

“CÁLCULO DE PERFILES DE TEMPERATURA Y DEFORMACIÓN EN EL PROCESO DE FRICCIÓN AGITACIÓN”

Martínez Alvarado¹, Luis Enrique; Chávez López¹, Oscar Arturo Godínez Rojano², Francisco Antonio; Acosta Cano de los Ríos², José Eduardo.

1. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua

Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación.

Ave. Tecnológico #2909 Chihuahua, Chih., México, C.P. 31310

2. Universidad Autónoma de México.

Instituto de Tecnología, Polo Universitario de Tecnología Avanzada.

Apodaca Nuevo León, México, C.P. 66624

le.martinezalvarado@gmail.com oachavezl@itchihuahua.edu.mx

RESUMEN.

En este trabajo se presenta un código numérico realizado con el método de diferencias finitas para predecir los perfiles de temperatura y deformación que ocurren durante el proceso de soldadura por fricción agitación. La ecuación de energía en estado transitorio, así como las condiciones de frontera fueron discretizadas hasta la obtención de un sistema de ecuaciones lineales. La implementación del código consistió en la caracterización de una placa de aluminio AA2014 mientras un conjunto de nodos con una temperatura aproximada a la alcanzada en el proceso real se desplaza sobre la cara superior simulando el movimiento de traslación de la herramienta. Posteriormente el código genera las gráficas de temperatura y de deformación correspondientes.

Palabras clave: fricción, temperatura, deformación, diferencias finitas.

ABSTRACT.

This paper presents a numerical code based on the finite difference method to predict the temperature and deformation profiles that occur during the friction stir welding process. The equation of energy in transitory state, as well as the boundary conditions were discretized until obtaining a system of linear equations. The implementation of the code consisted in the characterization of an AA2014 aluminum plate while a set of nodes with an approximate temperature reached in the real process moves on the upper face simulating the movement of the tool. Subsequently, the code generates the corresponding temperature and deformation graphs. **Keywords:** friction, temperature, deformation, finite differences.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés “friction stir welding”) es un proceso de unión de estado sólido desarrollado en 1991. La base del funcionamiento del proceso FSW consiste en una herramienta giratoria no consumible, es decir, que ni su forma ni sus propiedades se pierden durante el proceso y que puede ser reutilizada posteriormente. Esta penetra en el material hasta una profundidad determinada. El calor y la deformación generada en

el material por la interacción con la herramienta producen la unión de soldadura. Este fenómeno se reproduce a lo largo del material debido al movimiento de traslación de la herramienta. La característica principal de operación del FSW es que la máxima temperatura alcanzada en el proceso permanece por debajo del punto de fusión del material eliminando los efectos de cambio de estado [1]. La implementación de este proceso es mayormente en las aleaciones no tratables al calor, tal como algunas aleaciones de aluminio usadas en la industria aeroespacial como la serie AA2XXX. El fenómeno ha sido analizado experimentalmente y simulado mediante software CAE. Murugan [2] experimentó con soldadura FSW en Cobre y Bronce; haciendo pruebas con 800, 1000 y 1200 rpm, manteniendo la velocidad transversal constante a 40mm/min. Las pruebas de dureza indicaron que conforme las mediciones se alejaban de la unión de soldadura los valores de dureza disminuían, siendo el punto más alto la línea de unión. Subrata [3] utilizó el software comercial FLUENT para poder predecir los patrones del flujo sobre la unión de soldadura, considerando un enfoque Euleriano. En este trabajo se realizó una simulación del proceso FSW sobre una placa de aluminio AA2014 utilizando el método de diferencias finitas (MDF) para poder observar los perfiles de temperatura y deformación que se presentan en el material. En las siguientes secciones se detalla el desarrollo del código, la implementación de parámetros y por último la presentación de los resultados obtenidos.

2. CASO DE ESTUDIO

El proceso de soldadura de estado sólido FSW consiste en una herramienta giratoria no-consumible compuesta de dos partes que penetra al material de trabajo hasta una profundidad definida. La punta y el perno se insertan en el material y permanecen inmersos en él, mientras el hombro queda en contacto con la cara superior de este, tal como se muestra en la figura 1. Al quedar ambas partes de la herramienta interactuando directamente con el material de trabajo, se crea una interfaz de contacto entre estos, donde el movimiento de rotación y la

fricción genera calor con el material para posteriormente deformarlo plásticamente.

