

SIMULACIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO “FRICTION STIR WELDING” (FSW) DE ALUMINIO AA 1100-0

* Raisa Valdivé L. ** Juan C. Osorio
*** Rafael Valdivé

Recibido: 30/07/2012 Aprobado: 30/11/2012

Resumen

En el trabajo que se presenta se muestra la simulación de los valores de las temperaturas que realizarán de manera experimental en [1] y [11] durante el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) de placas de aluminio AA 1100-0. Para ello se utiliza el método de los elementos finitos (MEF). Se estudió el comportamiento de las temperaturas aplicando MEF a la ecuación de transferencia de calor utilizada por [9]. La metodología implementada permitió modelar el problema aplicando el software ABAQUS/CAE v6.7-1 con elementos hexaédricos de ocho nodos y tetraédricos de cuatro nodos. La simulación del proceso de FSW de aluminio AA 1100-0 reportó una diferencia de temperaturas de 80.3°C en comparación con el valor máximo obtenido experimentalmente por [1]. El resultado evidencia que el modelado del proceso permite predecir el comportamiento térmico de la soldadura.

Palabras clave: Método de los elementos finitos, soldadura por fricción agitación.

SIMULATION OF THE TEMPERATURE IN THE PROCESS “FRICTION STIR WELDING” (FSW) OF AA 1100-0 ALUMINIUM

Abstract

The work presented shows the simulated values of the temperatures experimentally undertaken in [1] and [11] during friction stir welding (FSW) of AA 1100-0 aluminum plates. This is done using the finite element method (FEM). We studied the behavior of temperature by applying MEF to the heat transfer equation used by [9]. The methodology used allowed modeling the problem using the software ABAQUS /CAE v6.7-1 with elements hexahedral of eight nodes and tetrahedral of four nodes. The simulation of the AA 1100-0 aluminum FSW reported a temperature difference of 80.3°C compared to the maximum value obtained experimentally by [1]. The result shows that the process modeling allows to predict the thermal behavior of the weld.

Keywords: Finite Element Method, Friction Stir Welding.

* *Decanato de Ciencias y Tecnología, Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”, Barquisimeto, Venezuela, mathsforsall88@hotmail.com*

** *Departamento de Ciencias Básicas, Decanato de Ingeniería Civil, Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”, Barquisimeto, Venezuela, jcosorio@ucla.edu.ve*

*** *Departamento de Ingeniería Mecánica, Vicerrectorado Barquisimeto, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Barquisimeto, Venezuela, rafvaldive@hotmail.com*

Introducción

A raíz de la creación del proceso FSW [9], en la última década se han abierto espacios para realizar ensayos en aluminio AA 1100-0 soldando por fricción agitación, obteniendo resultados satisfactorios con respecto al cordón soldado.

La soldadura por fricción agitación es un proceso de unión en estado sólido de láminas o placas gruesas por medios mecánicos. En la Figura 1 se esquematizan los componentes del proceso donde la herramienta está conformada por un apoyo normal al eje de rotación, y un perno de diámetro pequeño conectado al apoyo. El apoyo de la herramienta actúa como un respaldo superior para prevenir que el material salga expulsado de las piezas a soldar.

El proceso de soldadura FSW se describe a continuación: (1) las láminas se colocan a tope en un eje común; (2) el perno o pin rotativo se hunde dentro de las piezas a soldar hasta que el apoyo de la herramienta está en contacto íntimo con la superficie de trabajo; (3) el pin se mueve en la dirección de soldadura a medida que la herramienta se mueve a lo largo de la costura, así el material calentado y ablandado fluye alrededor del pin hacia su parte posterior, (4) se crea la unión de las láminas, debido a que se produce un calentamiento por fricción entre ellas promoviendo un comportamiento pastoso/viscoso del material.

