

Tipo de artículo: Artículo original  
Temática: Soluciones informáticas  
Recibido: 15/05/2020 | Aceptado: 28/10/2020 | Publicado: 01/11/2020

## Simulación computacional de las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor del proceso de soldadura

### *Computational simulation of mechanical properties in the heat affected zone of the welding process*

Julio Pino Tarragó<sup>1\*</sup>, Willan Pablo Castillo Herrera<sup>2</sup>, Oscar Gabriel Toapanta Cunalata<sup>3</sup>, Julio Johnny Regalado Jalca<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Docente de la Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador. [julio.pino@unesum.edu.ec](mailto:julio.pino@unesum.edu.ec)

<sup>2</sup> Petroamazonas, Ecuador. [willan-castillo@hotmail.com](mailto:willan-castillo@hotmail.com)

<sup>3</sup> Instituto Superior Benjamín Araujo, Ecuador. [oscartoapantaambjlm@gmail.com](mailto:oscartoapantaambjlm@gmail.com)

<sup>4</sup> Docente de la Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador. [julio.regalado@unesum.edu.ec](mailto:julio.regalado@unesum.edu.ec)

\* Autor para correspondencia: [julio.pino@unesum.edu.ec](mailto:julio.pino@unesum.edu.ec)

---

#### Resumen

Durante un proceso de soldadura, se generan afectaciones de las propiedades mecánicas de la pieza en la zona con mayor incidencia de calor. Sin embargo, para garantizar alta precisión en el proceso de soldadura, es importante poder estimar el comportamiento de la zona afectada a partir de la variación de las propiedades mecánicas. La presente investigación realiza un estudio sobre el comportamiento de las propiedades mecánicas en la zona afectada por la soldadura mediante una simulación computacional. Se obtiene como resultado, las modificaciones de los precipitados endurecedores por efecto del ciclo térmico de soldadura.

**Palabras clave:** características mecánicas; soldadura; simulación computacional; zona afectada.

#### Abstract

*During a welding process, mechanical properties are affected in the heat affected zone. However, in order to guarantee high precision in the welding process, it is important to be able to estimate the behavior of the affected area from the variation of the mechanical properties. The present investigation carries out a study on the behavior of the mechanical properties in the zone affected by the welding by means of a computational simulation. The result is modifications of the hardening precipitates due to the effect of the welding thermal cycle.*

**Keywords:** mechanical characteristics; welding; computational simulation; affected zone.

## Introducción

Un elemento importante que garantizó la mecanización industrial lo representa el descubrimiento de la soldadura con electrodo recubierto SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). En un proceso de soldadura interviene el electrodo, el metal base, la escoria, la atmósfera de protección, el metal fundido del núcleo del electrodo y el depósito de soldadura o cordón de soldadura (López et al. 2018). La figura 1 muestra una representación del proceso.

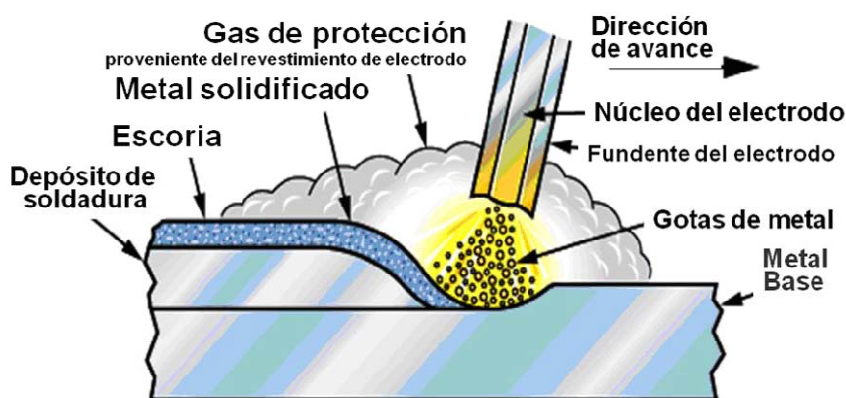


Figura 1: Representación de un proceso de soldadura.