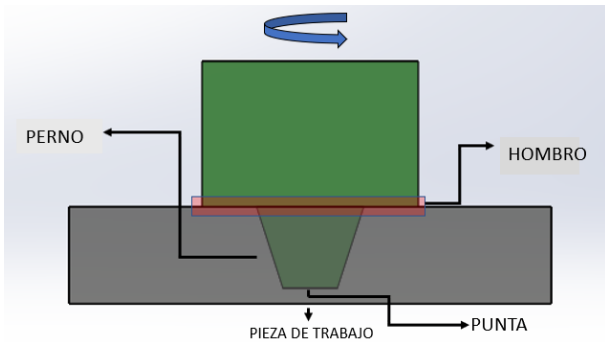


Figura 1. Esquema de las partes que componen el proceso FSW.

La cuantificación del calor generado y la deformación provocada son de interés debido a que definen las propiedades mecánicas de la unión de soldadura. Por lo que un análisis a fondo de este fenómeno podría brindar detalles sobre los parámetros necesarios para la obtención de propiedades óptimas. Este fenómeno presente en el proceso FSW puede ser analizado desde la perspectiva de mecánica de fluidos, al considerar el material como un fluido no newtoniano o desde la perspectiva de mecánica de sólidos, analizando las deformaciones producto del alto gradiente de temperatura. Para este trabajo se consideró un enfoque de mecánica de sólidos, resolviendo la ecuación de difusión de calor en estado transitorio que se muestra en la ecuación (1), para posteriormente calcular las deformaciones debidas a la temperatura. El método de diferencias finitas fue utilizado para lograr una aproximación de esta ecuación debido a que su solución depende de $\dot{q} = f(x, y, z, t)$.

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

k es la conductividad térmica, T es la temperatura, ρ es la densidad, C_p es el calor específico y \dot{q} es la generación interna de calor.

3. DESARROLLO DEL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

La formulación del MDF parte de la definición de derivada, la cual se establece como “la pendiente geométrica de la recta tangente a una función $F(x, y)$ en $x=x_0, y=y_0$ ” y que se muestra en la ecuación (2).

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x_0 + \Delta x, y_0) - F(x_0, y_0)}{\Delta x} \quad (2)$$

Y consiste en aproximar una línea tangente con múltiples líneas secantes que tienen distancias progresivamente más pequeñas entre los dos puntos que cruzan como se muestra en la figura (2).

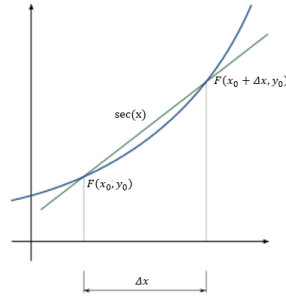


Figura 2. Representación esquemática de la derivada.

Las series de Taylor establecen que se puede aproximar la forma de una función en un punto específico a partir de una sumatoria de derivadas sucesivas llamada “serie”. Como se muestra en las ecuaciones (3) y (4) la expansión de la función $f(x)$ en el punto x_0 puede ser desarrollada con un avance “hacia adelante” o “hacia atrás” dependiendo que parte de la función se desee aproximar respectivamente.

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \frac{df}{dx}\bigg|_0 \Delta x + \frac{d^2 f}{dx^2}\bigg|_0 \frac{\Delta x^2}{2!} + \frac{d^3 f}{dx^3}\bigg|_0 \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots \quad (3)$$

$$f(x_0 - \Delta x) = f(x_0) - \frac{df}{dx}\bigg|_0 \Delta x + \frac{d^2 f}{dx^2}\bigg|_0 \frac{\Delta x^2}{2!} - \frac{d^3 f}{dx^3}\bigg|_0 \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots \quad (4)$$

Las derivadas de orden superior no son consideradas dentro de ambas expresiones debido a que su valor se vuelve despreciable al aumentar el orden de la derivada, por lo que al “truncar” la serie estas expresiones toman las siguientes notaciones:

$$\frac{df}{dx}\bigg|_0 = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (5)$$

$$\frac{df}{dx}\bigg|_0 = \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (6)$$

Donde el término $O(\Delta x)$ indica el error de truncamiento de la serie de Taylor. Las ecuaciones (5) y (6) pueden ser expresadas como una diferencia entre dos puntos (nodos), tomando como referencia un punto i donde $x_0 + \Delta x = (i + 1)$ y $x_0 - \Delta x = (i - 1)$. Por lo tanto, las ecuaciones (7) y (8) indican la forma discretizada de la derivada.