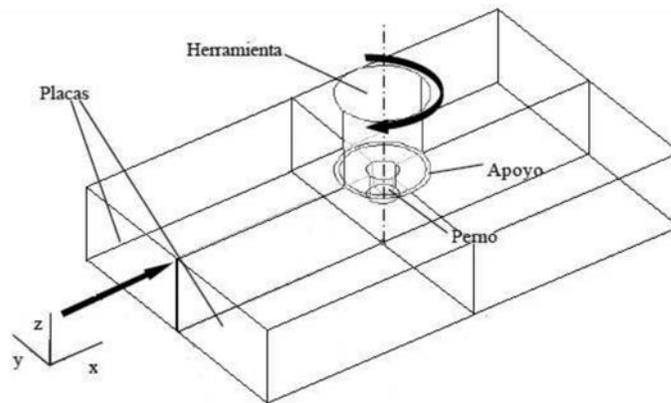


Figura 1: Esquema de los componentes para el proceso de FSW.

El proceso permite observar el comportamiento del material utilizando variaciones en las velocidades, tanto de rotación como de traslación de la pieza, para determinar la temperatura óptima en la zona de contacto y obtener el mejor resultado. El estudio que realizó [1] para encontrar esta temperatura requirió de varios ensayos termográficos. Estos ensayos consisten en producir imágenes de la radiación infrarroja emitida en forma de calor por algún cuerpo, a través de una cámara llamada detector de barrido de infrarrojos. Asimismo, para obtener un cordón de soldadura que no presente defectos en cuanto a material residual alrededor del mismo (conocido como rebaba) se deben realizar pruebas de ensayo y error modificando factores como la velocidad de rotación del pin y la velocidad de traslación de la pieza, así como también el esfuerzo o fuerza que ejerce la herramienta sobre las placas. Esto deriva una serie de problemas de tipo experimental, ya que requiere de la inversión de mucho tiempo y recursos, tanto humanos como materiales. En tal sentido surge la necesidad de analizar y profundizar sobre los campos de temperaturas involucrados en el proceso de FSW de dos placas de aluminio AA 1100-0, utilizando métodos numéricos aplicables a la ecuación de conservación de calor (1) utilizada por [9], con el fin de minimizar los ensayos prácticos.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del material, C_p es el calor específico, T la temperatura y Q la tasa de generación de calor interna.

Uno de los métodos numéricos aplicables a la ecuación (1) fue abordado por [4]. Este autor trabajó con el método de los elementos finitos para obtener el modelo matemático de un problema de conducción de calor en placas metálicas y materiales compuestos tipo carbono-carbono, especificando las condiciones fronteras consistentes con el fenómeno de transferencia de calor en el material considerado.

En el trabajo de [12] se estudia el Método de los Elementos Finitos, para encontrar la temperatura óptima durante el proceso FSW de dos placas de aluminio AA 1100-0.

Algunos trabajos relacionados con el tema de soldadura por fricción agitación han sido realizados por varios autores. A continuación se detallan cada uno de ellos.

En el trabajo de [1] y [11] se realizaron una serie de ensayos de soldadura FSW con el aluminio AA 1100-0 obteniendo óptimos resultados al trabajar con una herramienta cilíndrica con pin roscado y velocidades de traslación y de rotación de 92 mm/min y 1700 rpm respectivamente. Como parte del estudio, realizaron termografías del proceso. Esto les permitió observar que la temperatura de fusión del material no es alcanzada en ningún momento y, las temperaturas máximas reflejadas en las termografías no sobrepasan los 300 °C. También [1] indica que para obtener un llenado total del cordón de soldadura y mantener intactas las condiciones físicas del aluminio (proceso óptimo), se deben respetar las condiciones anteriormente señaladas. Cabe destacar que adicional a lo anterior, en el trabajo de [1], se realizaron estudios metalográficos y mediciones del perfil de dureza en el área soldada.

Los autores en [9] trabajan con la ecuación (1) como base de su modelo térmico, obteniendo un modelado numérico de la unión de las piezas involucradas en el proceso de soldadura por fricción agitación, a través del mallado de las mismas con el método de los elementos finitos.

Los autores en [8], modelan el proceso de soldadura utilizando programas de elementos finitos, reproduciendo el mapa térmico y la distribución de flujo del material y presentaron desarrollos experimentales con mediciones de la distribución de temperaturas obtenidas por termografía y su análisis comparativo con los resultados numéricos.

En el estudio de [10], se modela el comportamiento de un caso en el que se varía la posición de la herramienta. Analizaron la influencia de esta variable del proceso de FSW en la distribución del flujo de material y campo de presiones. Estos autores llegaron a la conclusión que para obtener mayor sensibilidad del modelo con respecto a la posición de la herramienta es necesario incluir condiciones de fricción más representativas de los fenómenos involucrados en FSW.

