

NUMERICAL SIMULATIONS FOR THE PREDICTION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN ELECTRIC ARC WELDING

SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

MSc. Wilson Tafur*, MSc. Holger Cacula*, MSc. Edison Martínez*, Ing. Jorge Velasco*

* Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica GIMUP
Km 1 Vía Bucaramanga Ciudad Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia
Teléfono: (57+7) 5685303 - 5685304.
E-mail: {wilson.tafur, holger.cacula, edisonmartinez}@unipamplona.edu.co.

Abstract: The present study aims to simulate single-pass welds using three computer-assisted numerical approaches: an analytical-numerical algorithm for heat transfer in welds, the SmartWeld software and a finite element model implemented in the ANSYS software. Its applicability was evaluated in the prediction of the temperature distribution below the weld bead in plates of semi-infinite extension and finite thickness. The results of the simulations were compared with temperature data obtained from the welding of AISI P20 steel using the autogenous TIG process with constant direct current and energy of 10 kJ / cm. The thermo-physical properties of the base material and boundary conditions were kept similar between simulations for comparative purposes. The study shows how the simulations carried out complement each other and can be validated for their applicability in the development of welding procedures.

Keywords: Numerical simulation; Temperature distribution; Electric arc welding

Resumen: El presente estudio pretende simular soldaduras de pase único usando tres aproximaciones numéricas asistidas por computador: un algoritmo analítico-numérico de transferencia de calor en soldaduras, el software SmartWeld y un modelo de elementos finitos implementado en el software ANSYS. Fue evaluada su aplicabilidad en la predicción de la distribución de temperaturas abajo del cordón de soldadura en platinas de extensión semi-infinita y espesor finito. Los resultados de las simulaciones fueron comparados con datos de temperaturas obtenidas de la soldadura del acero AISI P20 usando el proceso TIG autógeno con corriente continua constante y energía de 10 kJ/cm. Las propiedades termo-físicas del material base y condiciones de contorno fueron mantenidas similares entre una simulación y otra para fines comparativos. El estudio muestra como las simulaciones realizadas se complementan y se pueden validar para su aplicabilidad en el desarrollo de procedimientos de soldadura.

Palabras clave: Simulación numérica; Distribución de temperaturas; Soldadura por arco eléctrico

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de parametrización térmica de las técnicas de soldadura requiere que exista un modelo previamente probado y validado dentro de un rango operativo variable, con los parámetros correctos para describir los fenómenos del proceso desde el punto de vista de la tecnología del proceso, la metalurgia y

transferencia de calor, según se requiera en el desarrollo de los procedimientos de soldadura (Niño, 2001). En el presente trabajo se hizo la predicción de la distribución de temperaturas abajo del cordón de soldadura mediante tres formas diferentes de simular numéricamente el proceso de soldadura por arco eléctrico: Primero, se utilizó un programa de computador que usa un modelo analítico que ha sido probado y validado

experimentalmente por Santos (Santos, 2001), para estudiar los parámetros térmicos de zona soldada y la fuente de calor (arco eléctrico) considerando el material base como siendo una platina semi-infinita con espesor finito y la fuente de calor con una distribución gaussiana en movimiento en condiciones estacionarias. Los parámetros que caracterizan la fuente de calor estimados con el algoritmo analítico-numérico, al ser ajustados para la predicción del campo de temperaturas, fueron utilizados como entrada en las otras dos simulaciones siguientes manteniendo las mismas condiciones de contorno y propiedades termo-físicas del material base. Luego, fueron comparadas las temperaturas predichas con las obtenidas en el software SmartWeld considerando la fuente de calor en movimiento con distribución gaussiana en condiciones de estado estacionario. Finalmente, se simuló un modelo de elementos finitos usando el software ANSYS bajo condiciones transientes con la fuente de calor en movimiento.

