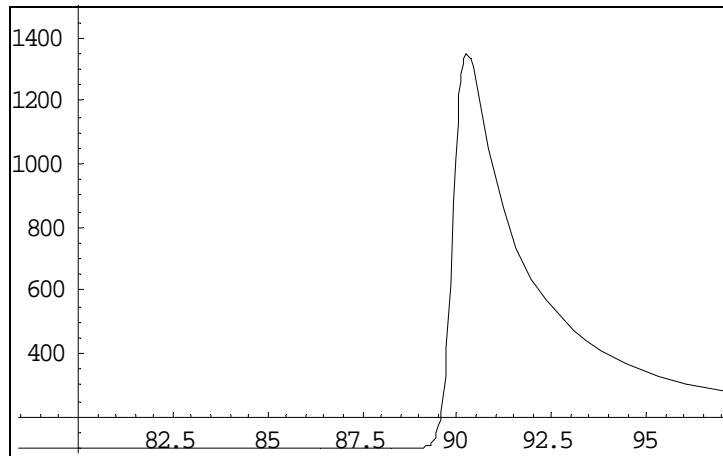


Figura 4 - Punto A: Evolución térmica (Instante inicial)

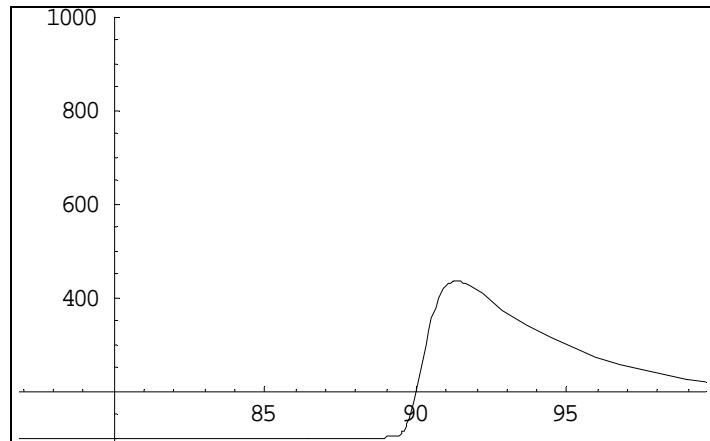


Figura 5 - Punto B: Evolución térmica (Instante inicial)

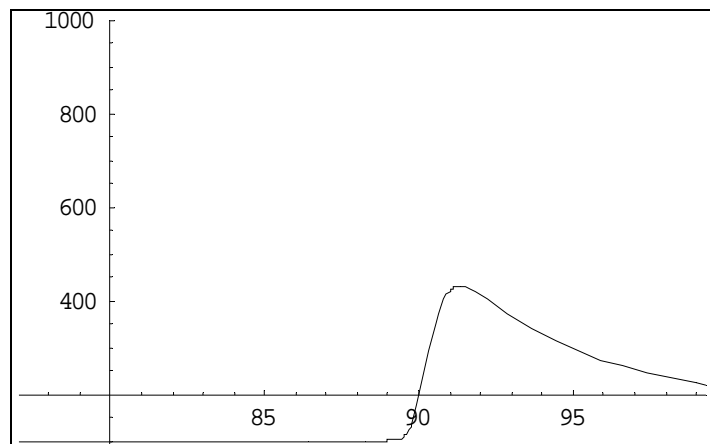


Figura 6 – Punto C: Evolución térmica (Instante inicial)

4 SIMULACION COMPUTACIONAL

Teniendo en cuenta las dimensiones de la cañería, confinando el modelo a un marco local y despreciando el radio de curvatura, se propone un modelo tridimensional de placa plana utilizando elementos sólidos cuyas dimensiones, largo y ancho, en el plano de la placa están lo suficientemente alejados de la piletta líquida para no afectar los resultados obtenidos en la zona de interés.

En la Figura 7 se presenta el esquema propuesto, conformado por una doble placa de espesor 6.4 mm y en donde las dimensiones longitud y ancho son superiores que la del espesor.