Fuente: <http://www.itw-welding-spain.com/>

El proceso de soldadura genera residuos que se introducen en las regiones con mayor incidencia de calor. El proceso térmico generado pueden tener efectos perjudiciales (Guzmán Romero et al. 2017), tales como la reducción de la resistencia a la fatiga, corrosión bajo esfuerzos y agrietamiento inducido por el hidrógeno. En ambientes donde se desea obtener un proceso de soldadura eficiente es necesario estimar el impacto generado sobre las propiedades mecánicas en la zona afectada. Problemas de esta naturaleza han sido estimados mediante la aplicación de herramientas de modelación computacional para predecir el comportamiento de estructuras soldadas a partir de los resultados numéricos del esfuerzo residual y de la deformación (Torres 2002), (Reyes-Feria et al. 2019).

La calidad en un proceso de soldadura depende de la integridad de la junta, la ausencia de defectos, la microestructura y las pruebas mecánicas (Gutiérrez and Hernández 2018). La soldadura representa un problema multifísico que se describe a través del acoplamiento de diversas ecuaciones que se superponen en una frontera común (Andrade and Rico 2018).

La soldadura puede simularse como un problema matemático no lineal, en el cual las áreas de interés computacional cambian con el tiempo, las temperaturas y los esfuerzos en las regiones críticas. La naturaleza del problema modelado

permite que el análisis de simulación numérica se divida en varias etapas y cada una de ellas se subdivide en múltiples incrementos. La concepción del proceso de simulación numérica requiere utilizar incrementos para representar cambios rápidos (Fernández-Columbié et al. 2020), esta característica es una de las razones que hacen que la simulación numérica de soldadura consuma una gran cantidad de recursos computacionales (Batista-Suárez et al. 2018), (Esteves and Távora 2017).

La estimación de la distribución de temperaturas en un proceso de soldadura es fundamental para la realización de cualquier análisis relacionado con la predicción de esfuerzos residuales y distorsión del material base. Esta estimación también suele utilizarse en la predicción de la microestructura que se producirá por el efecto de la soldadura en el material (Arroba-Arroba et al. 2017), (Marzocca et al. 2018).

El historial térmico de soldadura es afectado por los fenómenos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación), masa y el flujo de la FZ. El campo térmico de soldadura ha sido analizado basado en tres enfoques de estudio fundamentalmente:

1. Análisis de conducción de calor.
2. Estudio de la interacción arco eléctrico-pileta de soldadura.
3. Análisis de fenómenos de transporte (transferencia de masa, energía y momento).

La presente investigación tiene como objetivo realizar un estudio sobre el comportamiento de las propiedades mecánicas en la zona afectada por la soldadura mediante una simulación computacional. Se realiza un proceso de modelación de la dinámica del proceso de soldadura; y posteriormente se realiza una simulación computacional donde se obtienen las modificaciones de los precipitados endurecedores por efecto del ciclo térmico de soldadura.

## Materiales y métodos

Para determinar la distribución de temperaturas en el proceso de soldadura y establecer una relación directa con el campo mecánico, se utiliza el Método de Elementos Finito (FEM) (López et al. 2016). El FEM semidiscretiza la ecuación de conducción de calor, lo cual proporciona la siguiente relación.

$$M\dot{H} = F_{\text{ext}} - F_{\text{int}} \quad (1)$$

Donde:

M: es la matriz de masa,

$\dot{H}$ : representa la aceleración,

F<sub>int</sub>: es el vector del flujo interno,

F<sub>ext</sub>: es el vector de la carga térmica.

Este conjunto se puede resolver en términos de entalpía o temperaturas, ya que se tiene la entalpía por unidad de masa.

$$H(T) = \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p(T) dt + \text{calor latente} \quad (2)$$

Donde:

$C_p$ : es el calor específico a presión constante.

La relación entre la entalpía y la temperatura conduce a una formulación basada en esta última.

$$C\dot{T} = F_{\text{ext}} - F_{\text{int}} \quad (3)$$

Donde:

C: es la matriz de capacidad de calor.