1.1 El algoritmo analítico-numérico

En un algoritmo desarrollado por Santos se implementó la solución analítica de Boo (Boo y Cho, 1990), que considera un espesor finito de la platina, una distribución gaussiana para el flujo de calor proveniente del arco de soldadura y las pérdidas al ambiente a través de las superficies de la platina. Dicho modelo ha sido validado experimentalmente e implementado por una solución numérica para una fuente de calor en movimiento y se utiliza para determinar los parámetros de la fuente de calor (eficiencia térmica y diámetro efectivo) en función de la distribución de temperatura predicha por el algoritmo y las dimensiones de una isoterma obtenida experimentalmente. Los parámetros utilizados en el modelo son, σ , denominados por Santos como, parámetro de distribución del flujo de calor y, η_t , llamados eficiencia térmica de la fuente. El parámetro de distribución del flujo de calor de la fuente se define a partir de un modelo gaussiano circular para la distribución de la fuente de calor como se observa en la Ecuación (1).

$$q''(x, y, t) = \frac{\eta_t \cdot I \cdot U}{2\pi \cdot \sigma^2} \exp\left[-\frac{(x - vt)^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

Donde q'' [W / m²] es el flujo de calor; x [m] es la dirección de la soldadura e y [m] es la coordenada perpendicular a ella, como se muestra en la figura xx para una placa de espesor finito y [m]; t [s] es el momento; v [m / s] es la velocidad de soldadura; I [A] la corriente de

soldadura; U [V] el voltaje del arco eléctrico; η_t [adimensional] la eficiencia térmica de la fuente de calor en soldadura y, σ [m], es el parámetro de distribución de flujo de calor a estimar. Este tipo de modelo se usa para diferentes procesos de soldadura, pero se usa particularmente aquí para soldadura por arco donde el producto $\eta_t \cdot I \cdot U$ representa el calor total absorbido por la parte (en vatios).

Para estimar la eficiencia térmica se supone una dependencia lineal con las temperaturas máximas predichas por el algoritmo (distribución de temperatura en la soldadura). Para calcular la temperatura máxima para un punto dado (x , y , z) dentro de la parte se utiliza la Ecuación (2).

$$T_p(x, y, z, t) = \eta_t \cdot \Theta(x, y, z, v, \sigma, I, U, k, \alpha, T_o, e, h_1, h_2, \dots) \quad (2)$$

Donde k [W / (m.K)] es la conductividad térmica de la pieza, α [m² / s] es la difusividad térmica. Se muestran otros parámetros de entrada, como el grosor de la pieza de trabajo, los coeficientes de transferencia de calor debido a la convección y la radiación a través de las superficies de la pieza de trabajo, y la temperatura inicial T_o [°C]. Estos parámetros se mantienen constantes mientras se estiman los parámetros de la fuente de calor. Por lo tanto, para una sección transversal de soldadura dada, la Ecuación (2) puede reescribirse como:

$$T_p(y, z) = \eta_t \cdot \Theta(y, z, \sigma) \quad (3)$$

Conociendo las dimensiones de una isoterma en la soldadura, se pueden definir dos puntos distintos de la soldadura (y_1, z_1) y (y_2, z_2) en la sección transversal de la soldadura, como se observa en la Fig. 1.

Los parámetros de distribución del flujo de calor (que es la mitad del diámetro efectivo del arco) y la eficiencia térmica del arco deben considerarse constantes, de modo que la Ecuación (3) puede reescribirse como se muestra en la Ecuación 4.

$$\frac{T_p(y_1, z_1)}{\Theta(y_1, z_1, \sigma)} = \eta_t \frac{T_p(y_2, z_2)}{\Theta(y_2, z_2, \sigma)} \quad (4)$$

Al calcular el parámetro de distribución de flujo de calor σ , es fácil calcular la eficiencia térmica despejándola de la Ecuación (4).

Una representación esquemática de los parámetros utilizados en el modelo analítico-numérico se puede ver en la Fig. 1.

El modelo analítico-numérico de Santos fue

diseñado para ser aplicado a la soldadura de platina con espesor finito y ancho semi-infinito en condiciones estacionarias. Ya fue aplicado con éxito en la reparación de aceros para moldes y matrices al hacerse la predicción del perfil de temperaturas y las isotermas más importantes para poder establecer el posicionamiento entre cordones con el fin de promover el revenimiento de zonas endurecidas mediante las técnicas de doble capa y cordón de revenido (Santos y Silva, 2006; Tafur y Niño, 2005; Suarez *et al.*, 2015).

