



Ciencias Holguín
ISSN: 1027-2127
revista@cigetholguin.cu
Centro de Información y Gestión Tecnológica de
Holguín
Cuba

Simulación de la soldadura a tope de acero AISI-1015 y electrodo E6013

Almaguer-Zaldivar, Pavel Michel

Simulación de la soldadura a tope de acero AISI-1015 y electrodo E6013

Ciencias Holguín, vol. 24, núm. 3, 2018

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Holguín, Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181556120004>

Declaración de Copyright: Esta licencia permite a otros entremezclar, ajustar y construir a partir de su obra con fines no comerciales, y aunque en sus nuevas creaciones deban reconocerle su autoría y no puedan ser utilizadas de manera comercial, no tienen que estar bajo una licencia con los mismos términos.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Simulación de la soldadura a tope de acero AISI-1015 y electrodo E6013

Simulation of the AISI-1015 steel and E6013 electrode butt welded joint

Pavel Michel Almaguer-Zaldivar 1
Universidad de Holguín, Cuba
 pavel@uho.edu.cu

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181556120004>

Recepción: 10 Noviembre 2016
 Aprobación: 11 Enero 2018
 Publicación: 31 Julio 2018

RESUMEN:

Las uniones soldadas son complejas debido a las diferencias metalúrgicas y las tensiones residuales que aparecen en ella por los elevados gradientes de temperatura que ocurren en ella. En este trabajo se realiza la simulación numérica del movimiento del electrodo en una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013. Para confeccionar el modelo geométrico se utiliza el software SolidWorks 2013 y las simulaciones se realizan con el complemento Simulation. Se obtiene la distribución de la temperatura en la unión y el estado tensional que surge en las planchas.

PALABRAS CLAVE: Acero aisi 1015, Método de los elementos finitos, Tensiones residuales, Unión soldada.

ABSTRACT:

Welded joints are complex due to metallurgical differences and the residual stresses caused by the high temperature gradients that occur in them. In this work, the numerical simulation of the movement of the electrode is performed in a butt-welded joint of AISI 1015 steel and E6013 electrode. To obtain the geometric model, the SolidWorks 2013 software is used and the simulations are done with the Simulation complement. The temperature distribution in the joint and the stress state that arises in the plates are obtained.

KEYWORDS: aisi 1015 steel, finite element method, residual stresses, welded joint.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento desigual de las diferentes zonas que componen la unión soldada, unido a las condiciones de borde mecánicas, provoca la aparición de tensiones residuales. Entre las hipótesis aceptadas en la teoría de la Resistencia de Materiales se encuentra que las tensiones que anteceden a la aplicación de las cargas son nulas, o sea que no se tienen en cuenta posibles estados tensionales que ya podrían existir en el material antes de ser sometido a las condiciones de explotación. Sin embargo, producto a la acción de las tensiones residuales de soldadura, ya existe un estado tensional previo a la acción de las fuerzas a las que estará sometido el elemento durante su funcionamiento.

La simulación numérica ha sido empleada por varios autores para realizar el estudio de las uniones soldadas. La posibilidad que brindan los elementos finitos de simular procesos térmicos se presenta como una opción interesante para la evaluación de los fenómenos que tienen lugar en las uniones soldadas. Numerosos

NOTAS DE AUTOR

- 1 MSc. Pavel Michel Almaguer-Zaldivar, pavel@uho.edu.cu Profesor Auxiliar del Centro de estudios CAD/CAM. Facultad de Ingeniería. Universidad de Holguín. Graduado de Ingeniero Mecánico en la Universidad de Holguín en el año 2002 y de Máster en Diseño y Fabricación Asistido por Computadoras en el año 2014. Profesor de las asignaturas Resistencia de Materiales para ingenieros mecánicos y civiles, Elementos Finitos y Modelación y Simulación de Fenómenos de Transporte. Miembro de la Asociación de Ingenieros Mecánicos de Holguín (ASIMEC) y de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba (UNAICC). Ha participado en diferentes eventos y tiene varias publicaciones y registros en el CENDA. Ha recibido reconocimientos como título de Oro, Premio relevante y mejor tecnología educativa en el concurso Nacional de computación, y otros. Actualmente investiga sobre la fatiga de uniones soldadas.

autores han utilizado este método y los resultados obtenidos han demostrado la factibilidad de los métodos numéricos para estudiar las soldaduras.