$$f' = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (7)$$

$$f' = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (8)$$

El procedimiento para encontrar la expresión en diferencias de derivadas de segundo orden es el mismo al mostrado

anteriormente. La ecuación (9) muestra la expresión resultante para la discretización de derivadas de segundo orden. La cual, a diferencia de las de primer orden, necesita de tres nodos para ser satisfecha.

$$f'' = \frac{f_{i-1} - 2f_i + f_{i+1}}{\Delta x^2} + 0(\Delta x^2) \quad (9)$$

4. SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN

Para encontrar los perfiles de temperatura que ocurren durante el proceso FSW, fue necesario considerar la ecuación de energía en estado transitorio, en tres dimensiones y en coordenadas cartesianas que se muestra en la ecuación (1). La ecuación fue discretizada siguiendo el esquema que se muestra en la ecuación (9). Obteniendo como resultado la siguiente expresión de la ecuación (10).

$$k \left(\frac{T_{i-1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i+1,j,k}^n}{\Delta x^2} \right) + k \left(\frac{T_{i,-1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j+1,k}^n}{\Delta y^2} \right) + k \left(\frac{T_{i,j,k-1}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j,k+1}^n}{\Delta z^2} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad (10)$$

Al ser un análisis transitorio, se considera una evolución de la temperatura desde el tiempo actual (superíndice n) hasta un tiempo futuro (superíndice $n+1$). El método seleccionado para la discretización del término transitorio fue el del explícito simple, en el cual todos los términos con el superíndice n se consideran conocidos, mientras el término con el superíndice $n+1$ es la única incógnita de la ecuación (11). En la ecuación (11) se expresa el término nodal T_{ijk}^{n+1} despejado en función de los demás términos conocidos.

$$T_{i,j,k}^{n+1} = rx(T_{i-1,j,k}^n + T_{i+1,j,k}^n) + ry(T_{i,j-1,k}^n + T_{i,j+1,k}^n) + rz(T_{i,j,k-1}^n + T_{i,j,k+1}^n) + (1-2(rx+ry+rz))T_{i,j,k}^n + \frac{\dot{q}\Delta t}{\alpha} \quad (11)$$

Donde: $rx = \frac{k\Delta t}{\Delta x^2\alpha}$, $ry = \frac{k\Delta t}{\Delta y^2\alpha}$, $rz = \frac{k\Delta t}{\Delta z^2\alpha}$

Fue necesario la implementación de un factor de estabilidad para lograr que la solución de la ecuación (11) permanezca estable en el tiempo. Este se define en la ecuación (12) como:

$$0 < (rx + ry + rz) \leq \frac{1}{2} \quad (12)$$

4.1 CONDICIONES DE FRONTERA

Al llevarse a cabo el proceso FSW a temperatura ambiente, se consideraron condiciones de convección con el ambiente, despreciando las pérdidas de calor por radiación y conducción con la placa de soporte inferior. La ecuación (13) describe la

condición por convección discretizada considerada para el análisis.

$$-k \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} = h(T_i - T_{amb}) \quad (13)$$

Donde h es el coeficiente por convección y T_{amb} es la temperatura ambiente.

4.2 CREACIÓN DEL DOMINIO COMPUTACIONAL

A partir de la discretización de la ecuación de energía, mostrada en la ecuación (11), se creó un modelo geométrico de dimensiones 200 mm x 200 mm x 6.3 mm, compuesto por los nodos designados para cada coordenada. El modelo geométrico fue caracterizado como una aleación de aluminio AA2014, cuyas propiedades se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del aluminio AA2014

Densidad	2800 kg/m ³
Conductividad térmica	193 W/mK
Calor específico	880 J/KgK
Módulo de elasticidad	73.1 GPa

Además, se creó un sistema de ecuaciones lineales (como se muestra en la figura 3) para poder obtener los valores incógnita de temperatura. Los subíndices ijk son sustituidos por valores de coordenadas donde $i=x$, $j=y$ y $k=z$. Cabe decir que al solo tener como incógnita en cada ecuación el término T_{ijk}^{n+1} , no es necesario aplicar algún método de solución como el Algoritmo de Thomas o Gauss-Jordan.

