

Artículo de investigación

Análisis de la distorsión inducida por soldadura y la tensión residual en placas de acero y su efecto en la resistencia al pandeo

Erick Salgado-Cedeño ^[1]  Francisco Paredes-Mera ^[2] 

[1] Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM). Manta, Ecuador.



Autor para correspondencia: francisco.parades@uleam.edu.ec

Resumen

La soldadura es una tecnología ampliamente utilizada en la industria de la construcción naval para conectar componentes. Debido a que la soldadura requiere una gran entrada de calor a la pieza soldada, provoca deformación de la pieza soldada, tensión residual y deformación, afectando la geometría y la resistencia del componente después de la soldadura. Esta investigación utiliza software de análisis de elementos finitos para simular el proceso de soldadura de la placa y la tensión residual y la deformación de la soldadura resultantes, y analiza la resistencia al pandeo de la placa después de la soldadura. Al realizar un análisis de resistencia al pandeo utilizando elementos sólidos y elementos de placa respectivamente, confirmamos que la temperatura de soldadura aumentará la deformación posterior a la soldadura y ampliará el rango de distribución de tensiones residuales, afectando así la resistencia al pandeo posterior a la soldadura. Su comportamiento tiende a disminuir a medida que aumenta la temperatura de soldadura y la resistencia al pandeo disminuye del 0,2% a 0,4%.

Palabras Clave: *Simulación; método de elementos finitos; soldadura; deformación de materiales.*

Analysis of welding-induced distortion and residual stress in steel plates and their effect on buckling resistance

Abstract

Welding is a technology widely used in the shipbuilding industry to connect components. Because welding requires large heat input to the welded part, it causes deformation of the welded part, residual stress and deformation, affecting the geometry and strength of the component after welding. This research uses finite element analysis software to simulate the plate welding process and the resulting residual stress and weld deformation, and analyzes the buckling resistance of the plate after welding. By performing buckling resistance analysis using solid elements and plate elements respectively, we confirmed that the welding temperature will increase the post-weld deformation and widen the residual stress distribution range, thereby affecting the post-weld buckling resistance. Its behavior tends to decrease as the welding temperature increases and the buckling resistance decreases by 0.2% to 0.4%.

Keywords: *Simulation; finite element method; welding; material deformation.*

1. Introducción

La soldadura es una tecnología ampliamente utilizada en la industria de la construcción naval para conectar componentes. Los tipos de soldadura se pueden dividir en soldadura de estado sólido y soldadura de estado fundido. Los astilleros suelen utilizar soldadura con máscara de metal (*SMAW*) y soldadura con protección de gas (*GMAW*), que pertenecen al estado fundido. La soldadura por fusión necesita introducir una gran cantidad de calor en la soldadura, lo que conducirá a la deformación de la soldadura, y causará tensión residual y deformación de la soldadura dentro de la soldadura, lo que afectará la geometría y la resistencia de la pieza soldada.

Esta investigación utiliza un software de análisis de elementos finitos para simular el proceso de soldadura de placas y la tensión residual resultante y la deformación de la soldadura, y analiza la resistencia al pandeo de la placa después de la soldadura. La simulación de elementos finitos se divide en dos partes: el primer paso utiliza elementos sólidos para simular el proceso de soldadura y calentamiento de placas, y utiliza las propiedades del material a diferentes temperaturas, como el módulo de *Young*, el límite elástico, la relación de *Poisson*, etc. El segundo paso es cargar la distribución de desplazamiento y la distribución de tensión residual causado por la soldadura en la estructura de la lámina cilíndrica, y estudiar cómo cambiará la resistencia al pandeo de una lámina cilíndrica debido a la deformación de la soldadura y la tensión residual.

Al analizar la resistencia al pandeo con elementos sólidos y elementos de placa, está probado que el modelo simplificado de elementos de placa tiende a sobrestimar la resistencia al pandeo después de la soldadura, y el rango de sobreestimación es de aproximadamente 1%; al simular la influencia de diferentes temperaturas de soldadura, se prevé confirmar que la temperatura de soldadura aumentará la deformación posterior a la soldadura y expandirá el rango de distribución de tensión residual, lo que afectará la resistencia al pandeo posterior a la soldadura.

La deformación posterior a la soldadura tiende a subestimar la resistencia al pandeo con modos de número de onda más bajos y sobrestimar la resistencia al pandeo con modos de número de onda más altos, siendo esta la contribución resultante de esta investigación.

2. Literature Review

2.1 Antecedentes

La soldadura es el método básico en el proceso de construcción y reparación de barcos, y es una de las técnicas de procesamiento más importantes en la industria de la construcción naval. La calidad de la soldadura afecta

directamente la resistencia estructural, la confiabilidad y la vida útil del equipo. Entre los diversos accidentes en las estructuras soldadas, la mayoría de ellos son fallas por fragilidad causadas por una resistencia de soldadura insuficiente. La resistencia de la soldadura se ve afectada por los materiales de soldadura, los métodos de soldadura, los requisitos de tratamiento térmico, el contenido de impurezas de las juntas, la tensión de soldadura, el proceso, el tratamiento térmico después de la soldadura y así sucesivamente.

El método de elementos finitos es un método de cálculo moderno en rápido desarrollo y es una herramienta extremadamente eficaz para el análisis estático y dinámico de estructuras. La combinación de tecnología de análisis de elementos finitos y tecnología de soldadura puede resolver de manera eficiente muchos problemas prácticos en el proceso de soldadura y mejorar efectivamente la calidad de la construcción de soldadura.