Waheed, Shakoor, Azam, Khan & Shah (2015) valoraron diferentes parámetros en la simulación numérica del proceso de soldadura para reducir el calor añadido sin afectar la calidad de la unión soldada. En otra investigación (Suresh, 2015) estudió la soldadura láser de láminas de aceros ferríticos, obteniendo resultados similares entre la simulación y la experimentación. El estudio tridimensional de un modelo transiente de análisis térmicos y mecánicos acoplados para simular los fenómenos que ocurrían durante la soldadura con arco eléctrico fue realizado por (Damale & Nandurkar, 2012). El modelo térmico fue verificado mediante la comparación de las macrografías de los modelos de elementos finitos y de la soldadura.

La comparación entre las simulaciones y los experimentos es una buena opción para realizar modelos predictivos, como se demostró en otras investigaciones (Chin-Hyung, Kyong-Ho & Nguyen, 2015; Wang, Zhang, Gong, & Deng, 2016).

Como se ha mostrado las tensiones residuales constituyen un problema en todos los procesos donde existe aplicación de calor. Las tensiones de tracción propician el crecimiento de grietas, mientras que las de compresión favorecen pandeos y distorsiones indeseables. En las uniones soldadas se hace necesario conocer los valores de estas. Es posible citar algunos autores que han investigado este fenómeno mediante el empleo de los elementos finitos. La distribución de temperaturas y tensiones residuales se analizó por (Abhishek, Anil Kumar & Madhusudhan, 2015), donde se obtuvo un elevado gradiente de tensiones cerca de la zona fundida. Recientemente Se-Yun, Yooil & Jang-Hyun (2016) predijeron la distribución de las tensiones residuales en uniones soldadas, mediante un enfoque computacional que considera una fuente de calor que se desplazaba. Los perfiles de tensiones residuales determinadas mediante los elementos finitos mostraron un buen ajuste con los medidos de manera experimental. Lee, Chiew & Jiang (2013) realizaron una investigación mediante métodos numéricos en la distribución de tensiones residuales cerca del pie de la soldadura de uniones en forma de Y; mientras que (Fua, Lourenco, Duan & Estefen, 2014) estudiaron las tensiones residuales y la distorsión en uniones en T bajo diferentes condiciones de frontera. En ambos casos se utilizaron modelos acoplados de estudios térmicos y mecánicos calibrados de manera experimental.

En este artículo se realiza la simulación numérica de una unión soldada a tope para evaluar la distribución de temperaturas y el estado tensional que se produce por el movimiento del arco. Es necesario concatenar estudios térmicos transitorios y estáticos por la acción de cargas térmicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los programas de simulación mediante el método de los elementos finitos permiten la concatenación de diferentes estudios que pueden ser aplicados en el análisis del comportamiento mecánico de los elementos de máquina y estructuras.

La distribución compleja de las tensiones residuales en la unión soldada, así como su influencia en la vida a fatiga de la unión provocan que sea necesario la búsqueda constante de soluciones para determinar dicha influencia. En este trabajo se simula el movimiento del electrodo para obtener una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013. También se obtiene el estado tensional producido por los gradientes de temperaturas que ocurren durante el proceso de soldadura.