$$\begin{matrix}
 i & j & k \\
 2 & 2 & 2 \\
 3 & 2 & 2 \\
 4 & 2 & 2 \\
 \vdots & \vdots & \vdots
 \end{matrix}
 \rightarrow
 \begin{bmatrix}
 \Rightarrow T_{2,2,2}^{n+1} = rx(T_{2-1,2,2}^n + T_{2+1,2,2}^n) + ry(T_{2,2-1,2}^n + T_{2,2+1,2}^n) + rz(T_{2,2,2-1}^n + T_{2,2,2+1}^n) + (1-2(rx+ry+rz))T_{2,2,2}^n + \frac{\dot{q}\Delta t}{\alpha} \\
 \Rightarrow T_{3,2,2}^{n+1} = rx(T_{3-1,2,2}^n + T_{3+1,2,2}^n) + ry(T_{3,2-1,2}^n + T_{3,2+1,2}^n) + rz(T_{3,2,2-1}^n + T_{3,2,2+1}^n) + (1-2(rx+ry+rz))T_{3,2,2}^n + \frac{\dot{q}\Delta t}{\alpha} \\
 \Rightarrow T_{4,2,2}^{n+1} = rx(T_{4-1,2,2}^n + T_{4+1,2,2}^n) + ry(T_{4,2-1,2}^n + T_{4,2+1,2}^n) + rz(T_{4,2,2-1}^n + T_{4,2,2+1}^n) + (1-2(rx+ry+rz))T_{4,2,2}^n + \frac{\dot{q}\Delta t}{\alpha} \\
 \vdots
 \end{bmatrix}$$

Figura 3. Sistema de ecuaciones lineales.

El orden de acomodo de las posiciones nodales sigue el patrón que se muestra en la figura 4. Donde los nodos internos son gobernados por la ecuación (11), mientras que los nodos

externos se consideran sujetos a convección y se gobiernan por la ecuación (13).

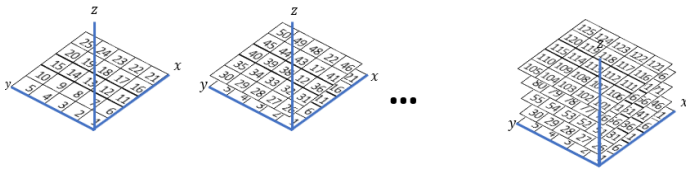


Figura 4. Orden de acomodo de las posiciones nodales.

Para la caracterización de la herramienta se consideró un conjunto de nodos con dimensiones equivalentes a la de la herramienta, este conjunto nodal se extiende también hacia dentro de la placa simulando la penetración del hombro sobre el material. A este conjunto nodal se asignaron velocidades de traslación de 2.5 mm/s, 5 mm/s y 7.5 mm/s simulando al movimiento de la herramienta en el proceso real. Además de una temperatura de 705 K, esto debido a que la temperatura alcanzada durante el proceso real es 0.9 veces la temperatura de fusión del material [4]. El algoritmo de solución implementado en el código puede ser expresado en un diagrama de flujo como se muestra en la figura 5.

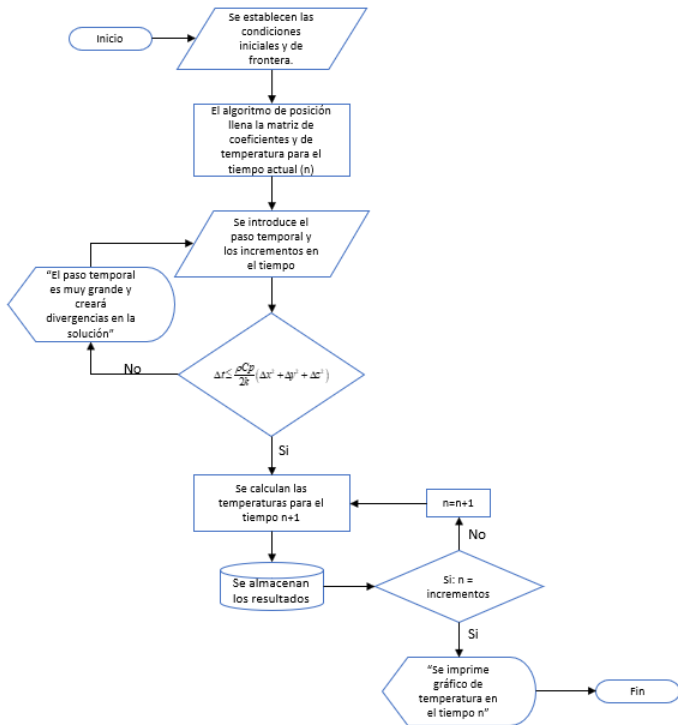


Figura 5. Algoritmo de solución expresado como diagrama de flujo.

