

# Análisis numérico de la influencia de los puntos de soldadura sobre la deformación angular a través del método de elementos finitos

## Numerical analyses of the influence of tack welding on angular deformation using the finite element method

Eric Caballero<sup>1</sup>, Juan Blandón<sup>1</sup>, Héctor Ruíz<sup>2, 3, 4\*</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá

<sup>2</sup> Centro de Investigación e Innovación, Educación, Ciencia y Tecnología - AIP (CiIECYT-AIP), Ciudad de Panamá, Panamá

<sup>3</sup> Escuela de Tecnología Industrial, Instituto Técnico Superior Especializado (ITSE), Ciudad de Panamá, Panamá

<sup>4</sup> Sistema Nacional de Investigación (SNI), Panamá

\*Autor de correspondencia: [hruiz@ciiecyt.org.pa](mailto:hruiz@ciiecyt.org.pa)

**RESUMEN.** La soldadura es un proceso fundamental en la fabricación de estructuras en diversos campos ingenieriles, sin embargo, las imperfecciones causadas por el proceso pueden comprometer la integridad estructural y vida útil de las piezas. Durante la fabricación de estructuras por medio de soldadura, se aplican puntos de soldadura para evitar la sobre restricción de las estructuras, sin embargo, la falta de estándares para este proceso podría causar un incremento en la deformación angular. Este estudio se centra en investigar el efecto de los puntos de soldadura sobre las juntas T. Mediante un Análisis Termo-Elasto-Plástico (TEPA) a través del Método de Elementos Finitos (FEM), se simula el proceso de soldadura por arco eléctrico de electrodo revestido (SMAW) aplicado en los refuerzos estructurales de acero S355J2 utilizados en la proa y popa de una embarcación menor de acero, para ello, se consideran diferentes dimensiones y secuencias de puntos de soldadura. Por otro lado, se realiza un análisis paramétrico sobre la dimensión del elemento finito en la zona afectada por el calor, para determinar un modelo óptimo para este estudio. Los resultados muestran que la deformación angular, considerando las dimensiones y secuencias de puntos de soldadura recomendados, incrementa en un 8% comparado con el modelo que no considera puntos de soldadura. Basados en los resultados, se recomiendan dimensiones y secuencias de puntos de soldadura que se pueden aplicar en campo, que podrían mitigar la deformación angular sobre los refuerzos estructurales.

**Palabras clave.** *Análisis termo-elasto-plástico, Deformación angular, Puntos de soldadura, Secuencias de puntos de soldadura, Método de elementos finitos.*

**ABSTRACT.** Welding is a fundamental process in the fabrication of structures in various engineering fields. However, imperfections caused by the process can compromise the structural integrity and service life of the components. During the fabrications of structures by welding, tacks welds are applied to avoid over-constraint of the structures. However, the lack of standards for this process could cause an increase in angular deformation. This study focuses on investigating the effect of tack welding on structural stiffeners. A Thermo-Elasto-Plastic Analysis (TEPA) using the Finite Element Method (FEM) is employed to simulate the shielded metal arc welding process applied on S355J2 steel structural stiffeners used in the bow and stern of small steel ships, for which different dimensions and sequences of tack welding are considered. On the other hand, a parametric analysis of the finite element size in the heat-affected zone (HAZ) is carry out, to determine an optimal model for this study. The results show that the angular deformation, considering the recommended dimensions and sequences of tack welds, increases by 8% compared to the model that does not consider tack welds. Based on the results, dimensions and sequences of tack weld are recommended that can be applied in the field, which could mitigate the angular deformation on the structural stiffeners.

**Keywords.** *Thermo-elasto-plastic analysis, Angular deformation, Tack welding, Sequence of tack welding, Finite element method.*

**Citación:** E. Caballero, J. Blandón y H. Ruiz, "Análisis numérico de la influencia de los puntos de soldadura sobre la deformación angular a través del método de elementos finitos", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 21, no. 1, pp. (0), 2025.

**Tipo de artículo:** Original. **Recibido:** 29 de octubre de 2024. **Recibido con correcciones:** 31 de marzo de 2025. **Aceptado:** 8 de mayo de 2025.

**DOI:**

**Copyright:** 2025 E. Caballero, J. Blandón y H. Ruiz. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

## 1. Introducción

Los puntos de soldadura son pases de soldadura cortos realizados antes de aplicar las líneas de soldadura, tienen como fin sujetar las placas sin ningún tipo de soporte extra, en la mayoría de los casos los puntos de soldadura son aplicados utilizando las mismas condiciones de soldadura y material de aporte que se utilizará durante todo el proceso [1]. Al tratarse de un proceso previo a la soldadura, estos puntos de soldadura representan una carga térmica sobre las placas induciendo imperfecciones inherentes del proceso de soldadura, como la deformación angular, esfuerzos residuales en tensión, debilitamiento de la dureza del material y grieta [2].