Generación del modelo geométrico

El modelo geométrico que representa la unión se dibujó en el programa CAD *SolidWorks* 2013, mientras que las simulaciones se realizaron con el complemento *Simulation*. Para obtener el modelo se dibujan independientemente la plancha y un pedazo del cordón. Después se realizó un ensamblaje, donde se inserta la plancha y el fragmento del cordón. Por último, mediante el comando “Matrices” se generan tantas partes del cordón como pasos del proceso de soldadura se simulan. El conjunto de todas esas partes forman el cordón de soldadura. Cada fragmento del cordón representa un paso del proceso de soldadura. Esta división obedece

a que para simular el movimiento del electrodo se utilizan curvas de tiempo que describen la variación de la fuente de calor en el tiempo. El modelo obtenido se muestra en la Figura.1 a).

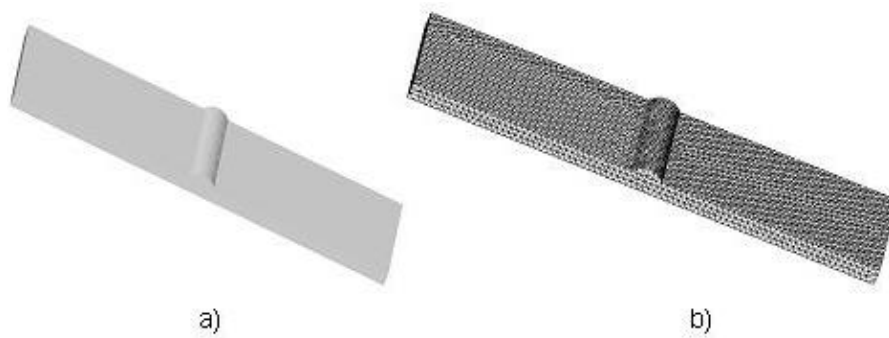


FIGURA 1.
Modelo utilizado para realizar las simulaciones.
 a) Modelo para realizar los estudios.
 b) Mallado

Debido a que en el proceso de soldadura ocurren grandes gradientes de temperatura se utilizan las propiedades termodependientes del acero AISI 1015 y del material de aporte. Es importante destacar que el material de aportación debe tener características similares que el material base. Siguiendo este criterio se utilizan los mismos valores para el material base y el de aporte para la termodependencia de las siguientes propiedades: módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y de expansión térmica. La Tabla 1 expone los valores que toman las diferentes propiedades consideradas con la variación de la temperatura.

TABLA 1.
Propiedades termodependientes del acero AISI 1015.

Temperatura T (°C)	Módulo de elasticidad E (GPa)	Coeficiente de Poisson m	Límite de fluencia sf (MPa)	Límite de rotura sr (MPa)	Coeficiente de expansión térmica a (10 ⁻⁵ °C ⁻¹)
0	212,5	0,271	287,5	425	
50	203,125	0,275	285	431,25	
100	200	0,28125	281,25	437,5	1,19
150	195,3125	0,285	275	450	
200	193,75	0,2875	262,5	462,5	1,24
250	187,5	0,29375	250	493,75	
300	184,37	0,3	237,5	490	1,30
350	181,25	0,3	218,75	475	
400	175	0,3	200	443,75	1,35
450	171,8	0,30625		388	
500	167	0,3125		300	1,42
550	160	0,321875		237,5	
600	153	0,325		175	
650	143,75	0,3375		140	
700	131,25	0,35		100	
750	118,75	0,3625		80	
800	91	0,3875		62,5	

† Los valores de las propiedades fueron tomados de (Stiopin, 1976),
 excepto el coeficiente de expansión térmica (MatWeb, 2018).

Cuando se utiliza el método de los elementos finitos para realizar estudios concatenados es muy importante el mallado del modelo. Esto obedece a que la forma de la malla tiene que ser la misma para cada uno de los estudios. Por eso se ubica el mallado en la etapa de construcción del modelo geométrico, lo que garantiza el requisito de que el tamaño y ubicación de cada uno de los elementos sea el mismo para cada uno de los estudios.