Los autores de [7], simulan el proceso de unión de aceros inoxidables austeníticos considerando acoplamiento térmico. Para la resolución del problema mecánico utilizaron un modelo visco plástico con una ley representativa de estos aceros en el rango de las temperaturas del proceso y un modelo de convección-difusión en la parte térmica. Estos autores concluyeron que los resultados obtenidos tenían buena correlación con los datos reportados.

En [2], simularon el proceso de soldadura por el Método de los Elementos Finitos mediante un modelo de prescripción del ciclo térmico, por simplicidad. Emplearon fuentes puntuales de temperatura a lo largo del cordón de soldadura y obtuvieron un modelo simple y suficientemente aproximado logrando obtener en el campo mecánico, resultados comparables a los que se obtienen mediante modelos más complejos que se aproximan a los que ocurren en un proceso real.

En [4], se trabaja con el método de los elementos finitos con el objeto de obtener un modelo matemático para un problema de conducción de calor en placas metálicas y materiales compuestos tipo carbono-carbono, especificando las condiciones fronteras consistentes con el fenómeno de transferencia de calor en el material considerado.

Ante lo previamente expuesto, el presente trabajo tiene como objetivo simular el comportamiento de la temperatura generada durante el proceso de soldadura por fricción agitación de dos placas de aluminio AA 1100-0 y comparar los resultados con los obtenidos experimentalmente por [1].

Método de los Elementos Finitos

Según [13], [3] y [5], el método de los elementos finitos es una herramienta numérica para determinar soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas de ingeniería. El método fue desarrollado originalmente para estudiar los esfuerzos en estructuras de fuselaje complejas y fue extendido posteriormente al campo general de la mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos está recibiendo atención considerable en la enseñanza de las áreas de ingeniería y en la industria debido a su diversidad y flexibilidad como herramienta de análisis. A menudo es necesario obtener soluciones numéricas aproximadas para problemas industriales complejos, en los cuales las soluciones exactas son difíciles de alcanzar.

El método de los elementos finitos considera que la región de la solución se compone de muchas subregiones interconectadas, pequeñas (o elementos) que proporciona una aproximación por pieza a las ecuaciones gobernantes. Esto es, las ecuaciones diferenciales parciales complejas son reducidas a ecuaciones lineales o no lineales simultáneas. Así, el proceso de discretización de elementos finitos (es decir, dividiendo la región en un número de regiones más pequeñas) reduce el problema continuo, el cual tiene un número infinito de incógnitas, a uno con un número finito de incógnitas en puntos específicos conocidos como nodos.

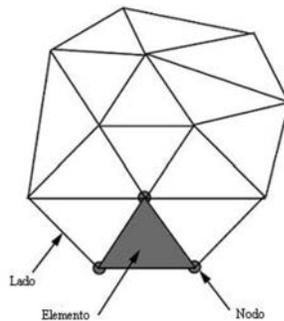


Figura 2: Típica malla de elementos finitos. Elementos, nodos y lados.

El método de los elementos finitos involucra la discretización del dominio como se muestra en la Figura 2. En este proceso, las variables son representadas a trozos sobre el dominio. Dividiendo la región de solución en un número de regiones más pequeñas, llamadas elementos, y aproximando la solución sobre estas regiones a través de una función apropiada conocida, se establece una relación entre las ecuaciones diferenciales y los elementos.

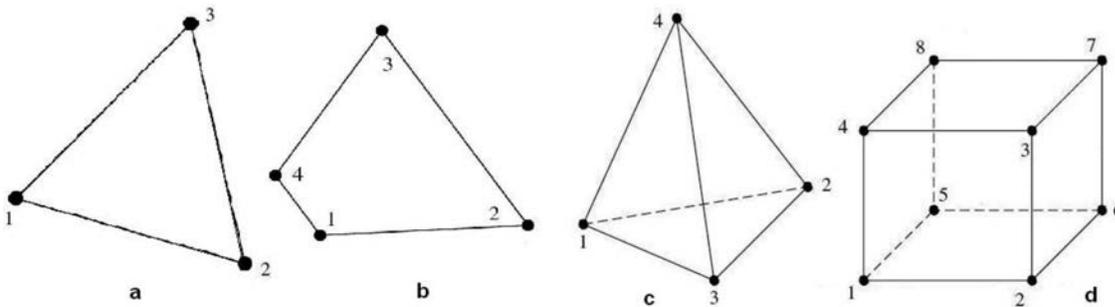


Figura 3: Tipos de Elementos: a. Triangular, b. Cuadrilátero, c. Tetraédrico, d. Hexaédrico.

