

Simulación con termodependencia y sin esta de la zona afectada térmicamente de una unión soldada

Simulation without and with thermal dependency of the heat affected zone of a welded joint

Pavel Michel Almaguer-Zaldivar^{1,*}, Raúl Rolando Ramos-Santiago², Hortensia Santiago-Cuenca², Patricia del Carmen Zambrano-Robledo³

¹Centro de Estudios CAD/CAM, Universidad de Holguín. Campus “Oscar Lucero Moya”, Avenida XX Aniversario s/n, Piedra Blanca. Holguín, Cuba.

²Departamento de Mecánica Aplicada, Universidad de Holguín, Holguín, Cuba.

³Dirección de Investigación. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México.

*Autor de correspondencia: email pavel@uho.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#)



Recibido: 15 agosto 2021 **Aceptado:** 31 agosto 2021 **Publicado:** 2 de septiembre 2021

Resumen

En la zona afectada térmicamente ocurre comúnmente el fallo de las uniones soldadas, por lo que se considera una entalla metalúrgica. En este trabajo se trata la influencia de la termodependencia de las propiedades del acero AISI 1015 en las dimensiones de la zona de afectación térmica en uniones soldadas a tope. Para evaluar esta influencia se propone un modelo geométrico elaborado en el programa *SolidWorks* 2016, mientras que se utiliza el complemento *Simulation* para determinar la posición de las isoterms que definen las dimensiones de la zona de afectación térmica. Mediante el uso de curvas de temperatura se definen las propiedades termodependientes. Se realizaron estudios térmicos transitorios para el movimiento del electrodo y de enfriamiento de la unión, considerando que hay o no termodependencia de las propiedades. Se compararon las dimensiones de la zona de afectación térmica para ambos resultados. Existen diferencias entre la posición de las distintas isoterms cuando se considera o no la termodependencia de las propiedades físicas y mecánicas.

Palabras clave: AISI 1015, curvas de tiempo, propiedades termodependientes, simulación numérica, zona afectada térmicamente

Abstract

The failure of the welded joints commonly occurs in the heat affected zone, which is why it is considered a metallurgical notch. This work deals with the influence of the thermal dependency of the properties of AISI 1015 steel on the dimensions of the heat affected zone in butt-welded joints. To evaluate this influence, a geometric model elaborated in the *SolidWorks* 2016 software is proposed, while the *Simulation* complement is used to determine the position of the isotherms that define the size of the heat affected zone. Through the use of temperature curves, the thermo-dependent properties are defined. Transient thermal studies were carried out for the movement of the electrode and the joint cooling, considering that there is or not thermal dependency of the properties. The dimensions of the heat affected zone were compared for both results. There are differences between the position of the different isotherms when the thermal dependency of the physical and mechanical properties is considered or not.

Keywords: AISI 1015, time curves, thermal dependency properties, numerical simulation, heat affected zone

1. Introducción

Existen diferentes tipos de uniones que componen a los distintos elementos de las máquinas y de las estructuras. Entre estas uniones se encuentra la soldadura. Uno de los tipos de soldadura es la manual con electrodo revestido.

Al utilizar una fuente de calor móvil fuertemente concentrada, como puede ser un arco eléctrico, ocurren procesos físico-químicos, estructurales y de deformaciones térmicas de diversa índole que provocan la aparición de tensiones residuales, particularmente en el cordón y en la zona afectada térmicamente (ZAT). La unión soldada está compuesta por varias zonas, pero en la ZAT siempre se encuentra la zona más débil de toda la unión [1]. La planificación de los procesos de soldadura es muy importante. Durante la soldadura se pueden producir puntos de dureza mayor que los de los alrededores y que afectan el desempeño mecánico de la unión, principalmente en aceros con alto contenido de carbono, azufre y manganeso y se caracterizan por estructuras martensíticas y bainíticas [2]. Di Schino y Di Nunzio [3] estudiaron el efecto del contenido de niobio en la ZAT de uniones de acero X80. Estos autores determinaron que pequeñas diferencias en el contenido de este elemento son capaces de afectar la dureza y la tenacidad al impacto de la unión.