En este estudio se emplea un mallado con elementos sólidos tetraédricos, que tienen 10 nodos por elemento. Los grados de libertad de cada nodo dependen del estudio que se realice. Para el estudio térmico transitorio se corresponden con la temperatura nodal variable en el tiempo del modelo. Para el caso de los estudios estáticos son tres grados de libertad por nodo, correspondiéndose con los desplazamientos lineales en cada eje coordenado. El modelo tiene 37 577 elementos y 59 550 nodos, con un tamaño de elemento de 0,78 mm y una tolerancia de 0,39 mm. El modelo mallado se muestra en la Figura 1 b).

Estudio térmico transitorio

Con 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. Esto se logra mediante curvas de tiempo o de la dependencia de la fuente de calor en el tiempo, que no son más que la descripción de como varía la fuente de calor durante el desarrollo del proceso de soldadura.

Para configurar el estudio transitorio que simula el movimiento del electrodo 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 es posible calcularla mediante la Ecuación 1: $P = \eta IU$

Dónde:

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 determina a partir del diámetro del electrodo y en este estudio se toma igual a 57 A.

U : la tensión de la corriente. Se considera 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 es de 14,48 m.h⁻¹ que es aproximadamente igual a 4 mm.s⁻¹. De esta manera se definen las curvas de tiempo que se utilizan para modelar el desplazamiento del electrodo durante la soldadura. El ancho de la plancha y del cordón es de 20 mm y se ha dividido en cinco partes de 4 mm cada una. Esto indica que la fuente de calor permanece durante un segundo en cada parte del cordón. Las curvas de tiempo que se utilizan en el estudio se encuentran en la Figura 2 a).

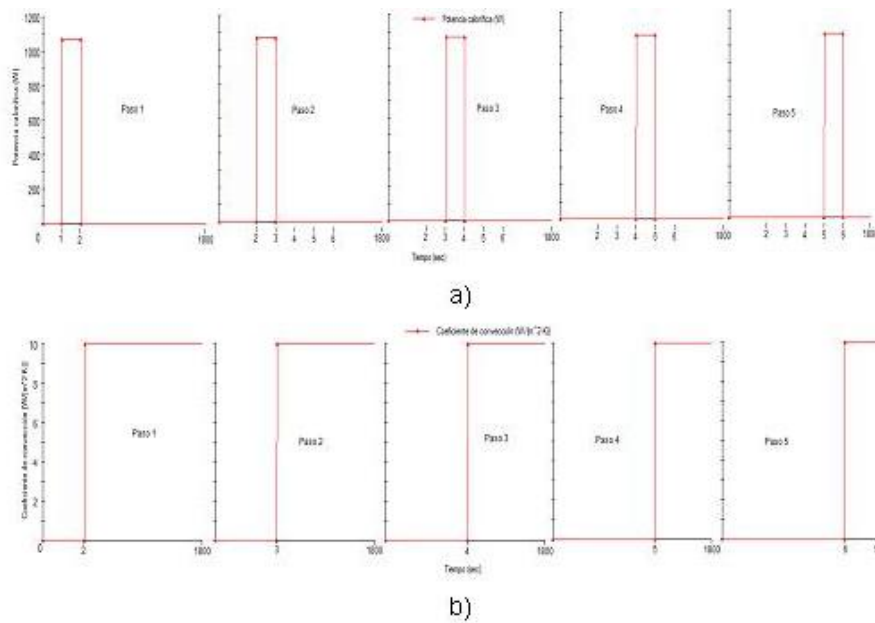


FIGURA 2.
Curvas de tiempo. a) Para modelar el movimiento del electrodo. b) Para modelar la convección después de depositado el material de aporte

La transferencia de calor al medio ocurre mediante mecanismos de convección. El coeficiente de película es igual a $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (Se-Yun et al., 2016). En todas las caras de la plancha se asigna este valor de manera constante, sin embargo en las diferentes partes del cordón se modela mediante curvas de tiempo que activan el mecanismo de convección después que ha sido retirada la potencia calorífica de esa parte (Figura 2 b).

Estudio estático a partir de la distribución de temperatura

Este estudio persigue determinar la distribución de tensiones debido a los gradientes de temperatura que ocurren durante el proceso de soldadura y el posterior enfriamiento, o sea, las tensiones residuales que quedan en la unión después que se enfría.