A lo largo del tiempo diversos investigadores han realizado estudios sobre la influencia de los puntos de soldadura sobre la deformación angular en diferentes tipos de uniones. En el estudio realizado por Jonsson, a través de simulaciones numéricas y experimentos, analiza la influencia de los puntos de soldadura sobre la abertura inicial en una unión a tope de dos placas planas, donde describe que la secuencia de los puntos de soldadura influye sobre la abertura inicial de las placas, generando esfuerzos en tensión y compresión sobre los puntos de soldadura, por lo tanto, recomienda secuencias para reducir estos esfuerzos [2]. Shibahara, a través del Método de Elementos Finitos (FEM) analiza la influencia de los puntos de soldadura y la abertura inicial en la deformación angular de uniones a tope de grandes placas planas, que se utilizan en la construcción de navíos, determinando que una incorrecta distribución de los puntos de soldadura puede provocar grietas en el cordón de soldadura [3]. Heinze, investigó el efecto de los puntos de soldadura en uniones a tope a través de FEM y validación experimental, concluyendo que los puntos de soldadura causan aproximadamente 23% más deformación al ser comparado con juntas que no consideran puntos de soldadura [4]. Por otro lado, Abid M. evaluó a través de FEM el efecto de los puntos de soldadura en la deformación angular y esfuerzos residuales en una junta tipo brida-tubo, donde recomienda las posiciones angulares en la que debe realizarse los puntos de soldadura [5], [6]. Camilleri, en su estudio propone optimizar la aplicación de puntos de soldadura previo a la soldadura por costura o en roldanas [7]. Estos estudios demuestran que los puntos de soldadura influyen sobre la abertura inicial, grietas y deformación angular en diferentes tipos de uniones, recomendando secuencias de puntos de soldadura para las estructuras analizadas, considerando el proceso de soldadura gas de metal (GMAW).

Recientemente, Tomkow, analiza la influencia de la distribución de los puntos de soldadura sobre juntas T a través de ensayos experimentales, donde señala que la cantidad y distribución de los puntos de soldadura tienen un impacto significativo en la deformación angular [8]. En cambio, Chowdbury S, considera el proceso de soldadura de haz de electrones, a través de análisis numéricos y ensayos experimentales, analiza la deformación angular en modelos que consideran puntos de soldadura, registrando un decremento de la deformación angular del 22% en los modelos que no considera puntos de soldadura [9]. Además, Moslemi, indica que los puntos de soldadura son necesario, sin embargo, registra un incremento en los esfuerzos residuales en tensión en las zonas de los puntos de soldadura [10].

Con el objetivo de optimizar el proceso de puntos de soldadura para minimizar el incremento de la deformación angular, previamente reportado. En este estudio, se realizan diversas simulaciones de una junta T, utilizada como refuerzo estructural en embarcaciones menores de acero en la zona de proa y popa, centrándose en el efecto de las dimensiones y secuencias de los puntos de soldadura, considerando el proceso de soldadura de electrodo revestido (SMAW). Mediante un Análisis Termo-Elasto-Plástico (TEPA) a través de FEM, que ha demostrado su efectividad para la predicción de imperfecciones causadas por el proceso de soldadura, [11], [12], [13], [14].

## 2. Materiales y Métodos

En este estudio, se evalúan diferentes dimensiones y secuencias de puntos de soldadura para determinar su impacto en la deformación angular de una junta T. A través de simulaciones aplicando un acoplado TEPA mediante FEM para mitigar la deformación angular producida en este tipo de juntas.

### 2.1 Análisis termo-elasto-plástico

Para evaluar el comportamiento termo-mecánico y predecir la deformación angular producida por los puntos de soldadura, se realizará un acoplado TEPA utilizando FEM, para ello, se utiliza el programa comercial Simufact Welding [15], debido a que, es un programa de simulación de alta precisión, calibrado con datos experimentales en estudios anteriores [16]. El análisis consiste en realizar un análisis térmico, regido por las ecuaciones de distribución de calor, ecuación (1) y Rosenthal, ecuación (2) que propone una solución para determinar la distribución de temperatura en la zona

afectada por el calor (HAZ), [17], [18]. Al mismo tiempo, se realiza un análisis mecánico, donde se calculan las deformaciones, así como otras imperfecciones mecánicas producto de la carga térmica aplicada [19]. Estas ecuaciones se encuentran integradas en la estructura matemática del programa comercial Simufact Welding [15].

$$kT_{ij} = \rho C_p \dot{T} + \dot{r} \quad (1)$$

Donde

- “T” es la temperatura
- “k” es la conductividad térmica
- “ρ” es la densidad
- “C<sub>p</sub>” es la capacidad calorífica
- “r” es la tasa de generación de calor.

$$T - T_0 = \frac{q/v}{2\pi\lambda t} e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}} \quad (2)$$