Las funciones empleadas para representar la naturaleza de la solución dentro de cada elemento son

llamadas funciones de interpolación, o funciones de forma. Son llamadas funciones de interpolación ya que son utilizadas para determinar el valor de la variable de campo dentro del elemento, interpolando los valores nodales. Las funciones de tipo polinomial han sido mayormente usadas ya que pueden ser integradas o diferenciadas, fácilmente, y la exactitud de los resultados pueden ser mejorados, aumentando el orden del polinomio.

En la Figura 3 se pueden observar algunos tipos de elementos utilizados para discretizar el dominio en el MEF: triangular bidimensional, cuadrilátero bidimensional, tetraédrico y hexaédrico.

Para realizar la presente investigación se tomaron como referencia los datos obtenidos por [1].

El Método de los Elementos Finitos se aplicó utilizando el software ABAQUS/CAE, con el que se realizó la discretización del problema con elementos tetraédricos de cuatro nodos, elementos hexaédricos de ocho nodos y los datos mostrados en el Cuadro 1:

Propiedades	Aluminio AA 1100-0	Acero AISI 1045
Conductividad	222	51.9
Densidad	2710	7870
Módulo de Young	69	200
Radio de Poisson	0.33	0.29
Calor Específico	904	486

Cuadro 1: Propiedades del Aluminio y Acero.

La malla obtenida para el pin y las placas según lo expresado en párrafos precedentes, se muestra en la Figura 4:

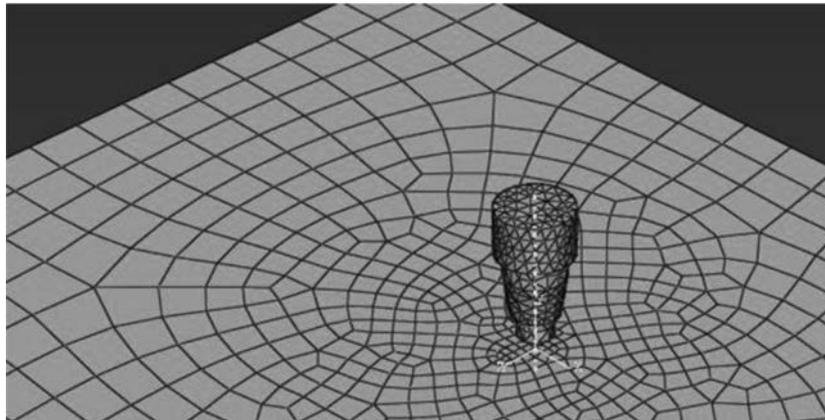


Figura 4: Detalle del mallado con elementos hexaédricos para las placas y tetraédricos para el pin.

Se utiliza en el modelado 0.1 como el coeficiente de fricción entre los dos metales, el valor de la velocidad de rotación es de 1700 rpm, las dimensiones de las placas son 20mm de largo, 7mm de ancho y 3mm de espesor. Además de todos los valores, se tomó un pin cilíndrico de iguales dimensiones del experimento real pero sin rosca.

Procedimiento en ABAQUS/CAE

El tratamiento aplicado en el estudio para la simulación de los datos que obtuvo [1] se basa en el modelaje matemático planteado por el paquete computacional ABAQUS/CAE v6.7-1 descrito en [6]. Esto permite corroborar los valores de la temperatura encontrados. A continuación se describe el procedimiento desarrollado.

- Módulo Parte

Se crean las dos partes involucradas en el proceso de FSW (ver Figura 5).