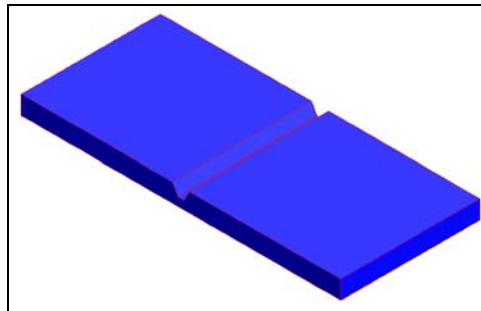


Figura 7 – Modelo propuesto de las placas a soldar y de la zona de unión.

En base al esquema propuesto, Figura 7, teniendo en cuenta la simetría del componente con respecto a un plano transversal, pasante por el cordón de soldadura, se consideró solo una de las placas colocando las condiciones de borde adecuadas, es decir desplazamientos transversales nulos y desde el punto de vista térmico se consideró flujo calórico nulo en la dirección normal al plano de simetría.

El modelo de cálculo se realiza mediante el uso del programa de elementos finitos COSMOS/M [4], el cual quedó conformado por 19227 nodos y 17650 elementos SOLID (sólido de 8 nodos) del programa mencionado, Figura 8.

Como fue indicado anteriormente, el aporte de material de soldadura se efectúa a partir de varias capas o pasadas, ejecución de cordones de soldadura longitudinal hasta alcanzar la superficie superior, según procedimientos establecidos en la norma de aplicación ASME IX [5]. Al final de proceso se determina la distribución de temperatura que caracteriza aproximadamente al proceso.

Una vez encontrada esta distribución de temperaturas se analizan los resultados, debiéndose elegir aquella distribución en la cual el gradiente de temperaturas sea el máximo entre pasadas. Este gradiente será el que ocasione mayores distorsiones sobre la cañería, cuando la misma se enfríe.

Para la cañería, las mayores distorsiones se producirán durante la primera pasada, ya que el gradiente de temperaturas de las capas sucesivas es menor y no influyen en los resultados finales del análisis.

La distribución de temperaturas en función del tiempo se calcula mediante el método de los elementos finitos con el programa COSMOS/M [4].

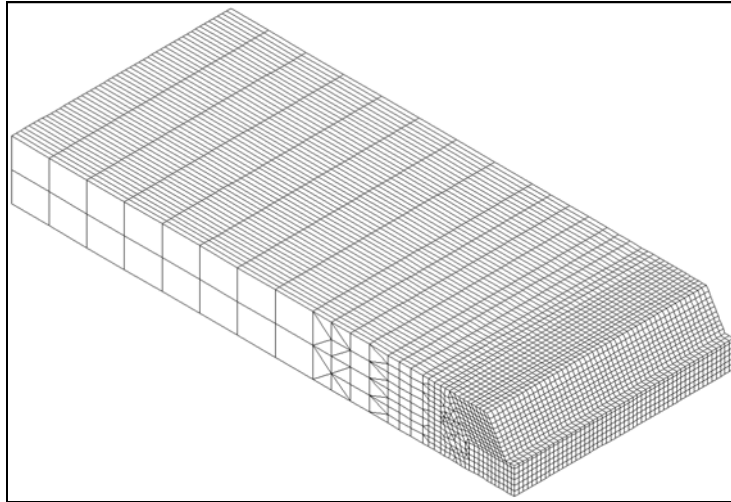


Figura 8 - Modelo de elementos finitos (19227 nodos y 17650 elementos)

La geometría del cordón de soldadura fue modelada por conjuntos de 12 elementos sólidos, que denominamos Volumen de Carga (volumen que representa la cantidad de material de aporte incorporado), identificados en la Figura 9.