Para analizar las tensiones térmicas se le aplicaron al modelo restricciones fijas en los extremos. Esto obedece a que cuando se construye una unión existen condiciones de embridamiento por el resto de la estructura, que limitan la libre dilatación y contracción de las barras a unir.

Como cargas mecánicas se aplican los desplazamientos que ocurren por lo cambios de temperatura. Para ello se le asigna al estudio estático el último paso del estudio térmico transitorio que se realizó antes. Como temperatura de referencia para las deformaciones nulas se tomó la temperatura ambiente de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Es indispensable que las características del material y el tamaño y la forma de la malla tengan los mismos valores que para el estudio térmico transiente. Para lograrlo se copian los mismos en ese estudio y después se pegan en el estático, con lo que se logra que se cumpla esa condición.

RESULTADOS

Simulación del proceso de soldadura

El proceso de soldadura fue simulado mediante el desplazamiento de la fuente de calor, o sea del electrodo como se explicó en la sección 2.2. En la Figura 3 se muestran resultados para el segundo paso de carga.

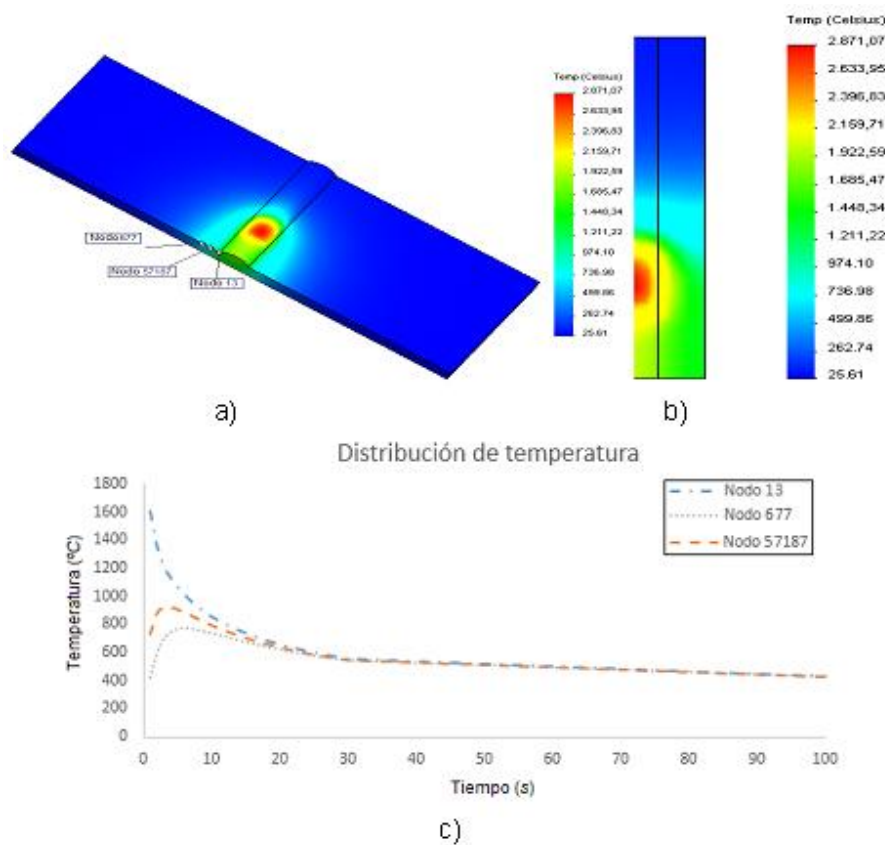


FIGURA 3.