Donde

- “T” y “T<sub>0</sub>” es temperatura y temperatura inicial (°C).
- “q/v” calor de entrada (J/m).
- “λ” Conductividad térmica (J/s m °C)
- “t” tiempo en (s).
- “r” es la distancia lateral desde la fuente de calor en (m)
- “α” difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)

El calor generado por la fuente de calor para el tipo de soldadura de arco eléctrico está determinado por la ecuación (3), que se utiliza para calcular el calor de entrada de los procesos por arco eléctrico [20].

$$\frac{q}{v} = \frac{E \cdot I \cdot \eta}{v} \quad (3)$$

Donde

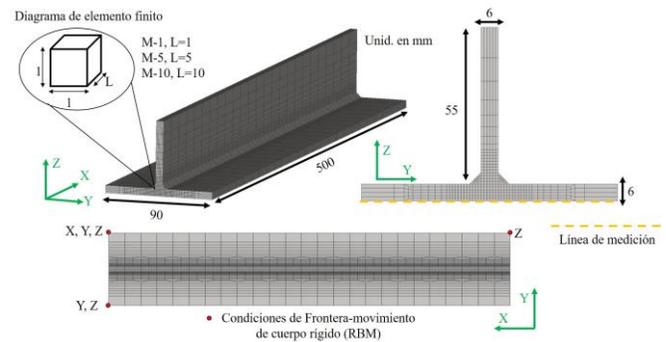
- “E” voltaje (V)
- “I” amperaje (A)
- “η” eficiencia
- “v” velocidad (mm/s)

La deformación inherente es una deformación irreversible causada por el proceso de soldadura, y es la principal causante de la deformación angular y el encogimiento tanto en la sección longitudinal, como transversal. En la ecuación (4) define la deformación inherente ε\*, siendo la diferencia entre la deformación total ε y la deformación elástica ε<sup>e</sup>. a su vez, la deformación inherente es la sumatoria de la deformación plástica ε<sup>P</sup>, deformación térmica ε<sup>T</sup>, deformación por fluencia ε<sup>c</sup> y deformación debido a la transformación de fases ε<sup>Tr</sup>. [21].

$$\varepsilon^* = \varepsilon - \varepsilon^e = \varepsilon^P + \varepsilon^T + \varepsilon^c + \varepsilon^{Tr} \quad (4)$$

## 2.2 Modelo de elementos finitos.

El modelo de estudio es creado utilizando el software comercial Patran [22], ver **figura 1**, el material de la junta T es acero S355J2, es un acero bajo en carbono con alta resistencia a la tracción utilizado en diversas áreas de la ingeniería, cuyas propiedades son obtenidas de la base de datos del programa comercial Simufact welding [15], [23]. La junta es restringida en tres nodos ubicados en las esquinas de la placa horizontal para impedir el movimiento de cuerpo rígido, como se observa en la **figura 1**.



**Figura 1.** Modelo de elementos finitos y condiciones de frontera.

Se realiza un estudio de sensibilidad para evaluar el efecto del tamaño de elemento en los resultados, considerando elementos hexaédricos. Se generan tres mallas con diferentes tamaños de elemento en la dirección de la soldadura: 1 mm (M-1), 5 mm (M-5) y 10 mm (M-10), como se observa en la **figura 1**, las dimensiones de los modelos son basadas en la recomendaciones de mallado del programa comercial Simufact Welding [15], la cual recomienda una relación de aspecto máxima de 1:10 mm entre el alto y largo del elemento. Donde se evaluará los resultados térmicos y

mecánicos, considerando el tiempo de simulación de cada modelo, para la selección del tamaño óptimo del elemento en la zona afectada por el calor (ZAC).

### 2.3 Análisis de soldadura

La soldadura por arco eléctrico de electrodo revestido (SMAW) es considerada en este estudio, debido a que es un proceso comúnmente utilizado por su bajo coste, flexibilidad, portabilidad y versatilidad [24]. En este estudio se analiza la influencia de las dimensiones de punto de soldadura, secuencia de puntos de soldadura y líneas de soldadura sobre la deformación angular. La condición de soldadura utilizada se muestra en la **tabla 1**, esta condición es utilizada en campo y presenta una similitud del 92% en el calor de entrada a la utilizada en [25], donde se utiliza el proceso de soldadura por gas y metal (GMAW) en una placa de 6 mm. el modelo de fuente de calor utilizado es doble elipsoide de Goldak, en la **tabla 2**, se observan las dimensiones de la fuente de calor [26].

Las mediciones de temperatura y deformación angular son evaluadas en el centro de la placa evitando el efecto borde donde las deformaciones y temperaturas no son uniformes con respecto al centro de la estructura. [27].