Con el desarrollo de las técnicas computacionales aplicadas a la ingeniería, en los últimos años se puede apreciar un incremento significativo en el estudio de las uniones soldadas con métodos computacionales [4]. Muhammad et al. [5] consideraron que los resultados obtenidos con el Método de los Elementos Finitos en un diseño de ingeniería pueden ser de tal precisión que permitan compararlos con los determinados experimentalmente. La simulación numérica se utiliza para evaluar procesos de soldadura. La comparación entre las simulaciones y los resultados experimentales mostró una buena solución para los modelos predictivos [6]. Esto es de gran importancia para validar experimentalmente las simulaciones y asegurar sus capacidades predictivas. Sin embargo, los cambios rápidos que ocurren en el proceso de soldadura complican la observación de las cantidades de datos requeridas para la validación de la simulación. Bruna-Rosso et al. [7] también implementaron un modelo térmico de elementos finitos para predecir las transformaciones de fase durante el proceso de soldadura. El modelado numérico es hoy una herramienta estándar en la industria manufacturera para realizar diseños y determinar parámetros de procesos.

Se-Yun et al. [8], predijeron la distribución de tensiones residuales en el proceso de soldadura por electrogas, para lo que utilizaron un enfoque computacional con una fuente de calor móvil. Los perfiles de tensiones residuales determinados mediante la simulación y las mediciones realizadas mostraron buena concordancia. Piekarska et al. [9], utilizaron la simulación computacional para determinar los campos de temperatura y de velocidad de fusión del material para distancias diferentes de la fuente de calor. La geometría de las zonas características de la unión, estimadas mediante métodos numéricos se comparó con imágenes macroscópicas de la sección transversal de la soldadura. Esto permitió evaluar la conveniencia de utilizar el modelo numérico desarrollado en aplicaciones industriales. La geometría del cordón de soldadura, la distribución de temperaturas y de las tensiones residuales obtenidas por Arunkumar et al. [10] mostraron que los valores teóricos obtenidos con la simulación numérica están acordes con los valores experimentales.

En la simulación numérica se consideran un grupo de propiedades físicas y mecánicas que son necesarias para conocer la distribución de las temperaturas y tensiones residuales en la unión. Estas propiedades varían con la temperatura [11]. Con las simulaciones se puede conocer cómo se afectan

los resultados cuando se tiene o no en cuenta la termodependencia de las propiedades en los procesos donde existen gradientes de temperatura.

En esta investigación se realizó la simulación numérica del proceso de soldadura manual por arco eléctrico de una unión soldada a tope del acero AISI 1015 y el electrodo E6013. El objetivo fue evaluar mediante el Método de los Elementos Finitos, las dimensiones de la ZAT en las uniones soldadas a tope, considerando la influencia de las propiedades dependientes de la temperatura. De esta manera se configuraron estudios térmicos transitorios; en uno se definió que existía termodependencia de las propiedades y en el otro no.

2. Materiales y Métodos

Caracterización de los materiales utilizados

El acero AISI 1015 es un acero de construcción con una buena soldabilidad metalúrgica, operatoria y constructiva. Las Tablas 1 y 2 muestran la composición química y las propiedades mecánicas del material base respectivamente.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 1015

Composición	Valor
% C	0,13 - 0,18
% Mn	0,30 - 0,60
% Si	0,17 - 0,37
% S	≤ 0,05
% P	≤ 0,04

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 1015 a temperatura ambiente

Propiedades	Valor
Límite de rotura σ_u (MPa)	420
Límite elástico σ_y (MPa)	315
Coefficiente de Poisson μ	0,29
Densidad ρ (kg/m ³)	7 870
Coefficiente de dilatación térmica α (1/°C)	$119 \cdot 10^{-7}$
Módulo de elasticidad E (MPa)	205 000
Alargamiento δ (%)	39
Extricción ψ (%)	61

El material de aporte utilizado fue el electrodo E6013. La Tabla 3 muestra las propiedades mecánicas del depósito proporcionadas por la Empresa Acinox Camagüey en el envase de los electrodos. Como se aprecia en la primera de ellas, la resistencia mecánica de este material de aporte es algo superior que la del material base, referida en la Tabla 2. Por lo tanto, la selección de este electrodo es posible.