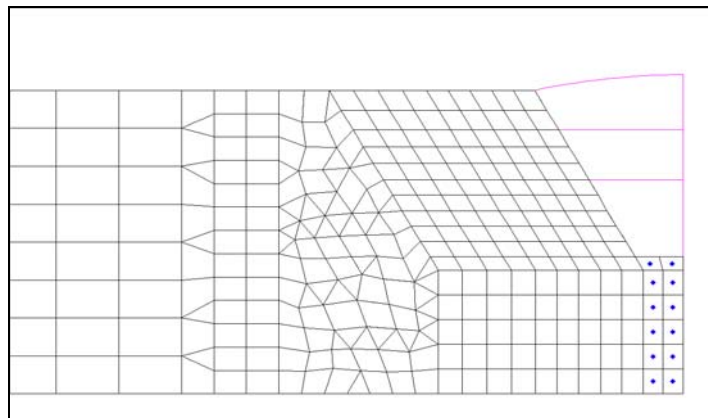


Figura 9 - Generación interna de calor en la zona de aporte

El proceso de avance del electrodo se representa mediante funciones temporales, adecuadamente definidas y que actúa en forma sucesiva en los Volúmenes de Carga, los cuales en su conjunto, conforman o representan el aporte de soldadura que corresponde a la primera capa, es decir funciones que toman un valor máximo del aporte calórico durante un determinado instante de tiempo, mientras el electrodo pasa por dicho Volumen, teniendo en cuenta la velocidad del electrodo de 6.7 mm/seg.

En la zona en donde se instala la pileta líquida (zona de aporte de material de soldadura), se densifica la cantidad de elementos para mejorar la precisión en la representación de los altos gradientes térmicos.

La representación térmica es incorporada en el modelo a través del procedimiento que se describe a continuación.

El mecanismo de transferencia de calor esta dado por efectos de conducción y se desprecian los fenómenos de radiación y cambios de fase, es decir los parámetros físicos que intervienen en el problema, conductividad y calor específico se consideran constantes e independientes de la temperatura, simulando que el proceso se desarrolla rápidamente.

Las condiciones de contorno son:

a.- Condición Adiabática

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

en todas las superficies exteriores de la placa. Esta condición es conservativa, no hay pérdida de calor al medio externo.

En esta etapa se determina la distribución aproximada de temperatura que caracteriza al proceso.

b.- Condiciones temporales

Como condición temporal se plantea que en el proceso en el instante inicial, $t = 0$ seg, la temperatura de la placa es la de precalentamiento, 100 °C.

El Aporte de Calor, para una duración de 30 segundos, para la mitad del modelo, según expresión (1), es:

$$\text{Aporte calórico, "Q"} = 2992 / 2 \text{ Watt}$$

El proceso queda definido por el aporte de soldadura sobre un Volumen de Carga (Volumen elemental) que se va desplazando longitudinalmente de acuerdo al avance del electrodo. Cada aporte elemental de calor tiene una duración de 0.072 segundos.

El calor generado, expresado como densidad de potencia, es de $(2992/2)$ Watt / 1.124×10^{-9} m³ (Volumen elemental).

En la figura 10 y 11 se muestran la ubicación transversal de los nodos evaluados en la dirección del avance del electrodo.

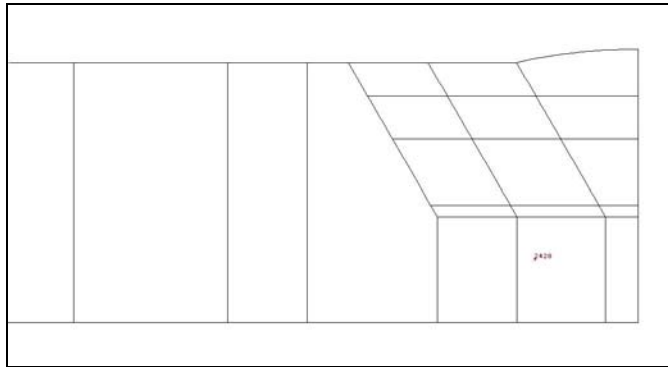


Figura 10 - Ubicación transversal de nodos analizados

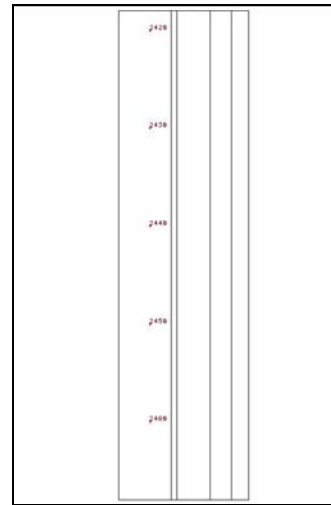


Figura 11 - Ubicación longitudinal de nodos analizados

En las figuras 12 a 13 se presentan los resultados obtenidos de la distribución de temperaturas, isotermas, que se desarrollan sobre la placa en los instantes 0.9 y 1.8 segundos, producto del proceso de soldadura manual.