Simulación del proceso de soldadura. a) Isotermas a los 2 segundos de iniciado el proceso de soldadura. b) Distribución de las isothermas en la sección transversal del cordón de soldadura. c) Curvas de variación de temperatura en los nodos 13, 667

En la Figura 3 a) se encuentra la distribución de las temperaturas a los dos segundos de iniciada la simulación. Esto es en el segundo paso de carga, o sea, cuando la potencia calorífica se encuentra ubicada en la segunda parte del cordón de soldadura. Como se aprecia en esa figura existe una zona que alcanza valores muy elevados de temperatura y se corresponde con la zona donde se aplica el calor. Se observa que las isothermas tienen forma de elipse centrada donde actúa la potencia calorífica, lo que se corresponde con los modelos de aplicación de la fuente de calor. También es importante destacar las dimensiones de la zona de afectación térmica que está comprendida entre la línea de fusión y la isoterma de 750 °C y mide aproximadamente 1,58 mm.

La imagen mostrada en la Figura 3 b) es la distribución de temperaturas en la sección transversal en la zona media del cordón de soldadura en el mismo paso de tiempo anterior. Igualmente se observan las isothermas que tienen forma de elipse centrada en la zona de aplicación de la fuente de calor, así como tienen un radio menor en la zona frontal de la elipse.

La gráfica de la Figura 3 c) presenta el comportamiento de la temperatura en el tiempo para los nodos 13, 15 187 y 677 ubicados en la línea de fusión, en la zona de afectación térmica y al final de ella respectivamente. En esa figura solo se representaron los primeros 100 minutos del procesos para observar el comportamiento de la temperatura en los nodos durante la aplicación de la fuente de calor. El enfriamiento de la unión hasta la temperatura ambiente de 25 °C ocurre a los 1 850 segundos. Mientras se aplica la fuente de calor se aprecia el aumento brusco de la temperatura en la zona estudiada. En el nodo 13, que es el más caliente, a los 15 segundos la temperatura ya es inferior a los 750 °C, que es la temperatura de la primera transformación del

acero. Este mismo fenómeno se aprecia para el nodo 15 187 a los 13 segundos, mientras que el nodo 677 alcanza una temperatura máxima de 766 °C a los 7 segundos.

Estado tensional debido a los cambios de temperatura

El estado tensional que se produce en la plancha debido a los cambios de temperatura está en la Figura 4. De acuerdo a la orientación de las tensiones residuales respecto al eje del cordón de soldadura se clasifican en longitudinales y transversales, siendo las primeras paralelas al eje del cordón y las segundas perpendiculares a este.

Las tensiones de von Mises alcanzan valores de 57,4 MPa, sin embargo estos tienen lugar en el material base y son muy inferiores al límite de fluencia del material, por lo tanto no son causantes de deformaciones permanentes. Aunque en la zona de transición estas tensiones solo alcanzan valores de 10 MPa, son muy interesantes, atendiendo a que en uniones soldadas reales en esa zona y en la zona de afectación térmica contigua a ella; es donde comúnmente puede ocurrir el fallo por fatiga debido a la reducción de la tenacidad que tiene lugar.

Las tensiones longitudinales y transversales son mayormente de compresión. Sin embargo, las tensiones de tracción ocurren en la zona del cordón de soldadura y en la zona de transición. Aunque las tensiones residuales positivas tengan valores pequeños, estos se suman a las producidas por las cargas mecánicas, lo que provoca que aumenten las tensiones máximas cuando se apliquen las cargas mecánicas.