Muchos estudiosos han llevado a cabo una extensa investigación en esta área. Sun et al. (2020) utilizaron el método de elementos finitos para analizar la resistencia de soldadura de la broca compacta de diamante y lo verificaron con los resultados de la prueba. Lee et al. (2017) utilizaron el método de elementos finitos para calcular la resistencia y la fatiga de la estructura soldada en forma de T del tanque de combustible y predijeron su vida útil.

Zhou et al. (2022) utilizaron el método de elementos finitos para simular la distribución de la temperatura de grieta en la superficie de la soldadura bajo la excitación de corrientes parásitas y lo verificaron a través de experimentos. Shen et al. (2021) utilizaron el método de elementos finitos termo elastoplásticos para analizar el proceso de soldadura de la estructura del fondo del barco del esqueleto transversal y obtuvieron la ley de distribución de la fuerza de restricción del marco del neumático.

Ahola et al. (2023) estudió la tensión y la tensión de soldadura de estructuras de barcos grandes y complejas basándose en la tecnología de análisis de elementos finitos, que mejoró la calidad de la soldadura de estructuras de barcos complejas. También utilizó el método de contorno y el elemento finito termoelástico-plástico basado en tecnología de computación paralela para estudiar la distribución de tensión residual interna y el proceso de cambio de la junta a tope multicanal de múltiples capas de placa gruesa Q235.

Además de los factores de tensión residual y los factores metalúrgicos del propio proceso de soldadura que causarán grietas, la optimización del esquema de soldadura también es la clave para garantizar la resistencia de la soldadura.

1.2 Teoría numérica de la soldadura

La soldadura es una tecnología ampliamente utilizada en ingeniería para conectar componentes. Los tipos de soldadura se pueden dividir en soldadura de estado sólido y soldadura de estado fundido. La soldadura de estado sólido se define como una técnica de soldadura en la que la temperatura del material se eleva por debajo del punto de fusión durante el proceso de, y se utilizan alta presión y difusión del material para llegar a soldar los componentes. La soldadura por fusión se define como una técnica de soldadura en la que la temperatura del material se eleva por encima del punto de fusión durante el proceso de soldadura, y el material se funde y se vuelve a solidificar para llegar a las piezas soldadas.

En términos generales, cuando se sueldan estructuras grandes, la soldadura con adición de metal (*SMAW*) y la soldadura a base de gas (*GMAW*), que pertenecen a la soldadura fundida, son las más utilizadas. Ambos tipos de soldadura utilizan soldadura por fusión de arco y rellenan un cordón de soldadura.

Para evitar la oxidación de la soldadura a alta temperatura en contacto con el aire, *SMAW* usa el componente fundente en la soldadura para formar una capa protectora para bloquear el aire, y *GMAW* usa gas inerte para proteger la soldadura del aire durante el proceso. Para el cambio de temperatura de los dos métodos de soldadura durante el proceso de soldadura, se puede calcular la ecuación de control de transferencia de calor para obtener el historial de cambio de temperatura de la soldadura. La ecuación es la siguiente:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) = -\nabla \cdot q(x, y, z, t) + Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

Dónde:

- ρ es la densidad del material en kg/m^3 ,
- c es el calor específico del material en J/kgK ,
- q es el flujo de calor perdido por el material en W/m^2
- Q es la energía interna generada en el interior del material, en W/m^3 .

Para la soldadura, el material en sí no produce energía interna, y todos los cambios de temperatura provienen del flujo de calor, donde el flujo de calor se puede dividir en la suma del flujo de calor introducido por el arco de soldadura q_w , la superficie de soldadura compuesta por el flujo de calor perdido por convección de calor q_c y el flujo de calor perdido por radiación en la superficie de la soldadura q_r , representados por la siguiente ecuación:

$$q = q_w + q_c + q_r \quad (2)$$

Dado que el entorno general de soldadura lo controla la convección del aire cuando se enfría la pieza soldada, la convección de calor entre la pieza soldada y el aire es estable

y no cambia drásticamente con el tiempo. Podemos definir el flujo de disipación de calor por convección de calor de la pieza soldada según a la ley de enfriamiento de Newton, la ecuación es la siguiente:

$$q_c = h_c(T_s - T_0) \quad (3)$$

Dónde:

- h_c es el coeficiente de convección de calor de la soldadura en el aire, y la unidad es $\text{W/m}^2\text{K}$. Este coeficiente se puede obtener por medición experimental. En términos generales, a temperatura ambiente donde no hay flujo de aire, este valor es de 10 a 20 $\text{W/m}^2\text{K}$
- T_s es la temperatura de la superficie de la soldadura, en $^\circ\text{K}$
- T_0 es la temperatura ambiente, en $^\circ\text{K}$;

Debido a la temperatura extremadamente alta de la superficie durante la soldadura, el calor perdido por radiación en la superficie de la soldadura es mucho mayor que la energía de radiación reflejada por la soldadura, por lo que podemos suponer que la radiación térmica de la soldadura sigue la ley de Stefan-Boltzmann, mediante la siguiente ecuación.

$$q_r = \varepsilon \sigma \{T_s^4 - T_0^4\} \quad (4)$$

Dónde:

- ε es la emisividad de la soldadura, que es cuando se supone que la soldadura es un cuerpo negro o 1
- σ es la constante de Stefan-Potts, que es $5.6701 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Suponiendo que en el arco de soldadura todo el calor ingresa al baño de soldadura a través de la soldadura fundida y luego se transmite indirectamente a la estructura, por lo que podemos escribir el flujo de calor transmitido por el arco de soldadura como:

$$q_w = \frac{Q_w}{v} \quad (5)$$

Dónde:

- Q_w es el calor transferido de la soldadura al cuerpo, en W .
- v es el volumen del baño de soldadura, en m^3 .