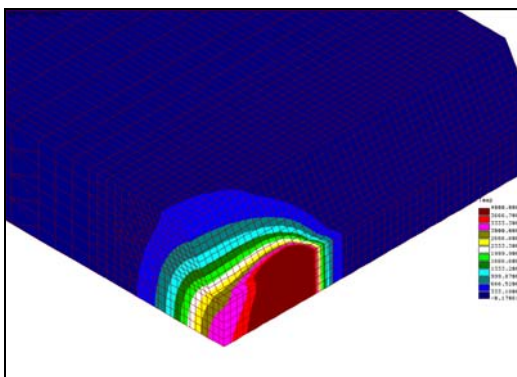


Figura 12 - Distribución térmica $t = 0.9$ seg

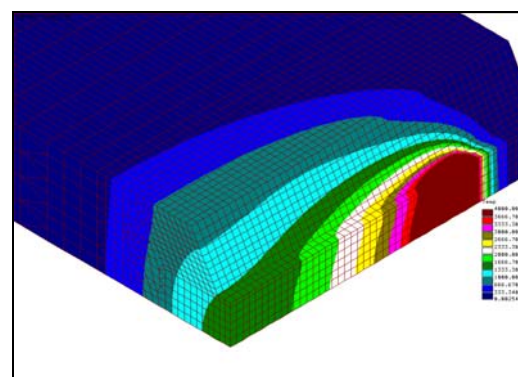


Figura 13. Distribución térmica $t = 1.8$ seg

En la figura 14 se presenta los resultados correspondientes a la evolución térmica y temporal de los nodos coincidentes con el Punto A, en la dirección de la costura.

Analizando los resultados, se observa que el gradiente máximo se produce durante el último instante, sobre el nodo 2460, en el instante de 3.6 segundos.

Debido a las condiciones adiabáticas adoptadas en el modelo, a los valores máximos de temperaturas en cada uno de los nodos que conforman los Volúmenes de Carga, se deberá descontar la temperatura residual que queda almacenada en la placa, que es del orden de los 300/400 grados dependiendo del punto de interés: Para el inicio del proceso (primer Volumen de Carga) la temperatura es,

$$T_{\text{max-final - Nodo 2460}} = T_{\text{max}} - T_{\text{residual}} = 2000 \text{ C} - 400 \text{ C} = 1600 \text{ C}$$

Las máximas tensiones sobre la placa se producirán cuando el componente se enfríe, tomando como referencia la máxima temperatura alcanzada del orden de 1600°C (nodo 2460).