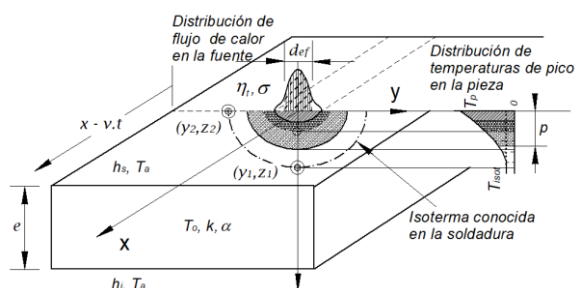


Fig. 1. Parámetros del modelo analítico-numérico tridimensional de soldadura (Tafur y Güts, 2012)

1.2 El software Smart Weld

Smart Weld es un software de *Sandia National Laboratories*, que parte de la determinación de las propiedades termo físicas de los materiales para elaborar modelos de soldadura a partir de dimensiones de una muestra de soldadura experimental (Fuerschbach y Eisler, 2002). Las soluciones usan fuente de calor en movimiento con ecuaciones de flujo de calor por conducción que son usadas para estimar la difusividad térmica efectiva y la conductividad térmica en varias aleaciones de uso común en Estados Unidos por medio de parámetros adimensionales para soluciones 2D y 3D que son correlacionados con datos experimentales y la teoría de la soldadura.

Las soluciones han sido exitosas en la predicción del tamaño de la zona fundida, el perfil de temperaturas de metal base y en la atención de requerimiento de procesamiento por soldadura. Los modelos son simplificados al tener en cuenta las dimensiones de la fuente de calor, el efecto del calor latente de fusión, las pérdidas de energía de la pieza y la convección en la zona fundida. Esto es algo que no es común encontrar en la mayoría de los modelos de conducción de calor para soldadura los cuales han resultado inciertos a pesar de utilizar sofisticadas soluciones analíticas.

En el trabajo de Fuerschbach (Fuerschbach y Eisler, 2002) se evidencia que la mejor manera de obtener los valores apropiados para los modelos de conducción es hacer que las soldaduras exhiban las características del proceso termo físico presente a partir de la elección de las dimensiones de una muestra de soldadura y la simulación del flujo de calor conociendo la potencia, la velocidad de soldadura, la eficiencia térmica del proceso y la dimensión de la fuente de calor. También, se realiza el ajuste de los modelos de conducción debido al efecto de variaciones en las dimensiones de la zona fundida debido a corrientes convectivas de manera similar a las que se realizan en el algoritmo analítico-numérico de Santos (Santos, 2001), debido a esto estas soluciones fueron comparadas en el presente trabajo considerando apenas la soldadura de cordón único sobre una platina de espesor finito y ancho infinito.

1.3 El método por elementos finitos en la solución de problemas de soldadura

La solución de problemas estructurales y térmicos en soldadura usando métodos numéricos ha sido ampliamente utilizado, especialmente el método por elementos finitos (MEF). A nivel estructural ha sido utilizado para simular desde un comportamiento esfuerzo-deformación y desgaste para un material específico (Canseco *et al.*, 2011; Hernandez *et al.*, 2018) hasta la determinación del estado de esfuerzos y deformaciones de componentes mecánicos con formas variadas y tridimensionales (García *et al.*, 2014). En soldadura por arco eléctrico, en particular con el proceso TIG, se ha utilizado con éxito en la predicción de la distribución de esfuerzos residuales (Campos *et al.*, 2006a).