Además, el calor Q_w de la soldadura es proporcional a la energía del arco de soldadura, y la relación es la siguiente:

$$Q_w = \eta UI \quad (6)$$

Dónde el calor de soldadura Q_w se puede obtener multiplicando la corriente de soldadura I por el voltaje de soldadura U y luego usando la eficiencia del arco η para reflejar el fenómeno de que parte de la energía del arco se

pierde en el aire y no entra por completo al cordón de soldadura.

3. Metodología

3.1. Chapas lineales

En el pasado, la simulación de soldadura con el método de elementos finitos necesita llevar a cabo primero la simulación de transferencia de calor y luego obtener el historial del campo de temperatura y luego usar el historial del campo de temperatura como una carga para llevar a cabo la simulación de mecánica sólida. Este documento utiliza el software de análisis de elementos finitos *ABAQUS* Para confirmar que el método de simulación es correcto, este documento selecciona los datos experimentales en la literatura propuesta por Feng et al. (2021) como una comparación. A continuación, se presenta la configuración experimental de la literatura, la configuración de la simulación de elementos finitos, y se compara con los resultados de desplazamiento y tensión de la simulación de soldadura.

3.1.1. Modelo de elementos finitos y parámetros de material

En la literatura propuesta por Feng en 2021, se usó *GMAW* para soldar la placa plana para explorar la influencia de diferentes entradas de calor de soldadura en la deformación posterior a la soldadura de la placa delgada (Ver **Figura 1**).

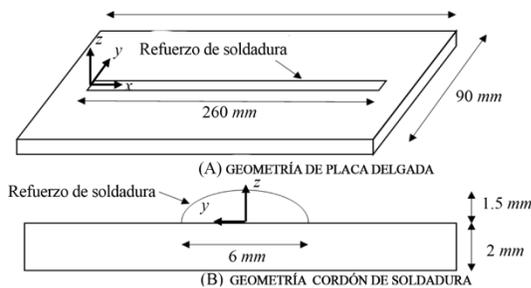


Figura 1: Geometría de la placa delgada y del cordón de soldadura.

La geometría de la placa delgada de referencia para este estudio es de 300mm de largo; 90mm de ancho con un espesor de 2 mm, como se muestra en la **Figura 1** (A), con un cordón de soldadura con una longitud de 260 mm; un ancho de 6 mm; una altura de 1.5 mm está soldado por *GMAW* en el centro de la placa delgada.

La deformación para este tipo de soldadura es severa, por lo que la literatura ha establecido la geometría del cordón de soldadura en la simulación por el método de elementos finitos, pero la literatura no describe la forma del refuerzo de soldadura en detalle, y solo brinda información sobre la altura del refuerzo de soldadura, como se muestra en la **Figura 1** (B).

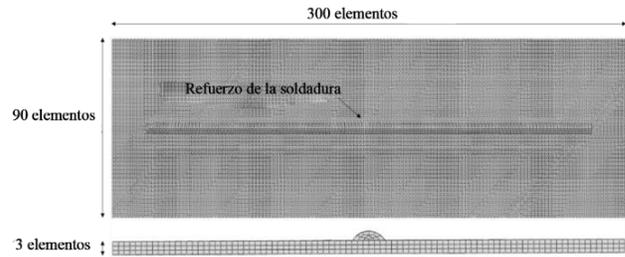


Figura 2: Modelo de malla pieza soldada

El modelo de cuadrícula establecido en el software de análisis de elementos finitos *ABAQUS* en este documento, como se muestra en la **Figura 2**, se divide en 300 unidades en la dirección de la longitud, 90 unidades en la dirección del ancho, 3 unidades en la dirección del espesor y el ancho del cordón de soldadura en 6 unidades; igualmente dividido en 260 unidades en la dirección de la longitud.

El tipo matemático es la unidad especial de acoplamiento de mecánica sólida de transferencia de calor de *ABAQUS*, y para aumentar la precisión del cálculo y, lo que es más importante, para reducir el efecto de bloqueo de corte, se selecciona la unidad de acoplamiento de mecánica sólida de transferencia de calor de segundo orden *C3D20T*.

La deformación es enorme, para evitar subestimar la influencia no lineal causada por los cambios geométricos drásticos, la función de cálculo no lineal geométrico debe activarse durante la simulación. El material de la placa es acero con bajo contenido de carbono *Q235*, y sus parámetros de material se pueden dividir en propiedades térmicas y propiedades sólidas (**Figura 3**).

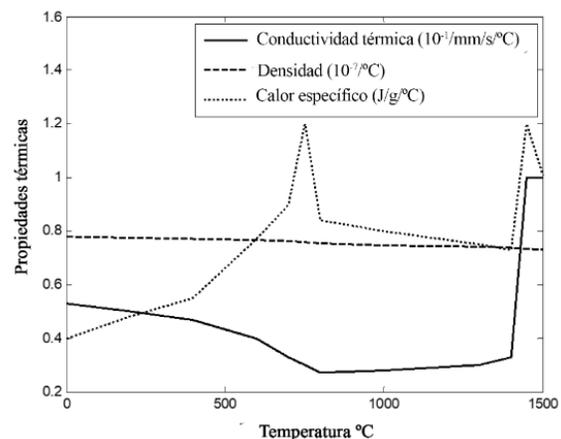


Figura 3: Propiedades térmicas placa de acero *Q235*.