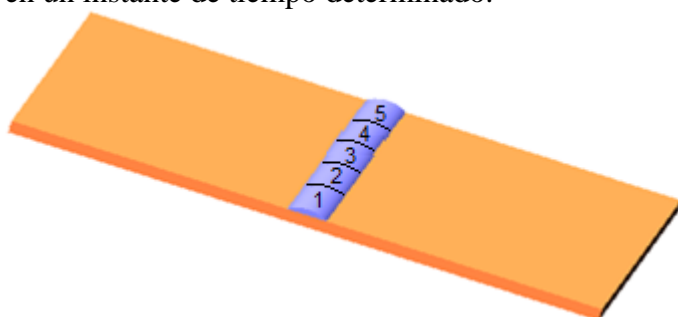
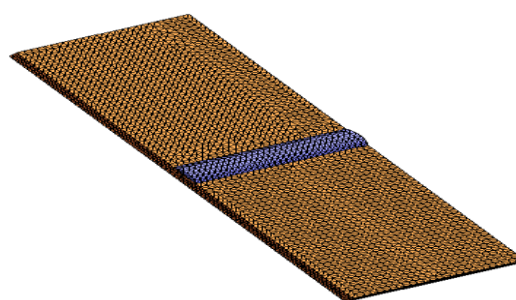
Los valores termodependientes de las diferentes propiedades físicas y mecánicas se consultaron en la bibliografía. Para el caso del Coeficiente de dilatación térmica se utilizaron los valores disponibles en la base de datos *MatWeb*. En [11] se encontraron los valores del Módulo de Elasticidad E , del Coeficiente de Poisson μ , el Límite elástico σ_y y el Límite de rotura σ_u .

Tabla 3. Propiedades mecánicas del depósito (Empresa Acinox Camagüey)

Propiedades	Valor
Límite de rotura σ_u (MPa)	431
Límite elástico σ_y (MPa)	392
Alargamiento δ (%)	20-28
Extricción ψ (%)	35-60

Modelo geométrico

En la Figura 1 se muestra el modelo geométrico utilizado para los estudios. Este modelo se realizó con el programa *SolidWorks* 2016. Se compone de dos planchas y el cordón de soldadura. Este último se dividió en cinco partes para facilitar la simulación del movimiento del electrodo. Cada una de esas partes se corresponde con un paso de soldadura, que es la posición de la fuente de calor en un instante de tiempo determinado.

**Fig.1** Modelo geométrico**Fig.2** Modelo geométrico mallado

Mallado del modelo

El tipo de elemento de finito utilizado es tetraédrico. El tamaño de los elementos es de 0,779 mm, mientras que la tolerancia es igual a 0,039 mm. La cantidad de elementos presentes en el modelo fue de 37 577 mientras que la cantidad de nodos es de 59 550. En los estudios térmicos, el tipo de elemento finito utilizado tiene un grado de libertad por nodo que se corresponde con la temperatura nodal. El mallado del modelo obtenido de esta manera se expone en la Figura 2.

Estudio térmico transitorio

En el estudio térmico transitorio se realizó la simulación del movimiento del electrodo en una unión soldada a tope del acero AISI 1015. El objetivo fue comparar los resultados de las dimensiones de la zona de afectación térmica, considerando que hay o no termodependencia de las propiedades físicas y mecánicas de las dos planchas soldadas. Para realizar el estudio se procedió como se describe a continuación. En las propiedades del estudio térmico se definió el tipo de estudio como transitorio y el paso que fue de un segundo. El intervalo estudiado, en un primer momento, fue de siete segundos, considerando que es el tiempo en que ha terminado de moverse el electrodo sobre las planchas.

En el estudio térmico transitorio se persigue simular el movimiento de la fuente de calor, o sea, el desplazamiento del electrodo mientras se realiza la soldadura. Para ello es preciso definir curvas de tiempo de la dependencia de la fuente de calor en el tiempo. Estas curvas no son más que la descripción mediante una función de cómo varía la fuente de calor durante el desarrollo del proceso de soldadura.

Es necesario conocer cuáles son las cargas térmicas que se aplican al modelo y las condiciones de frontera existentes. Las primeras están dadas por la potencia del arco, mientras que las segundas son la forma en que se transfiere calor al medio.

La potencia calorífica del arco P se calculó mediante (1):

$$P = \eta IU \quad (1)$$

$$P = 1\,068,75 \text{ W.}$$

Donde:

η : es la eficiencia del proceso de soldadura. Para un proceso de soldadura manual por arco eléctrico se puede considerar igual a 0,75.