5. RESULTADOS

Los perfiles de temperatura obtenidos con el código se analizan y se muestran en la figura 6.

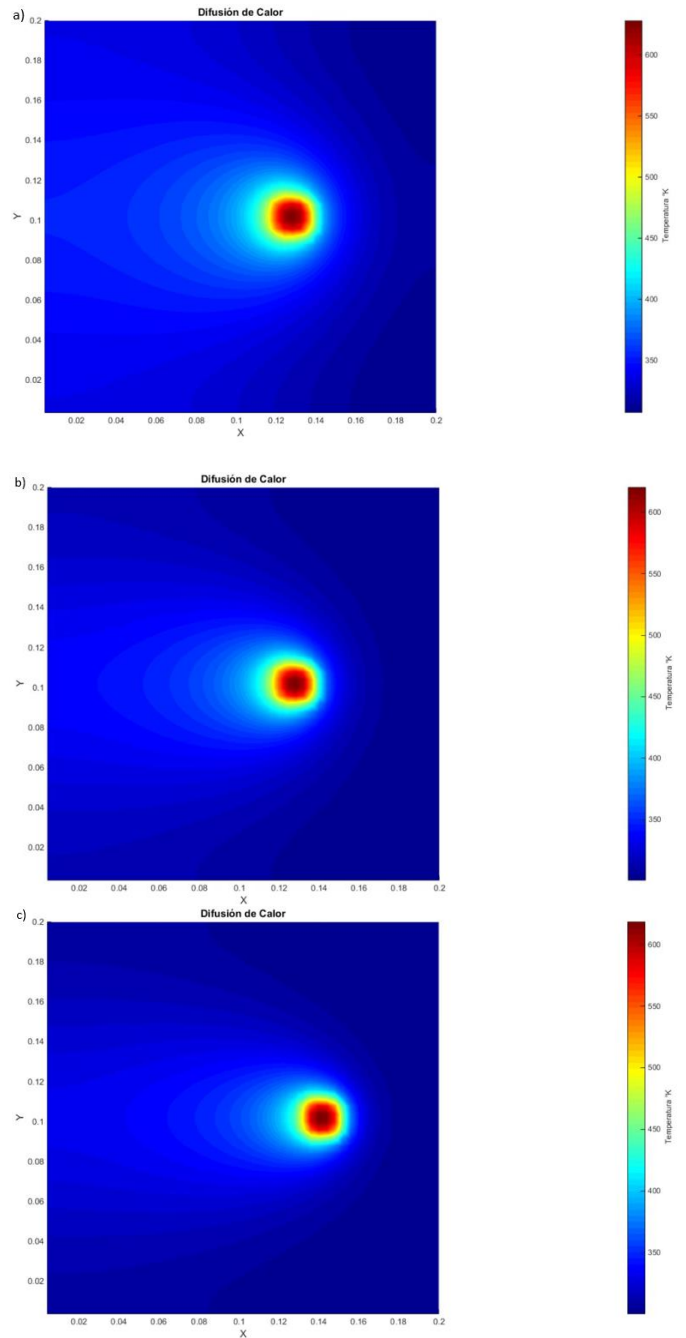


Figura 6. Comparación de perfiles de temperatura obtenidos con velocidades de traslación a) 2.5 mm/s, b) 5 mm/s y c) 7.5 mm/s.

El perfil de temperatura en la parte frontal se comporta de manera diferente para las figuras 6a, 6b y 6c. En el caso de las figuras 6b y 6c se aprecia como los perfiles de temperatura se