De acuerdo con los parámetros del material proporcionados Wanzhi Steel (2023), las propiedades térmicas y las propiedades mecánicas del acero *Q235* se muestran en la **Figura 3** y la **Figura 4**, según sus valores detallados en la

Tabla 1 y la Tabla 2 se puede apreciar que el material atraviesa la temperatura crítica más baja a aproximadamente 750 °C, y la red de acero cambia a cuerpo centrado en la cara, lo que cambia el comportamiento de la conductividad térmica con los cambios de temperatura, es decir, pasa de disminuir con el aumento de temperatura a no cambiar mucho con el aumento de temperatura.

Tabla 1: Temperatura y propiedades térmicas Q235

Temperatura (°C)	Conductividad Térmica (10 ⁻¹ W/mm× °C)	Densidad (10 ⁻² g/mm ³)	Calor específico (J/g × °C)
0	0.53	0.78	0.4
200	0.5	0.775	0.48
400	0.47	0.77	0.55
600	0.4	0.766	0.77
700	0.33	0.762	0.9
750	0.3	0.757	1.2
800	0.27	0.753	0.84
1000	0.28	0.748	0.8
1300	0.3	0.744	0.75
1400	0.33	0.739	0.73
1450	1	0.735	1.2
1500	1	0.73	1.01

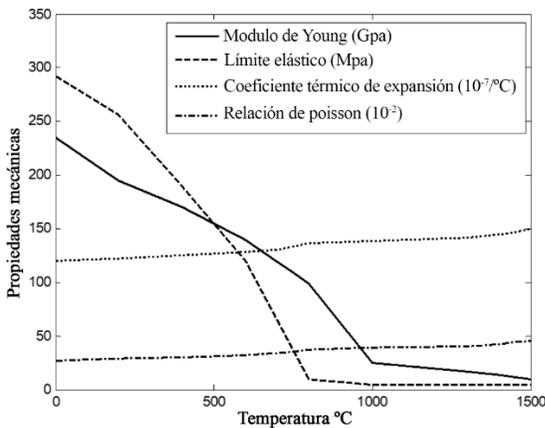


Figura 4: Propiedades mecánicas placa de acero Q235.

Tabla 2: Temperatura y propiedades mecánicas Q235.

Temperatura (°C)	Módulo de Young (Gpa)	Límite elástico (Mpa)	Coefficiente térmico de expansión (10 ⁻⁷ /°C)	Relación de Poisson (10 ⁻²)
0	235	292	120	27
200	195	256	122.727	28.727
400	170	190	125.455	30.455
600	140	120	128.182	32.182
700	119	65	130.909	33.909
750	109	36	133.636	35.636
800	99	10	136.364	37.364
1000	25	5	139.091	39.091
1300	17	5	141.818	40.818
1400	14	5	144.545	42.545
1450	11.5	5	147.273	44.273
1500	10	5	150	46

Además, el límite elástico también cayó a un valor extremadamente bajo, lo que significa que el acero pierde fuerza en este momento.

Con cualquier procesamiento de plasticidad, el material no tiene la capacidad de generar tensión interna; el acero comienza a fundirse a unos 1000°C, y el módulo de Young como propiedad de la fuerza sólida disminuye con el aumento de la temperatura hasta que el material se funde por completo a los 1450 °C. El valor es bajo, y la temperatura de la soldadura general cuando ingresa al cordón de soldadura generalmente supera los 1450°C, lo que significa que el cordón de soldadura no tiene rigidez ni resistencia al comienzo de la formación, y debe esperar hasta que la temperatura del material descienda a 1000 °C antes de que el cordón de soldadura se contraiga.

Se genera tensión en el material y cuando la temperatura desciende a 750 °C, el límite elástico del material aumenta gradualmente y la tensión generada por la contracción del cordón de soldadura se convierte en tensión residual positiva y se almacena alrededor del cordón de soldadura. En materiales más alejados del cordón, se genera tensión de compresión para equilibrar la tensión residual positiva y reducir el esfuerzo del cordón de soldadura.

La conductividad térmica, la densidad, el módulo de Young y el coeficiente de expansión térmica de las propiedades del material son todos isotrópicos, la curva de rendimiento del material es de plasticidad perfecta y el comportamiento de endurecimiento es isotrópico.

En el experimento de soldadura de placa delgada de Feng, el origen de las coordenadas del modelo está al principio del cordón de soldadura y la superficie superior de la placa delgada, y las condiciones de contorno en la placa delgada se muestran en la Figura 5. Punto A de la placa delgada bloquea los grados de libertad de desplazamiento en tres direcciones, el punto B bloquea la dirección y y el grado de libertad de desplazamiento direccional z; los puntos C y D bloquean el grado de libertad de desplazamiento en la dirección z.

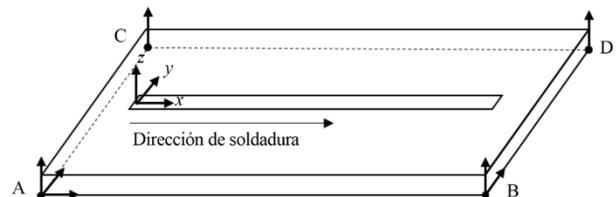


Figura 5: Condiciones de contorno para la soldadura de placas delgadas.