I : es la intensidad de la corriente en el arco. Se determinó a partir del diámetro del electrodo y en este estudio se tomó igual a 57 A.

U : la tensión de la corriente. Se consideró igual a 25 V.

La velocidad de soldadura v_e es otra variable importante en la simulación de los procesos de soldadura. Para este estudio fue de 14,48 m/h que es aproximadamente igual a 4 mm/s. De esta manera se definen las curvas de tiempo que se utilizaron para modelar el desplazamiento del electrodo durante la soldadura. El ancho de la plancha y del cordón fue de 20 mm y se dividió en cinco partes de cuatro milímetros cada una. Esto indica que la fuente de calor permanece durante un segundo en cada parte del cordón. Almaguer et al. [12] utilizaron curvas de tiempo para simular el movimiento del electrodo. Esas curvas son retomadas en este trabajo y se muestran en la Figura 3.

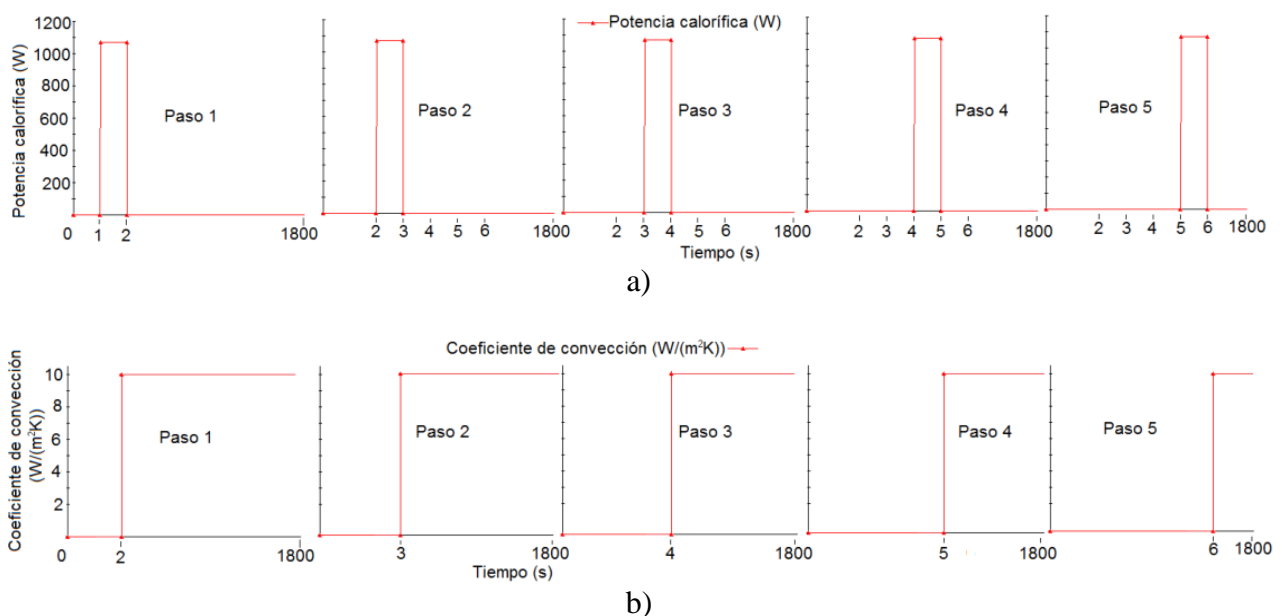


Fig.3 Curvas de tiempo. a) Para modelar el movimiento del electrodo. b) Para modelar la convección después de depositado el material de aporte [12]

La transferencia de calor al medio ocurre mediante mecanismos de convección. El coeficiente de película es igual a 10 W/(m².K) [8]. En todas las caras de la plancha se asignó este valor de manera constante.