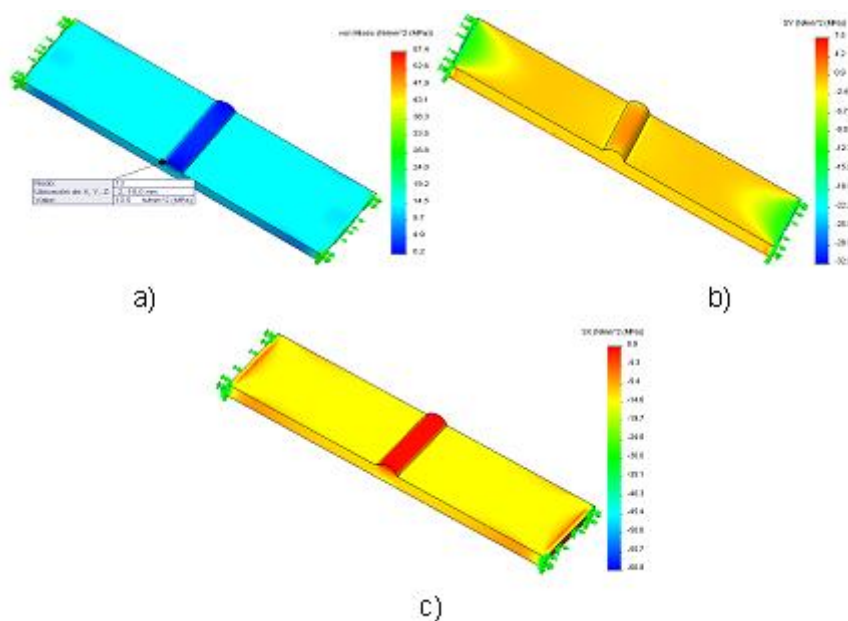


FIGURA 4. Estado tensional debido a los cambios de temperatura. a) Tensiones de von Mises. b) Tensiones longitudinales. c) Tensiones transversales.

CONCLUSIONES

En este trabajo se obtuvieron las conclusiones siguientes:

1. Con la concatenación de diferentes simulaciones numéricas es posible estudiar los procesos que ocurren en las uniones soldadas.
2. Se obtuvo la distribución de la zona de afectación térmica, además de las tensiones que se producen por los elevados gradientes de temperatura que ocurren durante la soldadura.

3. Con la simulación numérica se pueden planificar los procesos de soldadura para garantizar que ocurran los menores valores de tensiones residuales.

REFERENCIAS

- Waheed, R., Shakoor, A., Azam, K., Khan, A., & Shah, F. (2015). Welding distortion control in thin metal plates by altering heat input through weld parameters. *Technical Journal of University of Engineering and Technology Taxila*, 20 (II), 171–177.
- Suresh-Kumar K. (2015). Numerical modeling of an autogenous butt joint welding of low carbon ferritic steel sheets using a pulsed Nd: YAG laser beam. *Indian Journal of Science*, 14(43), 143-150.
- Damale, A. & Nandurkar, K. (2012) 3-d coupled fe analysis and experimental validation of restrained welding to control angular distortion. *Journal of The Institution of Engineers, Series C* 93(4), 365–371.
- Chin-Hyung, L., Kyong-Ho, C., & Nguyen, V. (2015). Finite element modelling of residual stress relaxation in steel butt welds under cyclic loading. *Engineering Structures*, 103, 63–71.
- Wang, D., Zhang, H., Gong, B., & Deng, C. (2016). Residual stress effects on fatigue behaviour of welded t-joint: A finite fracture mechanics approach. *Materials and Design*, 91, pp. 211–217.
- Abhishek, B. P., Anil Kumar, G., & Madhusudhan, T. (2015). Experimental and finite element analysis of thermally induced residual stresses for stainless steel 303 grade using Gmaw process. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 02 (02), 160-166.
- Se-Yun, H., Yooil, K. & Jang-Hyun, L. (2016). 3d finite element simulation of residual stresses in rails during the quenching process. *Journal of Materials Processing Technology*, 229, 349–360.
- Lee, C., Chiew, S. & Jiang, J. (2013). 3d residual stress modelling of welded high strength steel plate-to-plate joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 84, pp. 94–104.
- Fua, G., Lourenco, M., Duan, M., & Estefen, S. (2014) Effect of boundary conditions on residual stress and distortion in t-joint welds. *Journal of Constructional Steel Research*, 102, 121–135.
- Stiopin, P. A. (1976). *Resistencia de Materiales*. (6ta ed). Moscú: Mir.
- MatWeb, Your source for materials information. (2018). AISI 1015 Steel, as rolled. Recuperado de <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0f02241c8c6c4659ba637c63928d50ac>