**Tabla 1.** Condiciones de soldadura

Condiciones de soldadura	
Corriente (A)	90
Voltaje (V)	23.6
Velocidad (mm/s)	2.2
Eficiencia (%)	80

**Tabla 2.** Dimensiones de la fuente de calor.

	Utilizados para puntos de soldadura (mm)	Utilizados en las líneas de soldadura (mm)
Af	2.0	1.5
Ar	6.0	3.0
b	3.0	4.0
d	3.0	4.0

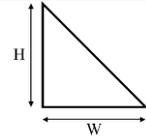
#### 2.3.1. Análisis de dimensiones de punto de soldadura

Se proponen dos tamaños de filete con tres longitudes para el punto de soldadura, ver **tabla 3**. Estas medidas

son obtenidas de acuerdo al proceso observado en campo, basadas en las recomendaciones de las sociedades clasificadoras y el estudio realizado por Murakawa [28], [29]. Donde se seleccionarán aquellas dimensiones de puntos de soldadura que presenten una adecuada penetración de calor, así como, un comportamiento uniforme y menor magnitud de deformación angular.

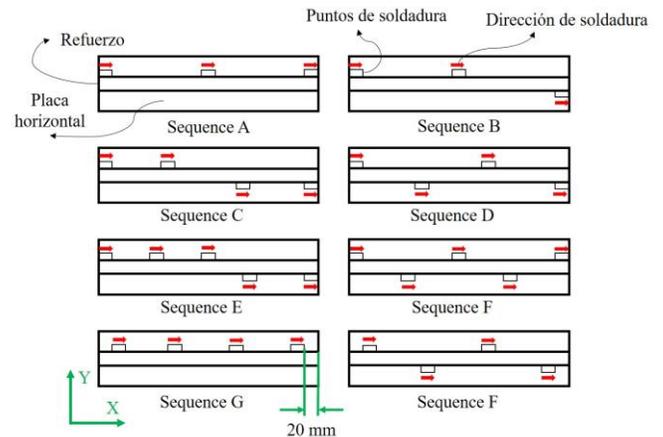
**Tabla 3.** Dimensiones de filete de soldadura de los puntos de soldadura

Ancho y altura (HxW) (mm)	2x2		3x3	
Longitud (mm)	10	20	30	



#### 2.3.2. Secuencia de puntos de soldadura

Una vez seleccionado las dimensiones de puntos de soldadura, se analiza la influencia de las secuencias de puntos de soldadura sobre la deformación angular. La **figura 2** muestra las diferentes secuencias de puntos de soldadura propuestas en base al análisis realizado por Tomków [8] y las recomendaciones de [30], que señala un espacio de 20 mm entre el borde de la placa y el punto de soldadura. En esta sección se evaluará el comportamiento y magnitud de deformación angular causado por las diferentes secuencias propuestas.



**Figura 2.** Secuencia de puntos de soldadura.

#### 2.3.3. Análisis de líneas de soldadura

Se simula una línea de soldadura continua sobre los puntos de soldadura, para evaluar la influencia en la deformación angular. Como se observa en la **figura 3**, la línea de soldadura continua son las recomendadas para la

fabricación de refuerzos estructural ubicados en la proa y popa [29].



Figura 3. Líneas de soldadura continua.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Modelo de elementos finitos

Los resultados del análisis de la sensibilidad del mallado muestran que el tamaño del elemento influye principalmente en la precisión de la predicción de la temperatura en el HAZ, como se observa en la figura 4, las temperaturas alcanzadas con los modelos M-1 y M-5 son similares a las registradas por [31]. Mientras, con el modelo M-10 no se obtiene penetración. Por otro lado, los resultados mecánicos al ser comparados con el modelo M-1 (mayor densidad) se obtiene una diferencia del 4% con M-5 y 9% con M-10.

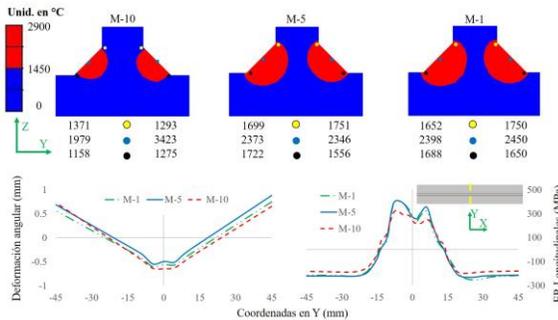


Figura 4. Resultados térmicos y mecánicos

La diferencia en los resultados se debe a la densidad del mallado, ya que esta se relaciona con la densidad de calor, debido a que las dimensiones de la fuente de calor son dependientes a las dimensiones del mallado. Por lo tanto, con un mallado más denso se obtienen resultados más precisos, coincidiendo con lo encontrado por [32].

Considerando los resultados termo-mecánicos y el tiempo computacional, para este estudio se utilizará el modelo M-5, debido al tiempo computacional menor y a la similitud de los resultados con respecto a M-1, con una diferencia del 4%.