La discretización espacial que conduce a la ecuación (3) se basa en la interpolación de elementos finitos del campo térmico mediante.

$$T(x, y) = N(x)T(t) \quad (4)$$

Donde:

X: representa a las coordenadas actuales,

N(x): es la matriz de las funciones de interpolación,

T(t): es el vector de temperaturas del elemento.

La geometría y las variables mecánicas se establecen durante el primer paso de iteración. Por lo tanto, las coordenadas actuales, x, son las coordenadas al comienzo de un paso de tiempo (Quevedo-Mejías et al. 2020), (Zappa et al. 2020).

El gradiente del campo de temperatura es:

$$g = \nabla T = \nabla N(x)T(t) = B(x)T(t) \quad (5)$$

Donde:

B: tiene las primeras derivadas de las funciones de interpolación. La ecuación de Fourier para el flujo de calor interno es:

$$q_{\text{int}} = -\lambda g \quad (6)$$

Donde:

$\lambda$ : es una matriz de conductividad térmica.

Las matrices de elementos  $N$ ,  $B$  y  $\lambda$ , la densidad y el calor específico se utilizan para calcular las contribuciones de los elementos a la ecuación (3) obteniendo:

$$c = \int p c(T) N^T N dv \rightarrow C_T \quad (7)$$

Donde:

$v$ : es el volumen actual del elemento y es la matriz de conductividad del elemento dependiente de la temperatura.

El vector de carga  $F_{ext}$  puede tener contribuciones de elementos debido al calentamiento volumétrico así como al flujo de calor nodal o superficial.

Las condiciones de frontera dependientes de la temperatura, como la convección y radiación, también afectan a la matriz de conductividad. La discretización temporal a menudo se basa en el método del punto medio (Guerra-Álvarez et al. 2019; Reyes-Carcasés et al. 2018; Zappa et al. 2017). Su objetivo es cumplir el equilibrio energético en el momento donde:

$n$ : es el número de pasos de incremento de tiempo,

$n_i$ : es el tiempo al inicio del paso,

$\Delta t$ : es la duración del paso de tiempo actual y,

$\theta \in [0,1]$ : parámetro que determina dónde se satisface el equilibrio energético.

La estabilidad del método depende de que  $\theta \geq 0.5$ . El uso de  $\theta = 0.5$  da un paso de tiempo preciso de segundo orden, pero la solución puede mostrar oscilaciones.

## Resultados y discusión

Para esta investigación se realizó un proceso de soldadura con electrodo recubierto sobre láminas de 3 mm de espesor. Para la aleación AA 6261-T5, en posición 2G. La Tabla 1 muestra las propiedades mecánicas iniciales de los perfiles extruidos de esta aleación. La Tabla 2 muestra la composición química de los metales usados y la Tabla 3 las condiciones de soldadura empleadas durante la fabricación de la unión.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de AA 6261-T5.

$\sigma_t$ kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_y$ kg/mm <sup>2</sup>	% Elongación	Dureza
25.92	23.01	9.10	95

Tabla 2: Composición química de los metales base y de aporte.

Aleación	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Fe

AA6261	0.56	0.18	0.25	0.85	0.01	0.04	0.02	0.38
ER5356	0.26	0.10	0.12	5.00	0.12	0.10	0.13	0.40

El ensayo de microdureza se realizó mediante un barrido a través de las distintas zonas de la unión soldada tomando como punto de referencia la línea de fusión. Se utilizó un microdurómetro Vickers con carga de 80 gramos durante 40 segundos.

Las pruebas de tensión se realizaron sobre probetas soldadas transversales a las placas soldadas, según la especificación (Association State Highway and Transportation Officials Standard) ASHTO E8 con dos repeticiones.

Tabla 3: Variables de soldadura.

Corriente, Amp	Voltaje, Vol	Velocidad de soldadura, mm/min	Calor aportado, J/mm
147	19	746.97	224.34
154	21	808.41	240.02

La figura 2 muestra el perfil de microdureza obtenido a nivel experimental para la unión soldada de AA 6261-T5. Se identifica el punto de mínima dureza a una distancia de 3.5 mm desde la línea de fusión. Esta zona corresponde con la ubicación de la falla durante el ensayo de tensión para todas aquellas uniones que presentan una falla en la ZAC.