La literatura no proporciona valores exactos para el coeficiente de convección del aire h_c y coeficiente de radiación térmica en la simulación de calefacción ϵ , solo muestra que el experimento se realiza en una habitación con aire a 20°C. Se puede suponer que el coeficiente de convección es 10W/(mm²K); el coeficiente de radiación térmica ϵ es 1.

Los parámetros de soldadura se establecen como se muestra en la **Tabla 3**. La corriente de soldadura es de 160 A, el voltaje de soldadura es de 19,6 V, la eficiencia del arco es de 0,8. Dado que no se considera el fenómeno de rociado del arco causado por un voltaje y una corriente de soldadura excesivos, solo necesitamos conocer el baño de soldadura de entrada.

Tabla 3: Parámetros de soldadura

Amperaje (A)	Voltaje (V)	Eficiencia del arco	Velocidad (mm/s)
160	19.6	0.8	10

El calor total en el baño de soldadura se puede calcular de acuerdo con la ecuación (6), y la entrada de calor total en el baño de soldadura es 2508.8 W; la velocidad de soldadura es de 10 mm/s, la posiciones inicial y final coinciden las posición del cordón de soldadura, la dirección de soldadura es a lo largo x , la fuente de calor de soldadura utilizada para simular la entrada de calor es una fuente elíptica con una distribución uniforme del flujo de calor. Los parámetros del tamaño de la fuente de calor se establecen de acuerdo con la geometría del cordón de soldadura, como se muestra en la **Tabla 4**.

Tabla 4: Tamaño de fuente de calor de soldadura de la chapa de acero

(a)mm	(b) mm	(c) mm
3	4	1.5

El eje menor a lo largo de la dirección y es de 3 mm, el eje largo en la dirección x es de 4 mm, la profundidad es de 1,5 mm. La temperatura inicial del material de la placa delgada se establece en 20°C antes de que comience la soldadura.

A partir de la velocidad de soldadura y la longitud del cordón de soldadura, se puede saber que el calentamiento de la soldadura dura 26 segundos, y para garantizar el enfriamiento completo de la placa delgada, el tiempo de enfriamiento será de al menos 1000 segundos.

3.2. Chapas cilíndricas o tuberías

A través de la verificación de la simulación de soldadura de una chapa de acero del punto anterior, se logró conocer la configuración del método de elementos finitos para simular la soldadura, que incluye:

1. Uso de transferencia de calor-elementos acoplados de fuerza sólida
2. Uso de elementos de segundo orden para evitar el bloqueo por corte
3. Para aumentar la resolución del campo de desplazamiento y el campo de tensión cerca del cordón de soldadura, se aumenta el tamaño de la malla cerca del cordón de soldadura.
4. Para el análisis de acoplamiento de transferencia de calor-fuerza sólida del método de elementos finitos, la relación entre el voltaje de soldadura y la corriente de soldadura y otros parámetros no afectan el resultado de soldadura, solo se requiere la entrada de calor total por soldadura.

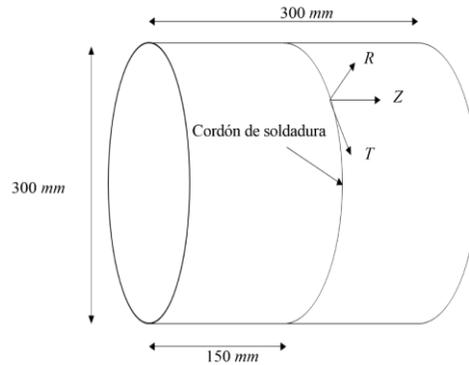


Figura 6: Parámetros geométricos chapa cilíndrica.

Solo es necesario especificar la entrada de calor total para la soldadura. En base a esto, se realiza la simulación de soldadura de una chapa cilíndrica, cuyo modelo geométrico se muestra en la **Figura 6**. Es una estructura cilíndrica de 300 mm de largo, 300 mm de diámetro y 2.5 mm de espesor, y el origen de las coordenadas cilíndricas está en una longitud de 150 mm, se realiza la soldadura circunferencial y el modelo comienza a estudiar el método de simulación del recipiente a presión de soldadura y su estado posterior a ella.

3.2.1. Modelo de elementos finitos y parámetros de material

Se realiza una división de malla en ABAQUS, para aumentar la resolución cerca del cordón de soldadura sin aumentar excesivamente el número de elementos, 6 elementos se dividen por igual en 216 elementos cada 10 grados en la dirección circunferencial, 3 elementos se dividen por igual en la dirección del espesor; la dirección longitudinal se divide en 50 unidades, y la división desigual es la culata más densa y la más escasa en el cordón de soldadura.

Se utiliza la unidad de acoplamiento de fuerza sólida de transferencia de calor C3D20T. También para reducir el efecto de bloqueo de corte, se utiliza la unidad de segundo orden de aproximación, y para evitar subestimar la deformación posterior a la soldadura, el cálculo también

tiene en cuenta la influencia de la no linealidad geométrica, como se muestra en la **Figura 7** el material de la pieza cilíndrica también es acero Q235, y sus propiedades térmicas y sólidas se muestran en la **Tabla 1**.