#### 3.2 Análisis de dimensiones de puntos de soldadura

Se evalúa el efecto de las dimensiones de los puntos de soldadura en la deformación angular. La longitud del

punto de soldadura tiene una mayor influencia en la deformación angular que el tamaño del filete, como se observa en la figura 5. Las diferencias entre las dimensiones de punto de soldadura pueden ser observadas en la tabla 4, mientras que la diferencia entre diferentes longitudes se observa en la tabla 5.

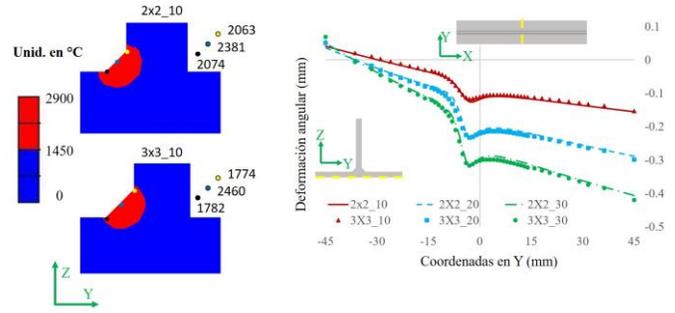


Figura 5. Resultados térmicos y mecánicos-dimensiones de puntos de soldadura.

Tabla 4. Diferencia entre el pie de soldadura y longitud semejante

Dimensión (mm)		Dif. %-pie de soldadura
2x2_10	3x3_10	1.33
2x2_20	3x3_20	1.34
2x2_30	3x3_30	0.87

Tabla 5. Diferencia entre longitudes con pie de soldadura semejante

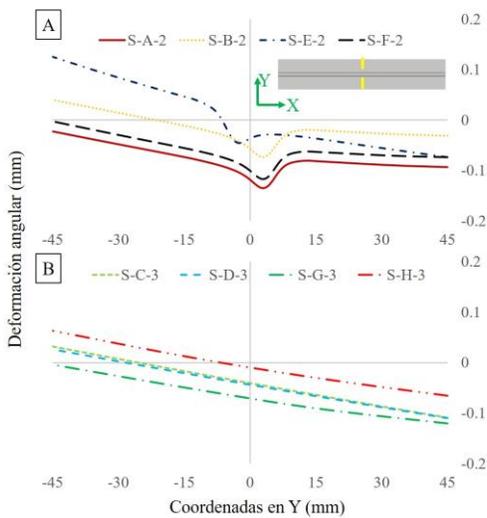
Dim. (mm)	Dif. %-longitud de PS	
2x2_10	2x2_20	2x2_30
	56.41 %	119.86 %
Dim. (mm)	3x3_20	3x3_30
3x3_10	60.65 %	124.75 %

La diferencia en la deformación angular registrada por las distintas dimensiones del pie de soldadura es de aproximadamente 1%, por lo tanto, es despreciable.

Sin embargo, al comparar la longitud del punto de soldadura (tabla 5) se puede observar un incremento en la deformación angular, esto se debe a que, con una longitud mayor, la pieza se expone durante más tiempo al calor, incrementando la deformación angular. Por lo cual, las dimensiones de 2x2 y 3x3 mm con longitud de 10 mm son consideradas para la siguiente etapa.

### 3.3 Secuencia de puntos de soldadura

Se analiza las secuencias de puntos de soldadura presentadas en la **figura 2**, registrando diferentes comportamientos de la deformación angular dependiendo de la secuencia, por otro lado, la diferencia en el comportamiento de la deformación angular entre las dimensiones de punto de soldadura es similares en la mayoría de los casos como se presenta en la **tabla 6**. Como se puede observar en la **figura 6**, el comportamiento de la deformación angular tiene una relación directa con la secuencia de los puntos de soldadura.



**Figura 6.** Deformación angular de secuencia de puntos soldadura. A) Filete 2x2. B) Filete 3x3.

Las secuencias A, B y F presentan menor deformación angular, en comparación con la secuencia E, que registró un aumento, debido a la cantidad y distribución de los puntos de soldadura, se calienta la junta de forma no uniforme durante su aplicación, aumentando el diferencial de temperatura en la superficie superior, influyendo en el incremento y comportamiento de la deformación angular.

A pesar de que la secuencia E tiene la misma cantidad de puntos de soldadura que la secuencia F, su distribución uniforme, genera menor diferencial de temperatura, mitigando la deformación angular.