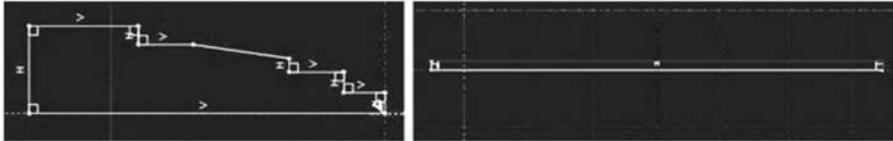


Figura 5: Geometría de la herramienta y de las placas.

- Módulo Propiedad

Se crean los materiales a utilizar con sus respectivas propiedades.

- Módulo Ensamblaje

Se generan las instancias y las restricciones (ver figura 6).

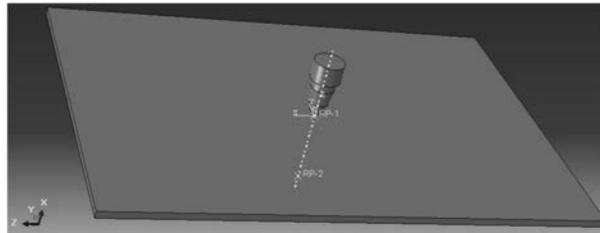


Figura 6: Ensamblaje del modelo colocando el pin en el centro de las placas.

- Módulo Paso

Se crean y definen los pasos de análisis y de tipo proceso.

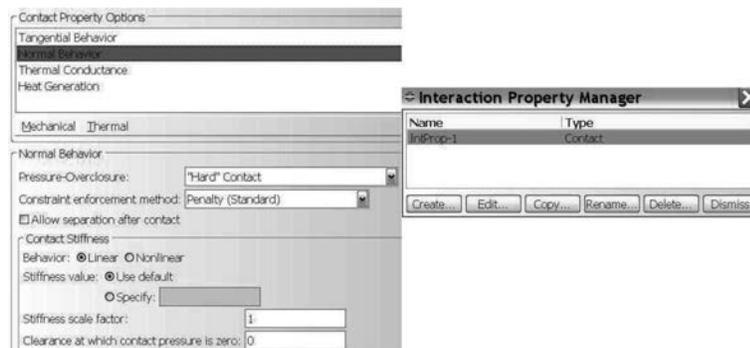


Figura 7: Ventanas de creación de propiedad de interacción entre las partes.

- Módulo Interacción
Se definen las interacciones entre las superficies que están en contacto (ver Figura 7).
- Módulo Carga
Se generan las condiciones de borde y se define la aplicación de la carga.
- Módulo Malla
Se genera la discretización del modelo a través del proceso de mallado (ver Figuras 8a y 8b).

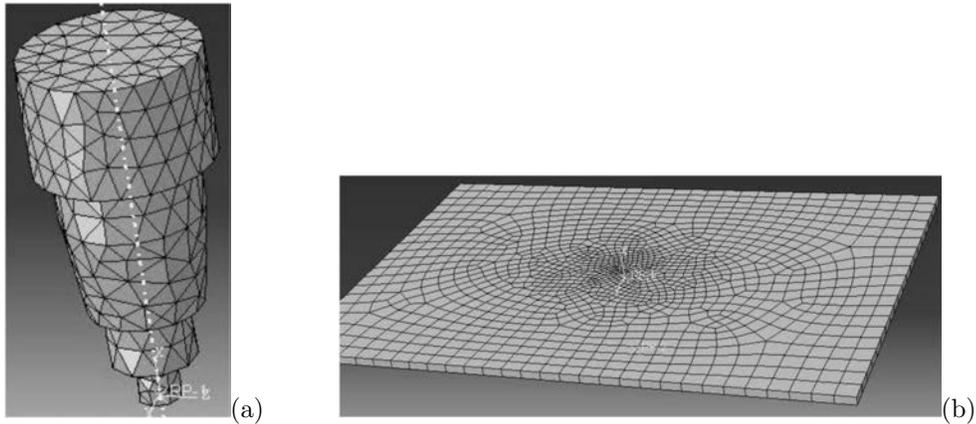


Figura 8: (a) Malla del Pin, (b) Malla de las Placas.

- Módulo Trabajo
Se crea el trabajo, cargando la información para realizar el análisis.
- Módulo Visualización
Se muestran los resultados con la opción field output (ver Figura 10).