En simulación térmica, el método de elementos finitos permite tomar en cuenta: las propiedades termo-físicas del material que varían con la temperatura (como conductividad térmica, difusividad térmica, calor específico y densidad), los diferentes modos de transferencia de calor con el ambiente (convección y radiación) y a lo largo de piezas (conducción) y el régimen de los estados (estacionario y transiente) (Campos *et al.*, 2006b). También se puede considerar la forma y distribución de la fuente de calor y en movimiento, como fue propuesto por Goldak (Goldak *et al.*, 1984) al introducir por primera vez un modelo de fuente de calor tridimensional con forma geométrica de doble elipsoide en movimiento (Fig.2), donde la distribución de calor es considerada de tipo Gaussiana (en la

cual el flujo de calor es distribuido por el volumen de la fuente de calor) y dos semi-elipsoides (una al frente y otra atrás de la fuente de calor) delimitan la distribución de temperatura (Guerra, 2017).

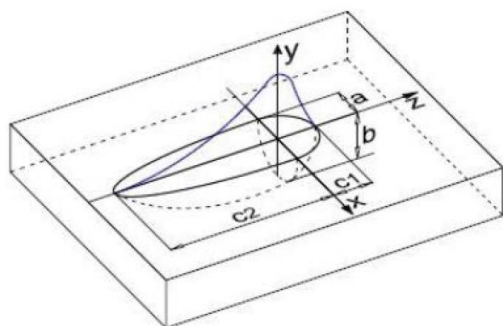


Fig. 2. Modelo de distribución de calor en el arco eléctrico. Fuente: Goldak, 1984

Un modelo basado en el método de elementos finitos fue utilizado por Goldak (Goldak *et al.*, 1984) para estimar el campo de temperatura de un cordón de soldadura depositados sobre una placa. El autor mostro que esta fuente de calor tridimensional puede eliminar la deficiencia asociada a los modelos gaussianos más simples en 2D conocidos hasta entonces, en relación a la predicción de la temperatura de uniones soldadas con penetración profunda (Guerra, 2017).

En el presente trabajo la fuente de calor se asumió como siendo tridimensional con modelo gaussiano circular para la distribución de calor en la fuente, igual al del algoritmo analítico-numérico desarrollado por Santos (Santos, 2001).

2. METODOLOGIA

Fueron realizados inicialmente depósitos de soldadura en platina semi-infinita de 150x150x25 mm usando como metal base el acero AISI P20. Este acero viene en el estado templado y revenido, con una dureza de 30 a 34 HRC. Fue utilizada una fuente de soldadura TIG con los parámetros de la Tabla 1 en cordones de pase único sin metal de adición.

Tabla 1. Condiciones de proceso TIG

Magnitud física	Valor	Unidad
Corriente	124	A
Tensión	10,5	v
Velocidad de avance	10	cm/min
Energía	10	kJ/cm
Potencia	1300	W
Gás de protección (Argón)	12	l/min
Diámetro de boquilla	10	mm

Fuente: Autor

2.1 Estimaciones con algoritmo analítico-numérico

Fueron realizadas macrografías de la sección transversal de las soldaduras usando una lupa estereoscópica. Las muestras fueron atacadas con Nital al 2% para revelar las dimensiones de las regiones de soldadura. Las imágenes digitales fueron colocadas en software CAD para realizar la medición de las dimensiones de la ZAC del cordón de soldadura (penetración y ancho de la isoterma Ac1) así como las de la zona fundida ZF.

A partir de las dimensiones de una isoterma conocida; en este caso, la Ac1 se determinó el campo de temperaturas de pico, calculadas computacionalmente mediante ajuste de la eficiencia térmica en el algoritmo analítico numérico de transferencia de calor (Santos, 2001; Santos y Silva, 2006). Se ingresaron al algoritmo los valores de los parámetros de soldadura utilizados como corriente, velocidad de soldadura, espesor de platina, y diámetro estimado de la fuente de calor junto a las propiedades térmicas del material base como conductividad térmica y la difusividad térmica.