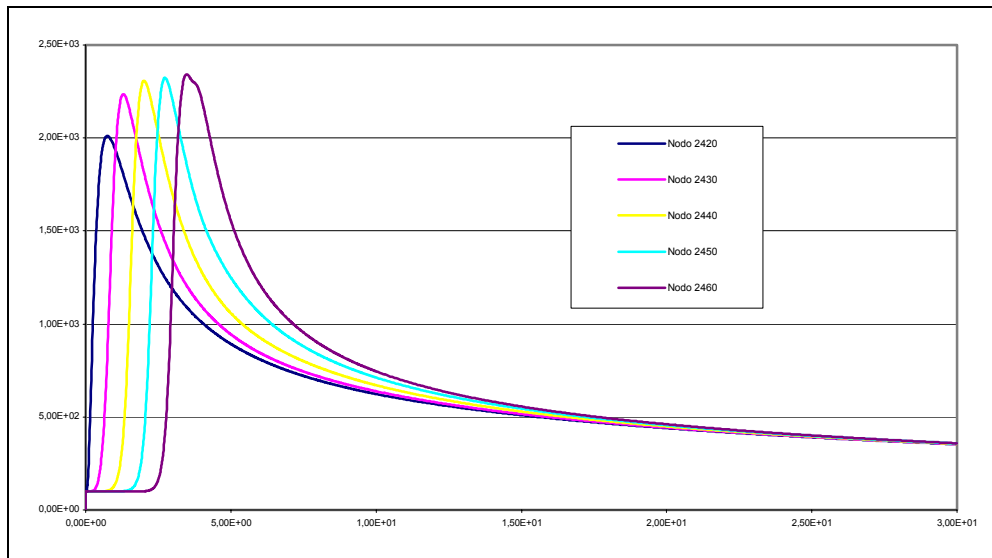


Figura 14 - Evolución térmica en nodos - Punto A

5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se presenta un trabajo en donde se determina la distribución de temperaturas que se desarrolla durante un proceso de soldadura del tipo manual de reparación, sobre la costura longitudinal de una cañería de uso petrolero.

Se plantean dos procedimientos de análisis, uno de ellos utilizando recientes estudios analíticos desarrollados por Nguyen, Ohta, Matsuoka, Suzuki y Taeda [1], en donde utilizan una fuente doble elipsoidal tridimensional en continuo movimiento, y el otro a partir de un modelo simplificado de Elementos Finitos utilizando sólidos tridimensionales.

En ambos estudios se considera que el proceso de soldadura es adiabático, es decir no hay pérdidas de calor al medio ambiente y que las transformaciones producidas en el material debido a los cambios de fase no producen cambios de las propiedades del material que intervienen en el proceso.

Mediante el modelo de elementos finitos se simuló el comportamiento térmico que se desarrolla en las placas, simplificación de la cañería, cuando es sometido a una fuente calorífica, producto del calor generado durante un proceso de soldadura manual.

Se observa un grado de similitud en los resultados obtenidos entre ambos procedimientos de análisis.

De los resultados de la Simulación Computacional, los valores máximos de temperatura están en el orden de los 1600 C, mientras que los obtenidos por Nguyen, Ohta, Matsuoka, Suzuki y Taeda, la temperatura máxima están en el orden de los 1400 C.

Se resaltan diferencias entre ambos procedimientos.

La distribución de temperaturas alcanzadas por la fuente calórica delante del electrodo, es mayor en el modelo computacional que en el modelo analítico. Este es atribuible a la forma y tipo de la función elíptica de transferencia de calor propuesta por el procedimiento analítico, en donde la distribución de las elipses de transferencia se ubican hacia atrás de la fuente de calor y radialmente en todas direcciones, Figura 3.

Para el caso real, teniendo en cuenta la geometría de la placa o cañería, las isotermas tienen una distribución diferente, influenciadas particularmente por el espesor, entre otras variables. Por lo tanto, las temperaturas alcanzadas sobre la placa a través de la simulación computacional son levemente superiores, del orden de los 300-400 C.

En un próximo desarrollo se compararán los resultados obtenidos en este trabajo con los que resultan de ensayos realizados sobre una cañería, a partir de mediciones con termocuplas, dispuestas adecuadamente y coincidentes con los puntos de evaluación A, B y C.

Este futuro trabajo, actualmente en desarrollo, tendrá como objetivo final acotar el error de la modelización y conocer la sensibilidad y validez del modelo simplificado de elementos finitos ante los parámetros que controlan el proceso de soldadura y su comparación con las recientes investigaciones en transferencia de calor, como el presentado.

6 REFERENCIAS

- [1] Nguyen, Ohta, Matsuoka, Suzuki y Taeda, *Analytical solutions for transiente temperature of semi-infinite body subjected to 3D moving heat sources*, Welding Research, August 1999
- [2] Salazar, Quesada y Asta, *Modificaciones de la Microestructura producida en al zona afectada por calor de un acero API 5L X60 mediante el uso de distintas temperaturas de precalentamiento*, Laboratorio Metalográfico y de Soldadura de la Universidad Nacional del Comahue. 2001
- [3] Programa Matemática, Wolfram Reasearch Inc.
- [4] COSMOS/M, Finite Element Program. (2001)
- [5] ASME Sección IX – Edición 2001 Add.2004
- [6] Fundamentals of Heat Transfer. Lindon Thomas Prentice Hall Inc - 1980
- [7] Heat Flow in Welding, Chapter 3 pag 66-87 – MacGraw-Hill