Se tomó en consideración que la temperatura cambia en función del tiempo y se trabajó con un sistema de referencia anclado en el pin con el cual se logra mantener una distribución de temperatura uniforme durante todo el experimento debido a que la generación de calor por fricción alrededor del pin es constante.

Resultados

A continuación se presenta la comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con el software ABAQUS/CAE v6.7-1 y los obtenidos en las termografías realizadas al proceso de FSW en el trabajo de [1].

La temperatura máxima alcanzada en el trabajo realizado por [1] es de 232.1°C como se puede observar en la Figura 9.

La temperatura máxima alcanzada en la investigación de [12] a través del proceso de simulación con MEF, utilizando 2204 elementos tetraédricos de cuatro nodos y 698 elementos hexaédricos de ocho nodos, es de 312.4°C como se puede observar en la Figura 10.

Al comparar los resultados de [1] con los obtenidos en la investigación de [12] se puede observar que existe una diferencia de 80.3°C de temperatura lo que permite evidenciar que el MEF logra simular los valores obtenidos experimentalmente (Figura 11), manteniéndose una congruencia en las mediciones.

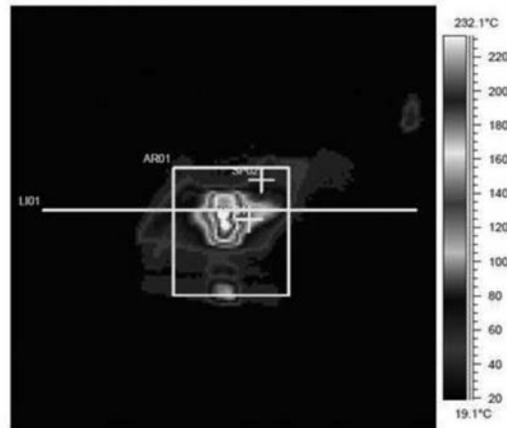


Figura 9: Termografía obtenida durante el proceso de FSW.

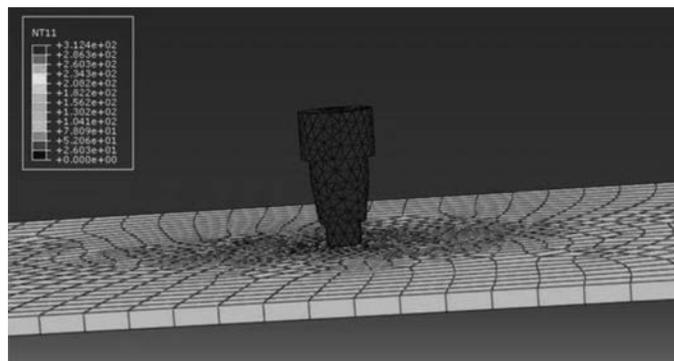


Figura 10: Campos de temperaturas obtenidos en el modelado por MEF en ABAQUS/CAE v6.7-1.

Conclusiones

- En el trabajo se logra realizar la simulación de los valores de las temperaturas involucradas en el proceso de soldadura por fricción agitación comparando los datos arrojados por el modelado computacional del proceso y las termografías tomadas al proceso real.
- El resultado evidencia que el modelado del proceso permite predecir el comportamiento térmico de la soldadura. Así mismo, el análisis de la ecuación realizado con el MEF permite que el uso del software sea confiable en la solución del problema objeto de estudio.

Recomendaciones

- El trabajo permite a futuro el desarrollo de cálculos sobre las variables temperatura, velocidad de rotación, velocidad de traslación, esfuerzos, involucrando las mejoras en que metalúrgicamente resultara de las soldaduras en aluminio AA 1100-0.
- Se podrían realizar estudios similares para aluminio AA 6063 aplicando una simulación que incluya este material de composición general distinta.