comprimen en la parte frontal de la herramienta mientras que en la figura 6a, los perfiles tienen una temperatura más uniforme en la parte frontal, así como en la parte trasera. Esto es debido a que la velocidad de traslación domina la difusión de calor a través de la placa, por lo tanto, al tener una velocidad de 2.5 mm/s en la figura 6a, el calor tiene más tiempo para difundirse por los alrededores de la herramienta en comparación con las figuras 6b y 6c donde la velocidad de traslación es de 5 mm/s y 7.5 mm/s respectivamente. Esto puede ser comprendido mejor con la gráfica de la figura 7. Se graficaron las temperaturas en un nodo en la superficie a lo largo del tiempo. Como se puede ver, el nodo alcanza los valores de temperatura más elevados en el valor de velocidad de traslación de 2.5 mm/s. Los valores de temperatura fueron menores para la velocidad de 5 mm/s, siendo el más bajo a una velocidad de 7.5 mm/s. Esto indica que a valores de velocidad altos, el calor no tiene el tiempo de difundirse por la placa de manera adecuada en la placa debido a la alta velocidad, provocando que una menor cantidad de material se incorpore a la unión de soldadura al no recibir la cantidad de calor necesario para llegar al estado viscoso necesario [5] [6].

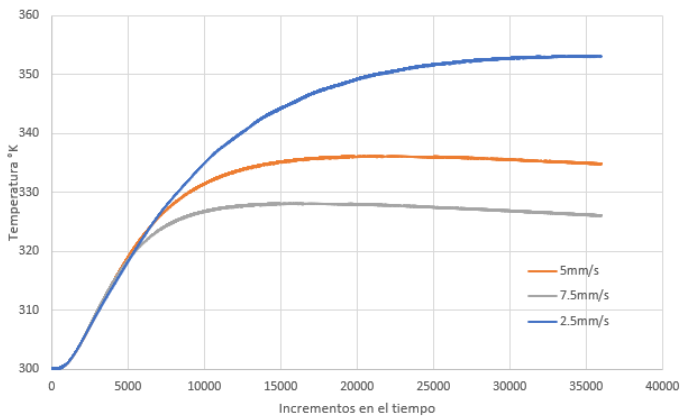


Figura 7. Comparación de temperaturas en un mismo nodo a diferentes velocidades de traslación.

Los perfiles de deformación se muestran en la figura 8. Los valores de esfuerzo residuales con valores superiores al esfuerzo de fluencia del material tienen deformación permanente. El esfuerzo de fluencia es del orden de 1×10^8 Pa. La zona que presenta los valores más elevados de esfuerzo para ambos casos es por la que se desplaza la herramienta, donde se encuentra la temperatura máxima del proceso proveniente de la herramienta. Se pueden apreciar en la zona de agitación, la cual es por la que desplaza la herramienta y tiene los valores más altos de esfuerzo. Así como la zona afectada termomecánicamente, ambas típicas del proceso FSW [7].