Estudio de enfriamiento

Para hacer un mejor uso del recurso computacional se definieron estudios térmicos transitorios que simularon el enfriamiento de la unión. La temperatura inicial para los diferentes estudios, es la temperatura final de los análisis térmicos precedentes. El paso de tiempo se fijó a 40 segundos. El intervalo de tiempo total estudiado fue de 2 000 segundos, que es cuando se logra el enfriamiento de las planchas hasta la temperatura ambiente. En este caso la única carga térmica presente es la convección libre, expresada por el coeficiente de transferencia de calor igual a $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

3. Resultados y Discusión

Análisis de los resultados obtenidos en el estudio térmico transitorio con y sin termodependencia

Después de realizados los estudios térmicos transitorios se definieron iso-superficies para conocer la posición de tres isoterms planteadas por Rodríguez [13]. Estas se corresponden con la definición de tres subzonas de la ZAT, cada una de ellas con sus características. El valor de las isoterms es de 723°C (limita la ZAT con el metal base que no ha sufrido transformaciones metalúrgicas), de 910°C y de $1\,100^\circ\text{C}$ (límite entre la zona fundida y la ZAT) respectivamente. Estas temperaturas se seleccionaron del diagrama hierro-carbono que permitió conocer las temperaturas a las que ocurren los cambios de fase.

En la Figura 4 se muestran los resultados de la simulación del proceso de soldadura a los siete segundos. En este instante de tiempo terminó el movimiento del electrodo. La Figura 4 a) se corresponde al estudio sin termodependencia. En la Figura 4 b) está la distribución de las temperaturas a los siete segundos del modelo con termodependencia de las propiedades físicas y mecánicas.

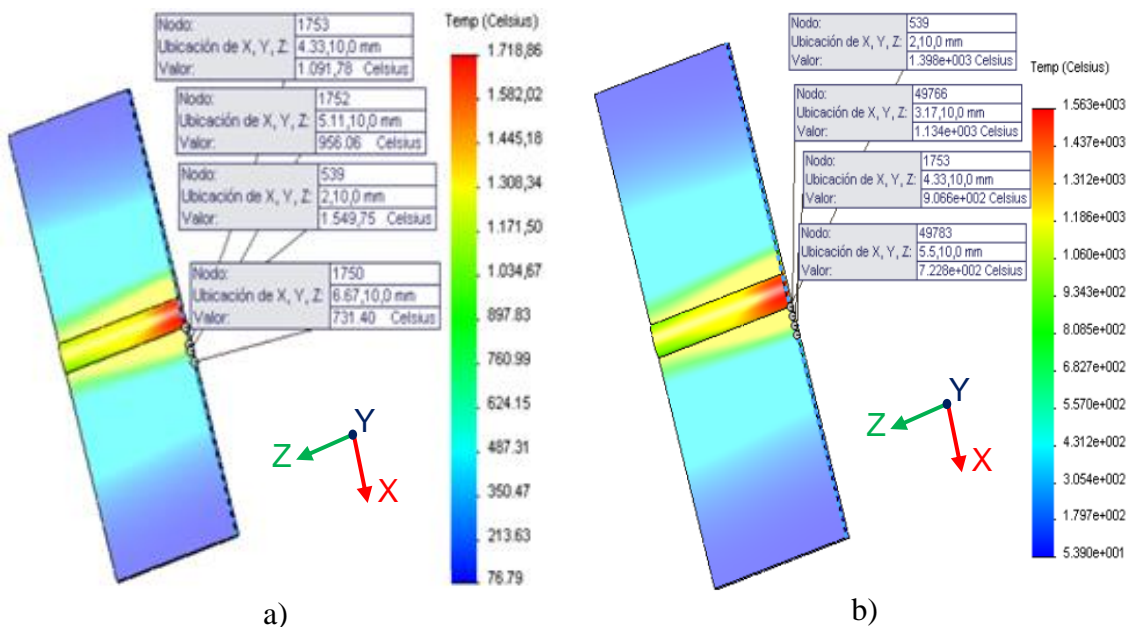


Fig.4 Resultados de la simulación del proceso de soldadura a los siete segundos. a) Sin termodependencia. b) Con termodependencia

La Tabla 4 muestra la posición de las diferentes isoterms para los estudios cuando se consideró o no la termodependencia en las propiedades del material base. Es importante señalar que la zona de afectación térmica es mayor cuando no se considera la termodependencia. En este caso, el ancho de la ZAT es de 6,67 mm, mientras que para cuando se consideró el efecto de la termodependencia ese valor fue de 5,5 mm. Esto indica que la zona donde ocurren las transformaciones metalúrgicas tiene

mayor tamaño cuando no se tiene en cuenta la variación de las propiedades con la temperatura. Por esa razón es necesario tener en cuenta este fenómeno para la planificación de la simulación numérica de los procesos de soldadura.