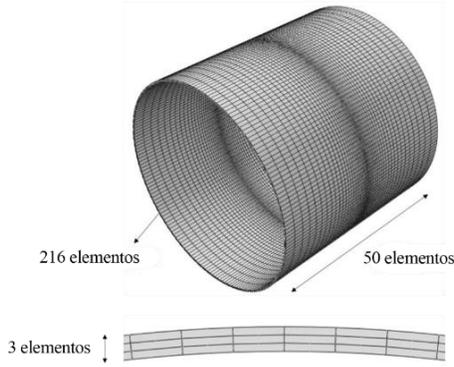


Figura 7: Diagrama de malla de la chapa de acero cilíndrica

En la **Tabla 2**, la conductividad térmica, la densidad, el módulo de Young y el coeficiente de expansión térmica en las propiedades del material son todos isotrópicos, la curva de rendimiento es de rendimiento perfecto y el comportamiento de endurecimiento por deformación es un endurecimiento por deformación isotropo. Las condiciones límite de la soldadura de pieza cilíndrica se muestran en la **Figura 8**. El extremo izquierdo bloquea los grados de libertad de desplazamiento radial y circunferencial, el extremo derecho bloquea los grados de libertad de desplazamiento en tres direcciones y ninguno de los extremos bloquea los grados de libertad de rotación.

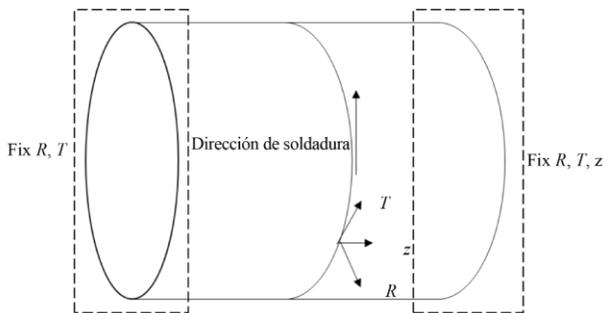


Figura 8: Condiciones límite se soldadura de la chapa de acero cilíndrica.

La soldadura se realiza en sentido antihorario a lo largo del cordón de soldadura, la temperatura ambiente se fija en 20°C, el coeficiente de convección del aire h_c es $10^{-5}W/(mm^2 K)$, el coeficiente de radiación térmica ϵ es 1, los parámetros de soldadura se muestran en la **Tabla 5**, el calor de entrada total es de 2400 W, la velocidad de soldadura es de 3,6 grados/s, la soldadura comienza en la posición donde y es 0

en el primer cuadrante de las coordenadas globales y se detiene la soldadura en la misma posición.

Tabla 5: Parámetros de soldadura chapa cilíndrica.

Calor de entrada (W)	Velocidad (grados/s)
2400	3.6

Se simula con una configuración de una fuente de calor elíptica con una distribución uniforme del flujo de calor. Los parámetros de tamaño se muestran en la **Tabla 6**. La longitud del semieje a lo largo de la dirección radial es de 2,5 mm, la longitud del semieje a lo largo de la dirección del anillo es de 10 mm, el semieje la longitud a lo largo de la dirección del eje z es de 5 mm, luego se puede establecer por la velocidad de soldadura y la longitud de soldadura que el calentamiento de soldadura dura 100 segundos, y para enfriar completamente la pieza cilíndrica, se configura una duración de 1000 segundos.

Tabla 6: Parámetros de la fuente de calor de soldadura de la chapa cilíndrica

(a)mm	(b) mm	(c) mm
2.5	10	5

4. Resultados

4.1. Chapa Lineal

4.1.1. Resultados de la tensión residual en la dirección de soldadura

El experimento en la literatura de Feng et al., (2021), la simulación y la deformación realizada por el software de análisis de elementos finitos **ABAQUS** en este documento se muestran en la **Figura 9** y la **Figura 10**.

La deformación presenta una forma de silla de montar. Como se muestra en la **Error! Reference source not found.**, comparando el desplazamiento vertical en el medio del espesor de la placa delgada, se puede encontrar que en el **ABAQUS** la simulación del método de elementos finitos, la no linealidad geométrica no se considera para los resultados de la simulación de soldadura de placa delgada, y el desplazamiento es mucho menor que el desplazamiento de la placa delgada en el experimento.

Teniendo en cuenta la no linealidad geométrica, el desplazamiento de la simulación de soldadura de placa delgada es ligeramente mayor que el desplazamiento de placa delgada experimental, con un error de aproximadamente 5.485%. La razón es que el modelo de elementos finitos en este documento solo se describe por un sector.



Figura 9: Deformación de placa delgada experimental después de soldar. Feng et al., (2021)