Las condiciones térmicas del modelo analítico-numérico son mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones térmicas del modelo analítico-numérico y en modelo FEM

Magnitud física	Nomenclatura	Valor	Unidad
Espesor de platina	e	25	mm
Temperatura inicial	T ₀	225	°C
Conductividad térmica	k	20	W/m. K
Difusividad térmica	α	6	mm ² /s
Calor específico	c _e	460	J/kg. °C
Coef. de transferencia de calor	h _i ; h _s	10	W/m ² . K
Corriente de soldadura	I	124	A
Tensión de soldadura	U	10,5	v
Potencia de la fuente	q	875	W
Velocidad de avance	v _s	10	cm/min

Fuente: Autor

2.2 Simulaciones con software SmartWeld sobre la platina de ancho infinito y espesor finito en estado estacionario

Fue utilizado el módulo ISO-3D GAUSS del software SmartWeld con fuente de calor gaussiana en movimiento en condición estacionaria para estimar las dimensiones de las isothermas resultantes y el perfil de temperaturas usando como entrada los parámetros de la fuente de calor previstos con el modelo analítico numérico que corresponden a la eficiencia

térmica y el radio de la fuente de calor (η , σ).

Fueron mantenidas las mismas propiedades termo físicas del acero P20 mostradas en la Tabla 2. En el software SmartWeld se simuló el acero NY80 que es un acero al cromo-níquel similar al P20. Los datos de entrada para obtener las isothermas apenas fueron la velocidad de avance de soldadura, la potencia de soldadura, la temperatura inicial del metal base y el diámetro de la fuente de calor.

2.3 Simulaciones con el método de elementos finitos

Se aplicó el método de los elementos finitos, considerando los fenómenos térmicos mediante el uso de un programa no lineal y transitorio. Se usaron como parámetros de entrada: las dimensiones de la pieza, las condiciones de contorno, las propiedades del material y parámetros de la fuente de calor previstos en el algoritmo analítico-numérico.

Para la simulación por elementos finitos, se usó el software de ingeniería asistida por computador ANSYS R16. El sistema de análisis empleado fue *Transient Thermal*, en donde se trabajó con la geometría de una placa semi-infinita con espesor finito, tomando como referencia las dimensiones del ensayo experimental (150x150x25 mm).

En la Fig. 3a se muestra el mallado de la geometría, en donde se aprecia un refinamiento en la zona de avance de la fuente de calor. Para este caso, se utilizaron 1230566 nodos y 858670 elementos tetraédricos, con una calidad de 0.8355 ± 0.0928 y una tasa de aspecto de 1.8463 ± 0.4313 .

Por otra parte, en la Fig. 3b, se observa la fuente de calor en movimiento con distribución gaussiana, bajo los siguientes parámetros de simulación: las propiedades térmicas del acero AISI P20 ($k=20$ W/m°C, $C_p=460$ J/kg°C), la temperatura inicial (225°C), el coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie superior e inferior ($h=10$ W/m²°C), la potencia de la fuente (875 W), el diámetro de la fuente (3.75 mm), y la velocidad de avance de la fuente (10 cm/min en X). $\eta=66\%$.

Es decir, al igual que en la simulación con SmartWeld se utilizan como parámetros de entrada los parámetros de la fuente de calor predichos por el algoritmo analítico-numérico y

las mismas condiciones térmicas para efectos de comparación de los resultados.

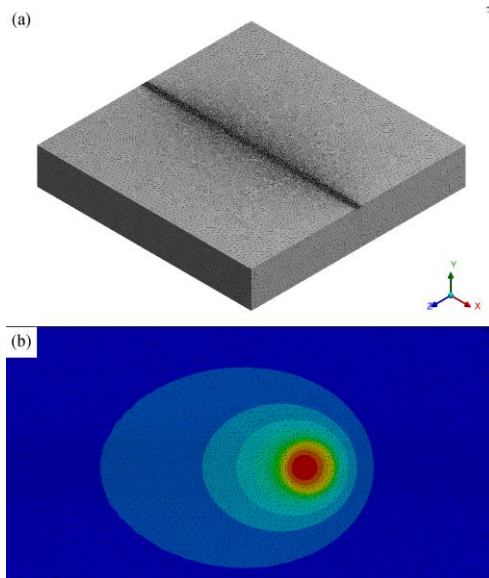


Fig. 3. Modelo de la simulación: (a) Mallado de la placa. (b) Vista superior XZ de la fuente de calor en movimiento.