Tabla 4. Posición de las isotermas

Parámetro	Con termodependencia			Sin termodependencia		
Isoterma (°C)	1 100	910	723	1 100	910	723
X (mm)	3,17	4,33	5,5	4,33	5,11	6,67
Y (mm)	10	10	10	10	10	10
Z (mm)	0	0	0	0	0	0

Como se observa en las curvas que aparecen en la Figura 5, para el estudio sin termodependencia se aprecia el pico más alto respecto al que se considera la presencia de esta. En el caso de las curvas con las propiedades constantes se observa que la diferencia es mayor durante el calentamiento respecto al estudio con las propiedades variables con la temperatura. Esto se corresponde con lo observado en la Tabla 4, donde se muestra que la ZAT tiene dimensiones mayores cuando las propiedades son invariantes. Se observó que durante el enfriamiento las curvas prácticamente coinciden. Acorde con estas observaciones se plantea que para simular de procesos de calentamiento a elevadas temperaturas es necesario considerar las propiedades termodependientes del material. Sin embargo, no es así para los procesos de enfriamiento de la unión soldada.

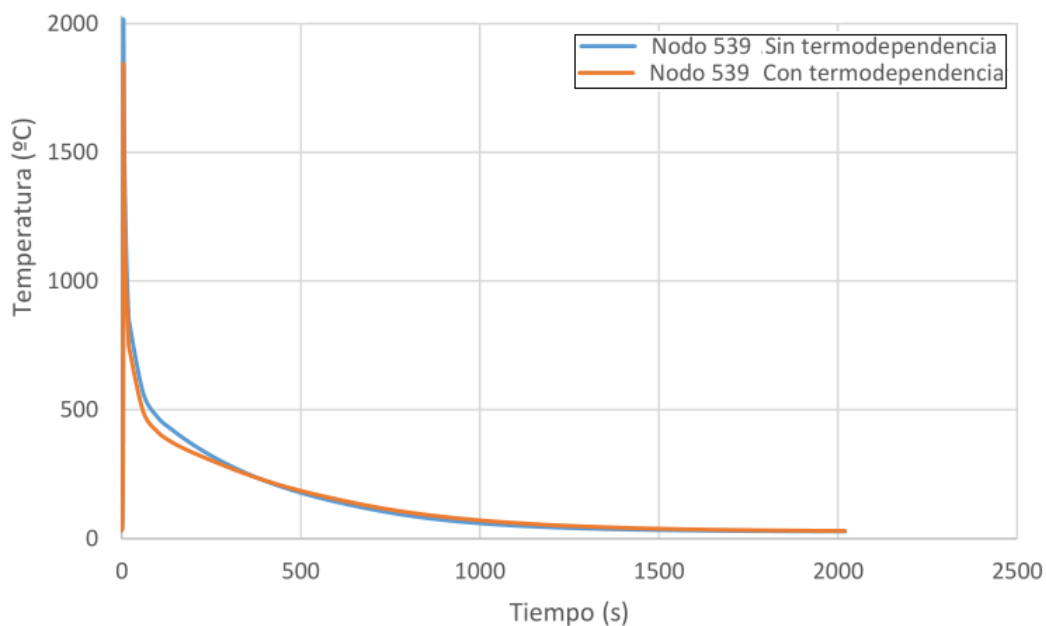


Fig.5 Comparación de las curvas de temperatura en el tiempo en el nodo 539 ubicado sobre la línea de fusión

4. Conclusiones

En este trabajo se simuló mediante el Método de los Elementos Finitos, la unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013. Para ello se realizaron estudios térmicos transientes. En uno se consideró que las propiedades físicas y mecánicas del material eran constantes, mientras que en otro eran variables con la temperatura. Se concluyó que existen diferencias en las dimensiones de las distintas zonas que conforman la ZAT de la unión simulada cuando se valoró o no la termodependencia de las propiedades. El ancho de la ZAT cuando se consideraron las propiedades termodependientes fue igual a 5,5 mm, mientras que si las propiedades eran invariantes ese valor fue de 6,67 mm. Como se aprecia en esos resultados la ZAT es mayor cuando las propiedades son

invariables. Durante el desplazamiento del electrodo la temperatura máxima que se alcanzó fue menor para el caso en el que se consideró la termodependencia respecto al que no se evaluó esta. En el enfriamiento de la unión esta diferencia prácticamente no existe. Esto indica que es necesario considerar la termodependencia de propiedades en la simulación numérica de los procesos térmicos transientes que ocurren a elevadas temperaturas, y que es posible despreciarla cuando la temperatura disminuye.