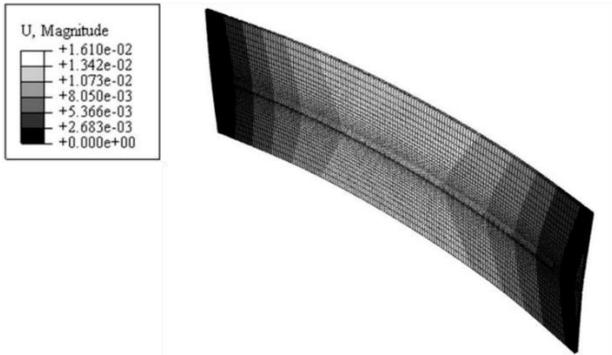


Figura 10: Simulación de deformación de la chapa después de soldar

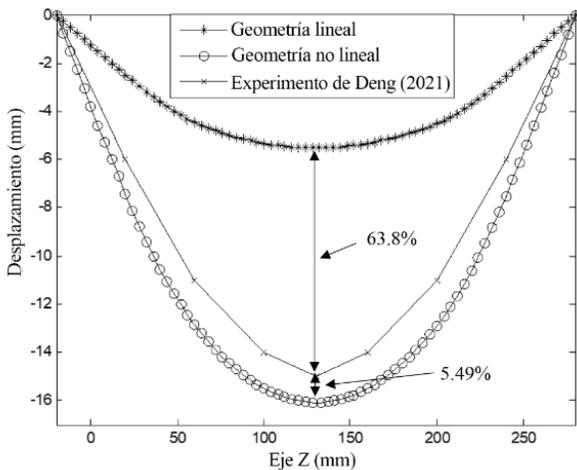


Figura 11: Comparación de deformación de chapa soldada.

La geometría de la sección transversal del cordón de soldadura no puede confirmarse a partir de los experimentos en el literatura, lo que resulta en una gran deformación; y comparando la tensión normal en la dirección paralela al cordón de soldadura en las superficies superior e inferior de la superficie media de la placa delgada, como se muestra en la **Figura 12**, se puede ver que la tensión normal cerca del cordón de soldadura está cerca del límite elástico del material, diferencia que ha aparecido en la mayoría de las

publicaciones de investigación que utilizan la simulación numérica como método.

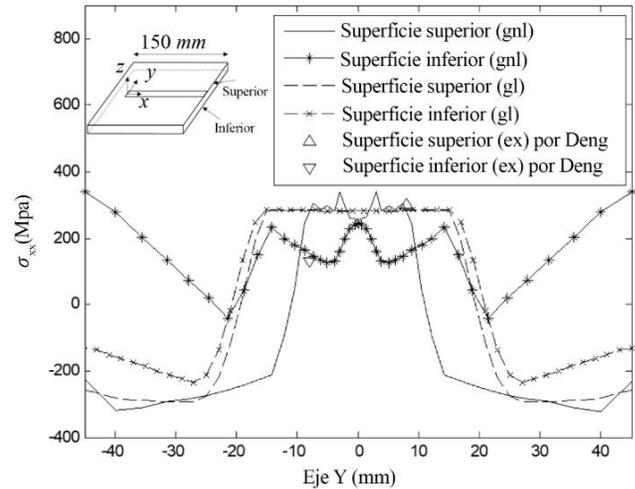


Figura 12: Comparación de la distribución del límite elástico de la chapa con la superficie inferior

La tensión normal en el lugar debe ser ligeramente mayor que el límite elástico original del material. La razón es que la temperatura máxima durante la soldadura es probablemente mucho más alta que la temperatura crítica baja (750°C) del acero. En la investigación del método de simulación numérica, cuando el cordón de soldadura se contrae violentamente, el límite elástico del material en el cordón de soldadura es mucho más bajo que en otros lugares, por lo que la tensión plástica causada por la contracción del cordón de soldadura se acumula en el mismo.

El límite elástico en el cordón de soldadura es gradualmente consistente con otros lugares, y la tensión en el cordón de soldadura se acerca gradualmente al límite elástico durante este proceso. En la investigación basada en experimentos, además del aumento de tensión causado por la contracción del cordón de soldadura, la alta temperatura también causará que el límite elástico del acero aumente aún más, lo que hace que la tensión en el cordón de soldadura sea ligeramente mayor que la tensión de fluencia inicial del material; además, se puede ver en la **Figura 12** que la distribución de tensión en las superficies superior e inferior también es consistente con la del simulación numérica realizada sin considerar la no linealidad geométrica.

El experimento es diferente. Por otro lado, la simulación numérica considerando la no linealidad geométrica muestra que la distribución de tensión en las superficies superior e inferior puede reflejar con mayor precisión la tensión residual de soldadura en el experimento.

4.1.2. Resultados de la tensión residual en otras direcciones

Entre las tensiones residuales causadas por la soldadura, además de la tensión residual obvia en la dirección paralela al cordón de soldadura, las posiciones de la tensión residual en otras direcciones que se desvían del plano neutral también deben verificarse una por una.

La **Figura 13** muestra la distribución de la tensión residual en cada dirección en la superficie media de la chapa de acero, la tensión residual σ_{xx} en la dirección paralela al cordón de soldadura y la tensión residual σ_{yy} en la dirección perpendicular al cordón de soldadura pueden conocerse a partir del diagrama de distribución solo. La tensión residual posterior a la soldadura tiene un mayor impacto en la resistencia estructural.

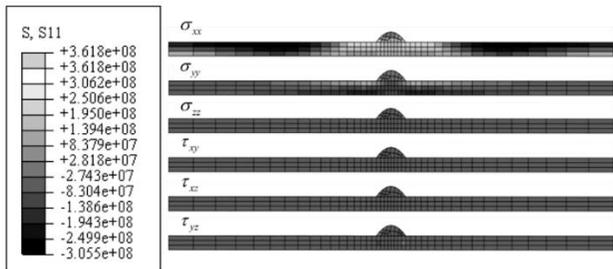


Figura 13: Diagrama de distribución de tensiones residuales en la superficie media de la chapa soldada

Luego de inspeccionar individualmente cada tensión residual en las superficie superior, media e inferior. La **Figura 14** muestra la distribución de tensión en la superficie superior. Se puede encontrar que además de la tensión residual σ_{xx} en la dirección paralela al cordón de soldadura, la tensión residual σ_{yy} en la dirección perpendicular al cordón de soldadura también se ve significativamente afectada.