**Tabla 6.** Diferencia de la deformación angular de las secuencias de puntos de soldadura

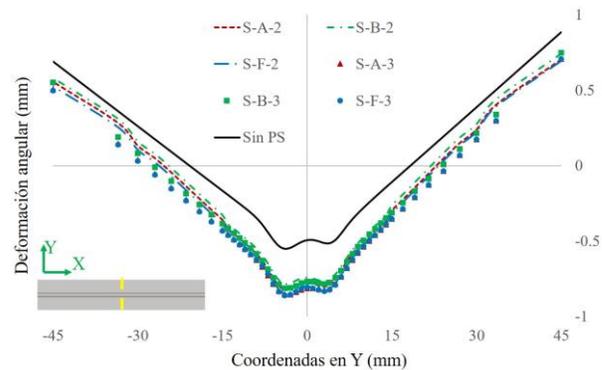
	$\theta$ total (2x2)	$\theta$ total (3x3)	Dif. %
S-A	0.122	0.121	-0.820
S-B	0.121	0.119	-1.653

S-C	0.169	0.180	6.509
S-D	0.166	0.173	4.217
S-E	0.218	0.245	12.385
S-F	0.124	0.122	-1.613
S-G	0.139	0.146	5.036
S-H	0.157	0.164	4.459

Por lo tanto, para la siguiente etapa se seleccionan las secuencias A, B y F, debido a su comportamiento y baja deformación angular con ambas dimensiones de punto de soldadura.

### 3.4 Líneas de soldadura continua

En el análisis de líneas de soldadura continua, se obtiene que los puntos de soldadura generan un incremento en la deformación angular, al compararse con un modelo que no los considera, como se observa en la **figura 7**. Este incremento en la deformación angular se alinea con lo encontrado por [4], que analiza el efecto de los puntos de soldadura sobre placas planas.



**Figura 7.** Deformación angular-Líneas de soldadura continuo.

La deformación angular causada por las secuencias de puntos de soldadura con dimensión de 2x2\_10 mm registra un aproximado del 13% de incremento al ser comparada con el modelo que no considera puntos de soldadura, mientras que las secuencias con dimensión 3x3\_10 mm registra un aproximado del 8% de incremento, como se puede observar en la **tabla 7**. La diferencia entre los modelos que consideran puntos de soldadura se debe a que el calor de entrada (772.36 J/mm) tiene mayor influencia sobre el filete de menor tamaño, debido a que presenta mayor gradiente de temperatura entre la superficie superior e inferior, causando un incremento en la deformación angular.

**Tabla 7.** Diferencia de la deformación angular comparada con Sin PS

	Deformación ( $\theta$ )	Dif. %
S-A-2	3.98	12.49
S-B-2	3.99	12.57
S-F-2	3.99	12.80
S-A-3	3.81	7.66
S-B-3	3.81	7.76
S-F-3	3.79	7.03
Sin PS	3.54	-

Por lo anterior, las secuencias A y B presentan menor deformación angular, aplicando menor punto de soldadura (PS), por lo tanto, se propone la ecuación (5) para determinar la cantidad de puntos de soldadura y la ecuación (6) para definir el espaciamiento entre cada punto, dependiendo de la longitud de la placa.

$$Z = x * s \quad (5)$$

Donde

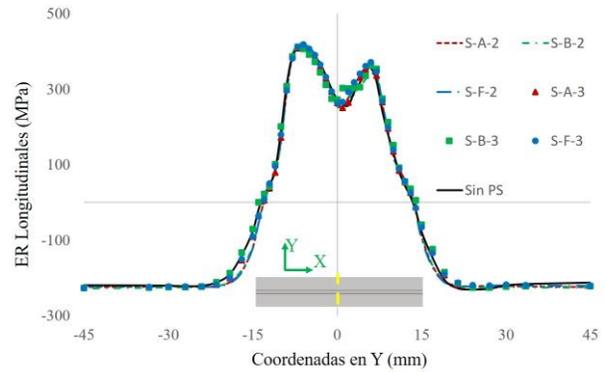
- "Z" cantidad de PS
- "x" longitud de la placa (mm)
- "s" constante propuesta  $6E^{-3}$

$$a = \frac{x-Z(y)}{Z-1} \quad (6)$$

Donde

- "a" distancia entre PS (mm)
- "y" longitud de los PS (mm)

Por otro lado, los puntos de soldadura no generan un incremento en los esfuerzos residuales longitudinales, como se observa en la **figura 8**. Este comportamiento es debido a que los esfuerzos residuales inducidos por las líneas de soldadura continua se sobreponen a los esfuerzos residuales inducidos por las secuencias de puntos de soldadura. Resultando en una similitud en magnitud y comportamiento.



**Figura 8.** Esfuerzos residuales longitudinales-Líneas de soldadura continuo.

## 4. Conclusiones

El presente estudio ha demostrado a través de análisis numéricos la influencia de los puntos de soldadura en la deformación angular de una junta T utilizada como refuerzo estructural.

Se determina que un tamaño de elemento de  $1 \times 1 \times 5$  mm es óptimo para obtener resultados precisos en un tiempo computacional razonable. Obteniendo una diferencia del 4% con respecto al modelo M-1, con tamaño de  $1 \times 1 \times 1$  mm.

La longitud de los puntos de soldadura tiene mayor impacto en la deformación angular que el tamaño del filete. Por otro lado, la distribución de los puntos de soldadura también influye en la deformación angular. Las secuencias simétricas, como la secuencia A y B, tienden a generar menor deformación angular, coincidiendo con lo encontrado por [8].