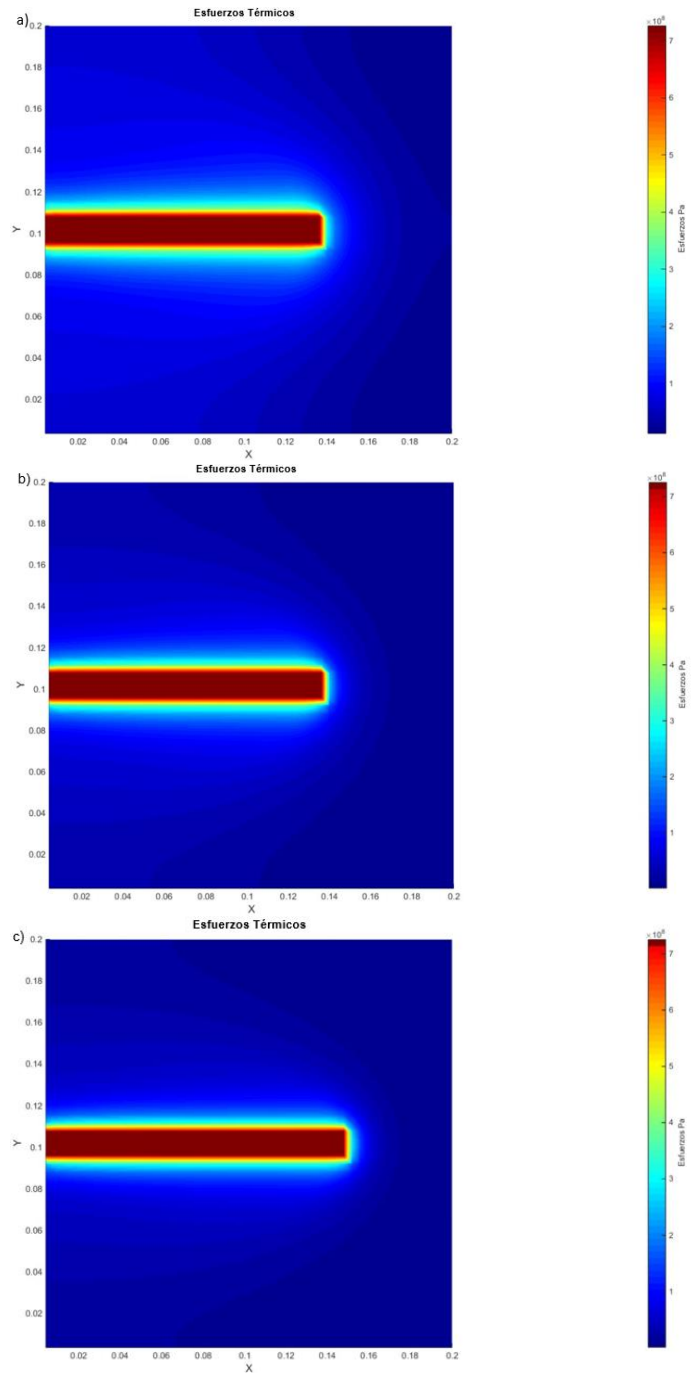


Figura 8. Comparación de perfiles de deformación obtenidos con velocidades de traslación a) 5 mm/s y b) 2.5 mm/s.

Como se puede apreciar en la figura 8, la zona de deformación tuvo una mayor extensión donde la velocidad de traslación fue de 2.5 mm/s, en comparación con la velocidad de 5 mm/s y 7.5 mm/s. Esto puede ser intuido a partir de la figura 7. Donde de forma similar el calor se difunde de mejor manera en el caso

donde la velocidad de traslación es menor y esto en las propiedades de la unión de soldadura. Patil [8] realizó pruebas experimentales en soldadura FSW para aleaciones desiguales de aluminio. Las uniones para FSW fueron realizadas en las aleaciones AA7075-T651 y AA6061-T6 y con velocidades de traslación de 30, 35, 40 mm/min. Las pruebas de dureza dan el valor más alto de 120 unidades en la escala de dureza Brinell (BHN) con una velocidad de traslación de 30 mm/min comparando el valor con la dureza de 170 BHN del material base.

6. CONCLUSIONES

Valores altos de velocidad de traslación provocan que el calor no se distribuya de manera tan extensa como sucede con valores bajos. Además, al no adquirir la temperatura necesaria para lograr la unión de soldadura el material podría sufrir solo un calentamiento parcial. Esto podría provocar que el material no se mezcle de manera adecuada teniendo consecuencias en la unión. Los valores de esfuerzo obtenidos concuerdan con el comportamiento de la temperatura, donde la velocidad es más baja, la zona con niveles por encima del límite de fluencia es más extensa con respecto a las simulaciones con velocidades más elevadas.

El código estima de manera aceptable los perfiles de temperatura y de esfuerzos presentados en la placa de material conforme a la discretización de la ecuación gobernante y la consideración de las condiciones de frontera.

7. REFERENCIAS

- [1] M. A. WAHID, Z. A. KHAN, and A. N. SIDDIQUEE, "Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties," *Trans. Nonferrous Met. c. China (English Ed.)*, vol. 28, no. 2, pp. 193–219, 2018.
- [2] R. Murugan and N. Thirumalaisamy, "Experimental and numerical analysis of friction stir welded dissimilar copper and bronze plates," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 803–809, 2018.
- [3] S. Pal and M. P. Phaniraj, "Determination of heat partition between tool and workpiece during FSW of SS304 using 3D CFD modeling," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 222, pp. 280–286, 2015.
- [4] "Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys A Volume in the Friction Stir Welding and Processing Book Series," in *Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys*, p. 18.
- [5] R. Xiao and X. Zhang, "Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys," *J. Manuf. Process.*, 2013.
- [6] L. Shi and C. S. Wu, "Transient model of heat transfer and material flow at different stages of friction stir welding process," *J. Manuf. Process.*, vol. 25, pp. 323–339, 2017.
- [7] A. S. Gupta and P. Hitesh, "Modeling and Simulation of Base Plate of Friction Stir Welding- Advanced Welding Technique," vol. 1, no. 4, pp. 2–6, 2013.
- [8] C. Patil, H. Patil, and H. Patil, "Experimental investigation of hardness of FSW and TIG joints of aluminium alloys of AA7075 and AA6061," *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 10, no. 37, pp. 325–332, 2016.