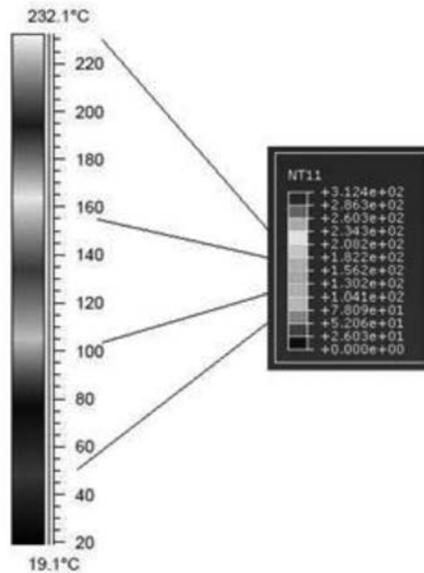


Figura 11: Comparación de resultados en Termografía y Simulación

- También se podría estudiar la aplicabilidad del trabajo para el caso en que se solden placas de aluminio disímiles, es decir, placas de diferente composición química.

Referencias

- [1] BLANCO S. (2009). *Obtención de Cordón de Soldadura Mediante el Proceso de Fricción Agitación en Aluminio AA 1100-0*. Trabajo de grado en Ingeniería Mecánica. Barquisimeto: Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.
- [2] BULLÓN W., ACOSTA J., FRANCO R. & VALVERDE G.(2007). *Simulación de un Proceso de Soldadura mediante un Modelo Termo-mecánico Considerando el Efecto de Esfuerzos Residuales Utilizando el Método de los Elementos Finitos*. Consultada el 5 de enero de 2010, Pontificia Universidad Católica del Perú, página web conmemorativa del 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica: <http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/20/20-38.pdf>
- [3] CALDERON G. & GALLO R. (2011). *Introducción al Método de los Elementos Finitos: Un Enfoque Matemático*. Ediciones IVIC. Caracas.
- [4] COLMENARES E. (2008). *Discretización de Elemento Finito para la Ecuación de Conducción de Calor en Metales y Materiales Compuestos Tipo Carbono-Carbono*. Tesis de grado en Ciencias Matemáticas. Barquisimeto: Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”.
- [5] LEWIS R., NITHIARASU P. & SEETHARAMU K.(2004). *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. John Wiley & Sons, Ltd. England.
- [6] MANUAL ABAQUS/CAE. *Manual del Usuario. ABAQUS/CAE versión 6.4*. Consultado el 20 de abril de 2010, <http://es.scribd.com/doc/35917219/Abaqus-cae-Users-Manual>
- [7] PEREYRA S., LOMBERA G., URQUIZA S., SANTIAGO D. & DE VEDIA, L. (2008). *Modelado Numérico del Proceso de Soldadura por Fricción Agitación en Aceros Inoxidables*. Revista

- Materia, 13(2). Consultada el 6 de enero de 2010, <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11009/>
- [8] SANTIAGO D., LOMBERA G., CASSANELLI A., URQUIZA S. & DE VEDIA, L. (2005, noviembre). *Análisis Térmico en Soldadura por Fricción*. Mecánica Computacional, 24(17). Consultada el 5 de enero de 2010, <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/183/163>
- [9] SANTIAGO D., LOMBERA G., URQUIZA S. & DE VEDIA, L. (2003, noviembre). *Modelado Numérico de Uniones Soldadas por "Friction Stir Welding"*. Mecánica Computacional, 22(28). Consultada el 6 de enero de 2010, <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/840/792>
- [10] SANTIAGO D., PEREYRA S., LOMBERA G. & URQUIZA, S. (2006, noviembre). *Análisis de Defectos en Soldadura por Fricción-Agitación mediante un Modelado 3D*. Mecánica Computacional, 25(24). Consultada el 5 de enero de 2010, <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/604/575>
- [11] VALDIVÉ R. & BLANCO S. (2012). *Cordón de Soldadura mediante el Proceso de Soldadura por Fricción Agitación en Aluminio AA 1100-0*. XI Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIMENICS). Venezuela.
- [12] VALDIVÉ R. (2012). *Optimización de la temperatura en el proceso de Soldadura por Fricción Agitación de aluminio AA 1100-0 utilizando el Método de los Elementos Finitos*. Trabajo de grado en Licenciatura en Ciencias Matemáticas. Barquisimeto: Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado".
- [13] ZIENKIEWICZ O. & CHEUNG, Y. (1967). *The finite element method in structural and continuum mechanics*. McGraw-Hill book Company. New St. Louis San Francisco Colorado Spring.