3. RESULTADOS

3.1 Estimaciones con algoritmo analítico-numérico.

En la Fig. 4 es mostrada una de las micrografías del acero AISI P20 soldado con proceso TIG autógeno donde se evidencian las dimensiones de la isoterma Ac1 (penetración 4 mm y ancho 10 mm) que corresponde a la transición entre el metal base (MB) y la zona afectada por el calor (ZAC) y la penetración del cordón a través de línea de fusión (LF) de la zona fundida o metal de soldadura (MS). Para el acero P20 la temperatura Ac1 es 780 °C, según ensayos de dilatometría.

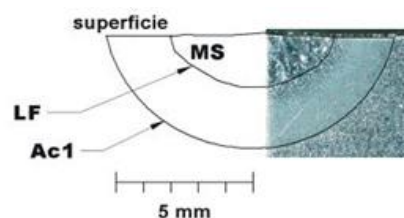


Fig. 4. Macrografía de la sección transversal de la soldadura TIG autógena en acero AISI P20 con energía de 10 kJ/cm

El campo de temperaturas de pico alcanzado en la soldadura fue calculado a través de la solución analítica de Santos (Santos, 2001), para la transferencia de calor que ocurre en un sólido a partir de una fuente de calor distribuida y en movimiento. Para esto, a partir de las

dimensiones de una isoterma observada en la macrografía del cordón, fueron determinados los parámetros de la fuente de calor (eficiencia térmica η y distribución σ) mediante la solución de un problema inverso, con el aplicativo *Parámetros_Fonte*. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Las temperaturas de pico alcanzadas en las diferentes regiones afectadas térmicamente por la soldadura fueron calculadas utilizando el aplicativo *Campo_Temperaturas*. En la Fig. 5 son mostradas las temperaturas en función de la distancia a la superficie o profundidad (z). A esta se le ajustó una curva exponencial cuya función y coeficientes es mostrada en la Ecuación (5).

Tabla 3. Parámetros de la fuente de calor obtenidos con base en la isoterma Ac1.

Material	Magnitud	Valor	Unidad
Dimensiones de isoterma	Penetración	4	mm
	Ancho	10	mm
Parámetros de la fuente	η	0,66	adim
	σ	1,875	mm

Fuente: Autor

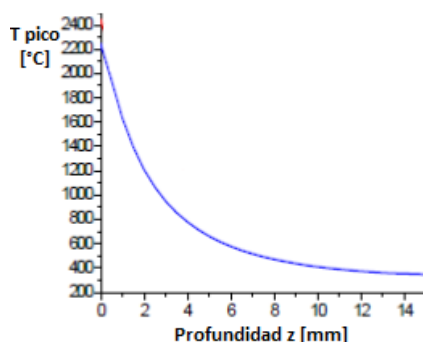


Fig. 5. Perfil de temperaturas de pico en la soldadura en función de la profundidad

$$T_p = 505,88 e^{-x/6,56} + 1465,96 e^{-x/2,07} + 91,86 \quad (5)$$

3.2 Simulaciones con software SmartWeld sobre la platina de ancho infinito y espesor finito en estado estacionario

En la Fig. 6 son mostradas las isothermas estimadas con el software SmartWeld y sus dimensiones están detalladas en la Tabla 4. Fue utilizado como parámetro de entrada el diámetro de la fuente de calor prevista con el algoritmo analítico numérico con valor igual a 3,75 mm.

Se puede observar que la isoterma de 750 °C próxima a la Ac1 (780 °C) posee dimensiones similares a las medidas experimentalmente y con las cuales fueron ajustados los parámetros de la

fuente de calor en el algoritmo analítico-numérico.



Fig. 6. Previsión de isothermas con SmartWeld con fuente de calor gaussiana en movimiento y en estado estacionario sobre platina semi-infinita

Tabla 4. Dimensiones de las isothermas previstas con SmartWeld.