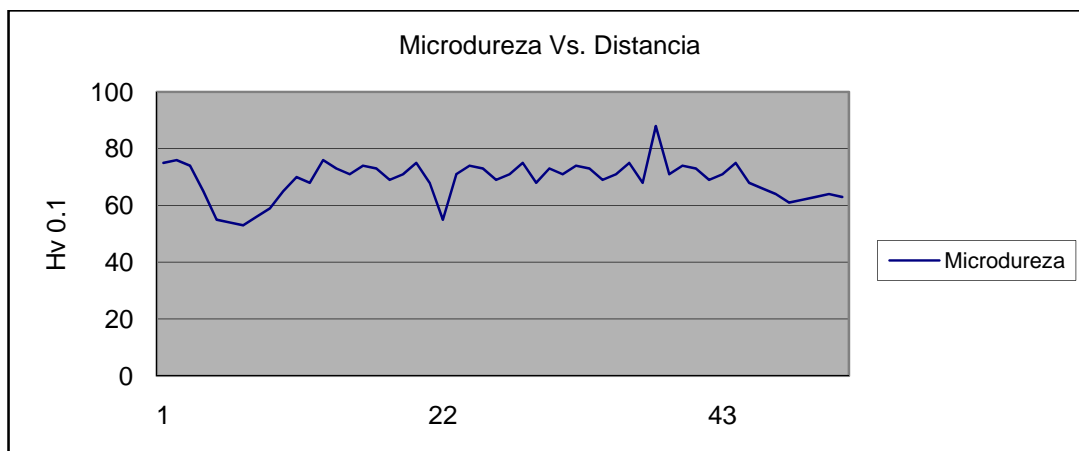


Figura 2: Perfil de microdureza típico de la unión soldada de AA6261-T5

La tabla 4, muestra los resultados de resistencia a la tensión de la unión soldada, en función del aporte de calor. Por ejemplo, un aporte de calor de 220.60 J/mm causa una pérdida de 13.42% en la resistencia a la tensión respecto al metal base sin soldar; mientras que con un aporte de calor de 210.15 J/mm se obtiene una pérdida del 14.58% en la resistencia a la tensión. En general, una disminución del 5.25% en el calor aportado reduce la pérdida de propiedades mecánicas en un ~20%.

Tabla 4: Propiedades mecánica de la unión 2 G

Unión	No	$\sigma_t, 2 \text{ kg/mm}$	Pérdida de la resistencia, %	% Elongación
2G-2	1	22.60	13.42	3.01
	2	21.15	14.58	3.45
2G-3	1	18.07	26.56	2.34
	2	15.10	35.10	2.29

En este trabajo el análisis se enfocó en la identificación de los precipitados existentes en la región de mínima dureza comprendida entre 3 y 5 mm desde la línea de fusión.

### Conclusiones

El punto de mínima dureza se encontró a 3.8 mm de la línea de fusión y corresponde con la ubicación de la falla para todas aquellas uniones que presentaron la falla en la ZAC. La falla que presentaron las uniones soldadas en el ensayo de tensión es de tipo dúctil pero con muy poca deformación plástica.

El calor aportado durante el proceso de soldadura tiene un efecto sensible sobre las propiedades mecánicas y las características microestructurales principalmente en la ZAC; se evidencian pérdidas de hasta el 35.10% en la resistencia a la tensión.

### Referencias

- ANDRADE, J. AND I. RICO Evaluación de una soldadura por electropunto en láminas de acero AISI 1015 galvanizado por inmersión en caliente. Universidad Ciencia y Tecnología, 2018, 22(87).
- ARROBA-ARROBA, C., W. VACA-ORTEGA, F. PEÑA-JORDÁN, D. NÚÑEZ-NÚÑEZ, et al. Influencia de los parámetros del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) en las propiedades mecánicas en la junta de aluminio 6061. Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, 2017, (18), 47-52.
- BATISTA-SUÁREZ, Y., T. H. FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, I. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ AND S. LEYVA-LEGRÁ Transformaciones microestructurales en uniones soldadas de fundición nodular obtenidas por soldadura manual con electrodos austeníticos. Minería y Geología, 2018, 34(4), 470-484.
- ESTEVEZ, M. AND S. TÁVARA Mecanismos de corrosión en cordones de soldadura del acero api 5x1-70 del Proyecto Camisea. Revista Ciencia y Tecnología, 2017, 12(2), 91-104.

- FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T. H., M. GÓMEZ-FERNÁNDEZ, M. LAMORÚ-URGELLÉS, W. ROMERO-GÓNGORA, et al. Transformaciones microestructurales por efecto del calor en una unión disímil de acero 17-4 PH y Hastelloy C-276. *Minería y Geología*, 2020, 36(1), 81-91.
- GUERRA-ÁLVAREZ, J., J. A. POZO-MOREJÓN, A. CRUZ-CRESPO AND J. V. MIGUEL-ORIA Comportamiento de la dureza en la zona afectada térmicamente durante soldadura de acero aisi 4130 endurecido mediante tratamiento térmico. *Centro Azúcar*, 2019, 46(1), 10-17.
- GUTIÉRREZ, R. AND J. HERNÁNDEZ Caracterización Microestructural de la Soldadura MIG en Láminas de Acero AISI 1015 Galvanizado. *Acta Microscopica*, 2018, 27(1), 16-22.
- GUZMÁN ROMERO, E. E., T. H. FERNÁNDEZ COLUMBIÉ, D. ALCÁNTARA BORGES AND I. RODRÍGUEZ GONZÁLEZ Efecto de la velocidad angular y la presión en el proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754. *Minería y Geología*, 2017, 33(3), 311-323.
- LÓPEZ, D. F. A., R. C. PEREIRA, Y. A. CASTRO, H. SÁNCHEZ, et al. Desarrollo de un método de simulación física de zonas térmicamente afectadas en soldaduras de acero, para estudios de propagación de grietas por fatiga. *Facultad de Ingeniería*, 2016, 25(42), 33-54.
- LÓPEZ, J. M. S., F. I. L. MONROY, A. S. HERNÁNDEZ, J. L. O. ELIZARRARÁS, et al. Evaluación de soldadura industrial de pernos empleando análisis microestructural. *Revista NTHE*, 2018, 20, 1-7.
- MARZOCCA, A. L., F. SOLDERA, M. ZALAZAR AND M. I. LUPPO Estudio de la microestructura de un cordón de soldadura de un acero P91 mediante microscopía electrónica de transmisión. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 2018, 23(2).
- QUEVEDO-MEJÍAS, R., T. FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, L. TORRES-SUÁREZ AND N. DURÁN-BATISTA Soldadura disímil por rotación continua entre una plancha de acero inoxidable y una barra de AISI 1045. *Ciencia & Futuro*, 2020, 10(1), 50-61.
- REYES-CARCASÉS, D., T. FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, D. ALCÁNTARA-BORGES AND I. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ Soldadura con los electrodos revestidos E 6010 y E 7018 en acero AISI 1025. *Minería y Geología*, 2018, 34(1), 112-125.
- REYES-FERIA, W., T. FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, L. HERNÁNDEZ-DORADO, M. UTRIA-JIMÉNEZ, et al. Incidencia de los parámetros del proceso de soldadura por fricción agitación en una aleación de aluminio. *Ciencia & Futuro*, 2019, 9(3), 63-80.
- TORRES, J. Evolución microestructural de la aleación de aluminio 6061 durante el proceso de soldadura MIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 2002, (12), 52-65.



- ZAPPA, S., J. MARTINEZ AND H. SVOBODA Efecto del calor aportado y la cantidad de capas sobre la evolución microestructural en recargues de acero inoxidable dúplex. *Soldagem & Inspeção*, 2020, 25.
- ZAPPA, S., M. ZALAZAR AND E. SURIAN Efecto de la composición química del metal de aporte y del calor aportado sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aceros inoxidables dúplex. *Soldagem & inspeção*, 2017, 22(2), 116-128.