Referencias

1. Waghmare, U., Dhoble, A. S., Taiwade, R., Verma, J., Vashishtha, J., *Prediction of heat affected zone and other mechanical properties of welded joints of HSLA A588-B of jet blast deflector*. World Journal of Engineering, 2019. **16**(4): p. 438-444. DOI: <https://doi.org/10.1108/WJE-08-2018-0281>.
2. Cabrini, M., Sinigaglia, E., Spinelli, C., Tarenzi, M., Testa, C., Bolzoni, F.M., *Hydrogen Embrittlement Evaluation of Micro Alloyed Steels by Means of J-Integral Curve*. Materials, 2019. **12**(11): p. 1843. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12111843>.
3. Di Schino, A., Di Nunzio, P.E., *Effect of Nb microalloying on the heat affected zone microstructure of girth welded joints*. Materials Letters, 2017. **186**(1): p. 86-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.092>.
4. Peng-Hsiang, C., Tso-Liang, T., *Numerical and experimental investigations on the fatigue evaluation of butt-welded joints*. Metals and Materials International, 2008. **14**(3): p. 361-372. DOI: <https://doi.org/10.3365/met.mat.2008.06.361>.
5. Muhammad, A., Ali, M.A., Shanono, I.H., *Finite element analysis of a connecting rod in ANSYS*. Materials Science and Engineering, 2020. **736**: p. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022119>.
6. Wang, D., Zhang, H., Gong, B., Deng, C., *Residual stress effects on fatigue behaviour of welded t-joint: A finite fracture mechanics approach*. Materials & Design, 2016. **91**(5): p. 211-217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.106>.
7. Bruna-Rosso, C., Gökhan Demir, A., Previtali, B., *Selective laser melting finite element modeling: Validation with high-speed imaging and lack of fusion defects prediction*. Materials & Design, 2018. **156**(15): p. 143-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.037>.
8. Se-Yun, H., Yooil, K., Jang-Hyun, L., *Finite element analysis of residual stress distribution in a thick plate joined using two-pole tandem electro-gas welding*. Journal of Materials Processing Technology, 2016. **229**: p. 349-360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.037>.
9. Piekarska, W., Kubiak, M., Vaško, M., *Numerical Estimation of the Shape of Weld and Heat Affected Zone in Laser-arc Hybrid Welded Joints*. Procedia Engineering, 2017. **177**: p. 114-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.198>.
10. Arunkumar, M., Dhinakaran, V., Siva, N., *Numerical prediction of temperature distribution and residual stresses on plasma arc welded thin titanium sheets*. International Journal of Modelling and Simulation, 2019. **41**(2): p. 146-162. DOI: <https://doi.org/10.1080/02286203.2019.1700089>.
11. Stiopin, P. A., *Resistencia de Materiales*, 1976. Moscú: Mir.
12. Almaguer, P., Estrada, R., Pérez, R., *Evaluación por el método de los elementos finitos de la influencia de las tensiones residuales en la fatiga de uniones soldadas*. Ingeniería Mecánica, 2016. **19**(1): p. 40-48.
13. Rodríguez, H., *Metalurgia de la soldadura*, 1983. La Habana: Pueblo y Educación. ISBN: 84-605-14-75-7.

Conflicto de Intereses

No existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Pavel Michel Almaguer Zaldivar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-9961>

Participó en el diseño de la investigación, en la simulación numérica y redacción del manuscrito.

Raúl Rolando Ramos Santiago: <https://orcid.org/0000-0003-1442-3904>

Participó en el diseño de la investigación y en la simulación numérica.

Hortensia Santiago Cuenca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9215-416X>

Participó en el diseño de la investigación y en la redacción del manuscrito.

Patricia del Carmen Zambrano Robledo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9491-0069>

Participó en el diseño de la investigación, conceptualización, supervisión, curación de datos y metodología.