Temperatura (°C)	Profundidad (mm)	Ancho (mm)
1503	1.71	6.26
1250	2.34	7.42
1000	3.22	8.89
750	4.63	11.20
500	7.54	16.30

Fuente: Autor

3.3 Simulaciones con el método de elementos finitos sobre la platina de ancho infinito y espesor finito en estado transitorio

En la Fig. 7, se observa la distribución de temperaturas obtenida por el software ANSYS R16. De igual modo, se muestra la ubicación de las isothermas LF (1600°C) y Ac1 (780°C), en dos planos de corte: una vista frontal YZ de la fuente de calor (ver Fig. 7a), y una vista lateral XY de la fuente de calor (ver Fig. 7b)

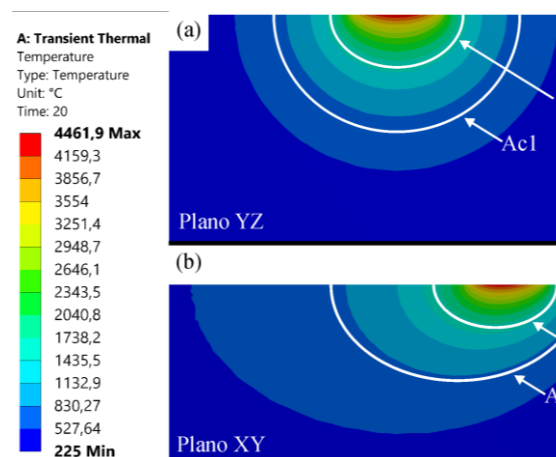


Fig. 7. Distribución de temperaturas: (a) Corte frontal YZ de la fuente de calor. (b) Corte lateral XY de la fuente de calor.

En la Tabla 5 se muestran las dimensiones de las isothermas previstas en profundidad y ancho.

Tabla 5. Dimensiones de las isothermas previstas con ANSYS R16 - Plano YZ.

Temperatura (°C)	Profundidad (mm)	Ancho (mm)
1600 (LF)	2.04	5.17
1500	2.21	5.44
1250	2.73	6.31
1000	3.48	7.63
780 (Ac1)	4.55	9.58
750	4.74	9.95
500	7.43	15.13

Fuente: Autor.

4. CONCLUSIONES

Con respecto al algoritmo se puede concluir que este es válido para aplicaciones con platina semi-infinita (espesor finito y ancho infinito), no para otro tipo de geometría del material base. El algoritmo estimó una eficiencia térmica de 80%. Una explicación para ello puede ser debido al sobrecalentamiento transiente que sufre la platina cuando sus dimensiones son pequeñas en relación al tamaño de la soldadura, lo que resulta en una mayor dimensión de las isothermas. Otro aspecto es que este modelo no hace distinción alguna del efecto del calor latente de fusión y del calor por conducción; tanto las pérdidas o ganancias de calor son ajustadas en la eficiencia térmica de la fuente de calor regulando el parámetro de distribución de la fuente hasta que coincida la isoterma prevista con la determinada experimentalmente. Este modelo se mostró muy útil para determinar la eficiencia térmica y el diámetro de la fuente de calor para ser usados como parámetros de entrada en las simulaciones con SmartWeld y ANSYS.

En el caso del modelo de fuente de calor gaussiana en movimiento en estado estacionario con SmartWeld, se observa una buena predicción de la distribución de temperaturas en la soldadura con platina semi-infinita. Es de destacar en esta herramienta el entorno gráfico que visualiza las soldaduras y las isothermas en 2D y 3D.

Tiene la particularidad de que separa y cuantifica el calor latente gastado en la zona fundida según parámetros térmicos de los materiales que posee en su base de datos, lo cual le permite una mejor aproximación a la realidad. Al hacer esto en la estimación de las isothermas se debe colocar un menor valor en la potencia de la fuente de calor para ayudar a estimar con mayor precisión la eficiencia térmica del proceso de soldadura en estudio.

En la simulación ANSYS con el modelo de elementos finitos al considerar el fenómeno transiente en la conducción del calor, el diámetro

y eficiencia térmica de la fuente calor; logra aproximarse a los valores obtenidos por las demás soluciones.

En la Tabla 6 se muestra la estimación de la isoterma Ac1 que define la zona afectada por el calor en la soldadura, hecha por los tres modelos de transferencia de calor en soldadura.