Los puntos de soldadura con dimensión de filete  $3 \times 3$  generan un 5% menos deformación angular al compararse con los puntos de soldadura de  $2 \times 2$  y 8% más deformación angular al compararse con el modelo que no considera puntos de soldadura. Por consiguiente, se recomiendan un tamaño de punto de soldadura de  $3 \times 3_{10}$  mm y las secuencias A y B, debido a que generan menos deformación angular. Basadas en las secuencias y dimensiones de puntos de soldadura propuestas, pueden aplicarse en proceso industriales, ya que, se propone la ecuación (5) y ecuación (6) que determinan la cantidad y espaciado de los puntos de soldadura dependiendo de la longitud de las placas, respectivamente.

Para trabajos futuros, se recomienda la validación de los resultados mediante ensayos experimentales y

realizar el análisis aplicando otras condiciones de soldadura, considerando la variación de velocidad, utilizando material base diferente.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) bajo la convocatoria pública de nuevos investigadores 2023 con código de proyecto (APY-NI-2023A-50).

Al Centro de Investigación e Innovación Educativa, Ciencia y Tecnología (CIIECYT-AIP) por el espacio para realizar este estudio.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

## CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

**EC** investigación, visualización y redacción-borrador original. 100%

**HR** Investigación, Metodología, Administrador de proyecto y Supervisión. 100%

**JB** Redacción-revisión, Edición y Supervisión. 85%

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] E. M. Qureshi, A. M. Malik, y N. U. Dar, «Residual stress fields due to varying tack welds orientation in circumferentially welded thin-walled cylinders», *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 2009, pp. 1-9, ago. 2009, doi: 10.1155/2009/351369.
- [2] M. Jonsson, L. Karlsson And, y L.-E. Lindgren, «Simulation of Tack Welding Procedures in Butt Joint Welding of Plates», *Welding Research Supplement*, pp. 296-302, oct. 1985, Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?dswid=9736&pid=diva2%3A985657>
- [3] M. Shibahara, D. Deng, H. Serizawa, y H. Murakawa, «Finite Element Method for Hot Cracking Using Interface Element-Analysis for Predicting Deformation and End Cracking During Butt Welding Considering Root Gap and Tack Welds», *J. Kansai Soc*, pp. 237-245, mar. 2002, [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/270905485>
- [4] C. Heinze, C. Schwenk, y M. Rethmeier, «The effect of tack welding on numerically calculated welding-induced distortion», *J Mater Process Technol*, vol. 212, n.º 1, pp. 308-314, ene. 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.09.016.
- [5] M. Abid y M. Siddique, «Finite-element simulation of tack welds in girth welding of a pipe-flange joint», *Acta Mech*, vol. 178, n.º 1-2, pp. 53-64, ago. 2005, doi: 10.1007/s00707-005-0241-3.
- [6] M. Abid y M. Siddique, «Numerical simulation to study the effect of tack welds and root gap on welding deformations and residual stresses of a pipe-flange joint», *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 82, n.º 11, pp. 860-871, nov. 2005, doi: 10.1016/j.ijpvp.2005.06.008.
- [7] D. Camilleri, T. G. F. Gray, y N. McPherson, «Optimizing Tack Welding Fabrication Procedures Using Numerical Finite Element Models», *Journal of Ship Production and Design*, vol. 26, n.º 02, pp. 117-134, may 2010, doi: 10.5957/jspd.2010.26.2.117.
- [8] J. Tomków, K. Sobota, y S. Krajewski, «Influence of tack welds distribution and welding sequence on the angular distortion of tig welded joint», *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, vol. 18, n.º 4, pp. 611-621, 2020, doi: 10.22190/FUME200520044T.
- [9] S. Chowdhury *et al.*, «Influence of tack operation on metallographic and angular distortion in electron beam welding of Ti-61-4V alloy», *Measurement (Lond)*, vol. 175, feb. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109160.
- [10] N. Moslemi *et al.*, «Influence of welding sequences on induced residual stress and distortion in pipes», *Constr Build Mater*, vol. 342, p. 127995, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127995>.
- [11] H. Murakawa, Y. Luo, y. Ueda, «Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain (First Report) Mechanism of Inherent Strain Production», *Journal of the society of naval architects of Japan*, vol. 1996, pp. 739-751, jul. 1996, doi: [https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1996.180\\_739](https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1996.180_739).
- [12] D. Deng y H. Murakawa, «FEM prediction of buckling distortion induced by welding in thin plate panel structures», *Comput Mater Sci*, vol. 43, n.º 4, pp. 591-607, oct. 2008, doi: 10.1016/j.commatsci.2008.01.003.
- [13] R. Sepe, V. Giannella, A. Greco, y A. De Luca, «Fem simulation and experimental tests on the smaw welding of a dissimilar t-joint», *Metals (Basel)*, vol. 11, n.º 7, jul. 2021, doi: 10.3390/met11071016.
- [14] J. Szyndler, A. Schmidt, y S. Härtel, «Determination of welding heat source parameters for fem simulation based on temperature history and real bead shape», en *Materials Research Proceedings*, Association of American Publishers, 2023, pp. 159-168. doi: 10.21741/9781644902479-18.
- [15] Hexagon AB, «Simufact Welding reference manual», 2024.
- [16] E. Caballero, H. Ruíz, y J. Blandón, «Analysis of the Influence of Welding Conditions on the Angular Deformation and Residual Stresses in Thick Plate using FEM», en *2024 9th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, IEEE, oct. 2024, pp. 198-203. doi: 10.1109/IESTEC62784.2024.10820227.
- [17] D. Rosenthal, «The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments», *J Fluids Eng*, vol. 68, n.º 8, pp. 849-865, 1946, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4018624>.
- [18] J. L. Pacheco y M. Olmos, «Modelling of Thermal Cycling During Electric Arc Welding of Dissimilar Joints of Stainless Steels Using a Theoretical-Experimental Approach», *Revista de la Facultad de Ingeniería*, vol. 30, n.º 3, pp. 111-118, jul. 2015, Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en:

- [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652015000300011&lng=es&nrm=iso](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652015000300011&lng=es&nrm=iso)
- [19] J. Blandon, S. Takaba, T. Omae, N. Osawa, y H. Murakawa, «Optimization of Forming Process of a U-rib by Gas Heating Based on Theoretical Prediction», *CMES*, vol. 106, n.º 1, pp. 53-75, 2015, doi: <https://doi.org/10.3970/cmcs.2015.106.053>.
- [20] Y. Ueda, H. Murakawa, y N. Ma, *Welding Deformation and Residual Stress Prevention*, Elsevier., vol. 1. Elsevier, 2012. doi: 10.1016/b978-0-12-394804-5.00001-3.
- [21] D. Deng, H. Murakawa, y N. Ma, «Predicting welding deformation in thin plate panel structure by means of inherent strain and interface element», *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 17, n.º 1, pp. 13-21, ene. 2012, doi: 10.1179/1362171811Y.0000000065.
- [22] Hexagon AB, «MSC Patran Reference Manual », 2024.
- [23] J. Zhu, M. Khurshid, y Z. Barsoum, «Accuracy of computational welding mechanics methods for estimation of angular distortion and residual stresses», *Welding in the World*, vol. 63, n.º 5, pp. 1391-1405, sep. 2019, doi: 10.1007/s40194-019-00746-9.
- [24] Caballero José Piquer y Jeffus Larry, *Soldadura Principios y aplicaciones*, vol. Quinta edición. 2009. Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://books.google.com.pa/books?id=rHynAxzh0iEC&dq=Caballero+Jos%C3%A9+Piquer+y+Jeffus+Larry,+Soldadura+Principios+y+aplicaciones&lr=&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.pa/books?id=rHynAxzh0iEC&dq=Caballero+Jos%C3%A9+Piquer+y+Jeffus+Larry,+Soldadura+Principios+y+aplicaciones&lr=&hl=es&source=gbs_navlinks_s)
- [25] B. Q. Chen y C. Guedes Soares, «Effect of welding sequence on temperature distribution, distortions, and residual stress on stiffened plates», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, n.º 9-12, pp. 3145-3156, oct. 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8448-0.
- [26] J. Goldak, A. Chakravarti, y M. Bibby, «A New Finite Element Model for Welding Heat Sources», *Metallurgical Transactions*, vol. 15, n.º B, pp. 299-305, jun. 1984, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02667333>.
- [27] A. Vega, R. Sherif, S. Hisashi, y M. Hidekazu, «Influential Factors Affecting Inherent Deformation during Plate Forming by Line Heating (Report 1) †-The Effect of Plate Size and Edge Effect», *Transaction of JWRI*, vol. 36, pp. 57-64, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/2872>
- [28] H. Murakawa, S. Msanori, y W. Jiangchao, «Influence of Root Gap and Tack Weld on Transverse Shrinkage during Welding», *Transaction of JWRI*, vol. 41, pp. 65-70, 2012, [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11094/23161>
- [29] Bureau Veritas, «Rules for the Classification of Steel Ship's:Part B Hull and Stability», 2022. [En línea]. Disponible en: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/>
- [30] International Association of Classification Societies, «Requirements concerning MATERIALS AND WELDING», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements/ur-w>
- [31] M. Sohel, M. Panwala, S. A. Channiwala, y K. N. Srinivasan, «Numerical Simulation of Transient Temperature in SMAW», en *Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Prague, jul. 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [32] C. Heinze, C. Schwenk, y M. Rethmeier, «Influences of mesh density and transformation behavior on the result quality of numerical calculation of welding induced distortion», *Simul Model Pract Theory*, vol. 19, n.º 9, pp. 1847-1859, oct. 2011, doi: 10.1016/j.simpat.2011.05.001.