Tabla 6. Dimensiones de la isoterma Ac1 previstas en las simulaciones.

Modelo de Simulación	Profundidad (mm)	Ancho (mm)
Analítico-numérico	4	10
SmartWeld	4,63	11,2
MEF-Ansys	4,55	9.58

Fuente: Autor

La disminución en la dimensión del ancho de la isoterma en el modelo MEF puede ser debido a que la isoterma es de forma circular y no de forma elíptica como lo es en los otros dos modelos.

REFERENCIAS

- NIÑO, C.E. Especificación de procedimientos de reparación por soldadura sin tratamiento térmico posterior: efecto del revenimiento producido por los ciclos térmicos. Tesis (Doctorado en Ingeniería Mecánica). Programa de postgrado en Ingeniería Mecánica. Universidad Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil. 2001.
- SANTOS, L.A. Conducción de calor en la soldadura con pulsación térmica. Tesis (Doctorado en Ingeniería Mecánica). Programa de postgrado en Ingeniería Mecánica. Universidad Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil. 2001.
- Boo, K.S. y Cho, H.S. (1990). *Transient temperature distribution in arc welding of finite thickness plates*. Journal of Engineering Manufacture Part B, **Vol 204**, 175-183.
- Santos, A *Computer Program for Predicting Thermal Cycles at the HAZ of Bead on Plate Welds Using Dimensions of the Molten or Heat Affected Zone as Input Data*. Revista Soldagem & Inspección, **Vol 11**, No 4.
- Tafur P., W. y Niño, C.E. (2005) *Repair welding of injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels*. 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, MG, Nov 6-11.

- Suarez, S.I. Suares, A.M. Tafur P., W. (2015). *Arc Welding Procedures on Steels for Molds and Dies*. Journal Procedia Engineering, **Vol 100**, 584-591.
- Tafur P., W. Güts, S. (2012). *Viabilización de un Modelo termo-físico para la soldadura de aceros para moldes y matrices en función del volumen de la pieza*. VIII Semana de Ciencia, Tecnología e innovación, Cúcuta, Nov 14-16.
- Fuerschbach, P.W. Eisler, G.R. (2002) *Determination of Material Properties for Welding Models by Means of Arc Weld Experiments*. 6th Intl. Trends in Welding Research, Georgia, Abr 15-19.
- Canseco, R.A. Camarillo, G.K. Silva, M.A. (2011) *Experimentación y Análisis por MEF del Comportamiento Hiperelástico en Materiales usados en Calzado Deportivo*. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, **Vol 4**, No 1, 23-31.
- Hernandez G., L.K. Martinez O., E. Pabon R., J.J. (2018). *Simulación del desgaste de herramientas en Procesos de torneado*. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, **Vol 3**, No 32-1, 58-67.
- Garcia, R.A. Florez, S.E, Acosta, P.M. (2014). *Structural Analysis of a pressing machine for production of solid brick for small craft industries of ceramic materials in Ocaña, Norte de Santander and in the region*. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, **Vol 1**, No 25, 2014
- Campos, B.A. Alves, R.D. Scotti, A. (2006). *Simulation of a TIG Weld using Finite Element Method: Part 2- Structural Analysis*. Revista Soldagem & Inspección, **Vol 11**, No 2, Abr/Jun.
- Campos, B.A. Alves, R.D. Scotti, A. (2006). *Simulation of a TIG Weld using Finite Element Method: Part 1 - Thermal Analysis*. Revista Soldagem & Inspección, **Vol 11**, No 1, Ene/Mar. 2006.
- Goldak, J. Chakravarti, A. Bibby, M. (1984). *A new finite element model for welding heat sources*. MTB, **Vol 15**, 299–305.
- Guerra, T. (2017). *Modelagem do ciclo térmico do processo GMAW em acos inoxidáveis dúplex pelo método de elementos finitos*. Tesis (Doctorado en Ingeniería de materiales y de procesos químicos y metalúrgicos). Programa de postgrado en Ingeniería de materiales y de procesos químicos y metalúrgicos. Pontificia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil.2017.