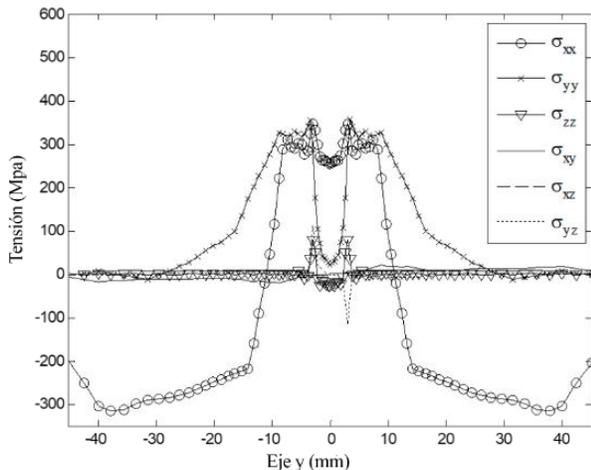


Figura 14: Distribución de tensión residual en la superficie superior de la chapa de acero.

Además, también se puede encontrar que la distribución de la tensión residual disminuye en la soldadura y la **Figura 15** permite establecer que la tensión residual σ_{xx} y σ_{yy} en la dirección paralela y perpendicular al cordón de soldadura también tiene una influencia obvia como para la distribución de tensiones en el plano medio, como se muestra en la **Figura 16**, solo la tensión residual σ_{xx} en la dirección paralela al cordón de soldadura tiene una mayor influencia. Es por ello que los investigadores la ignoran y en esta investigación es posible omitir algunas tensiones residuales en el análisis de la resistencia al pandeo.

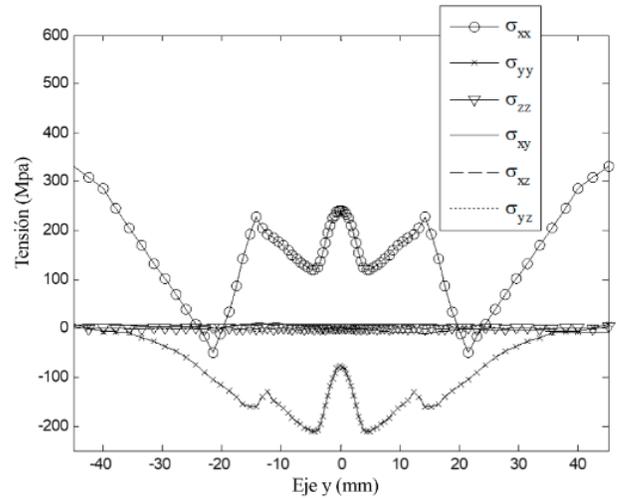


Figura 15: Distribución de tensión residual en la superficie inferior de la chapa de acero

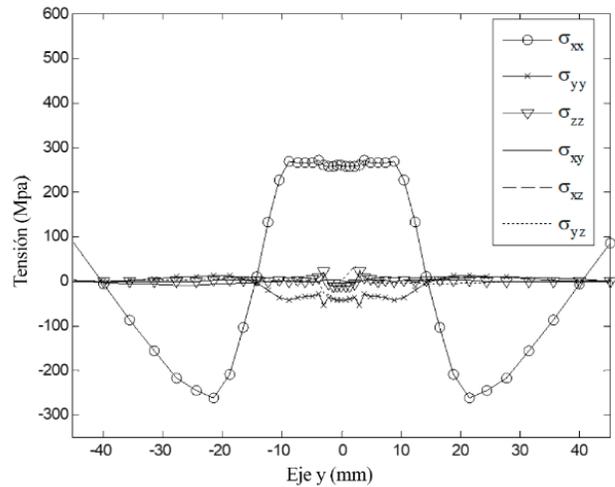


Figura 16: Distribución de tensiones residuales en la superficie media de una chapa de acero

4.2. Chapa cilíndrica o tubería

4.2.1. Resultados de la simulación después de la soldadura

Con base en los resultados de soldadura de la chapa cilíndrica simulada por el software de análisis de elementos finitos ABAQUS, es posible observar la distribución del desplazamiento radial de la coraza cilíndrica en la dirección del eje z , como se muestra en la **Figura 17**.

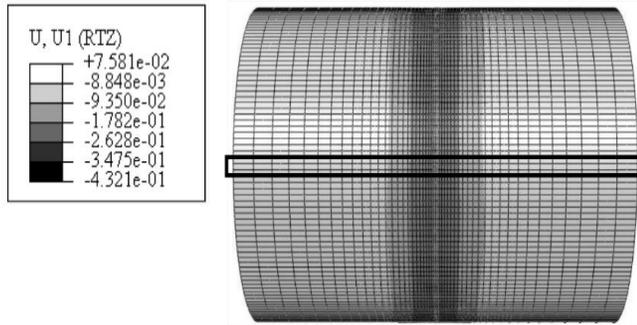


Figura 17: Distribución de la tensión radial de la chapa cilíndrica.

Con el resultado de la **Figura 18** es posible establecer que la soldadura tiene cierta influencia en el ancho del rango de la chapa cilíndrica. También se puede encontrar que la deformación causada por la soldadura tiende de 0 a unos 100mm de distancia del cordón de soldadura, y su distribución de esfuerzos se muestra en la **Figura 19**, la cual es la misma que la de la soldadura de chapa lineal.

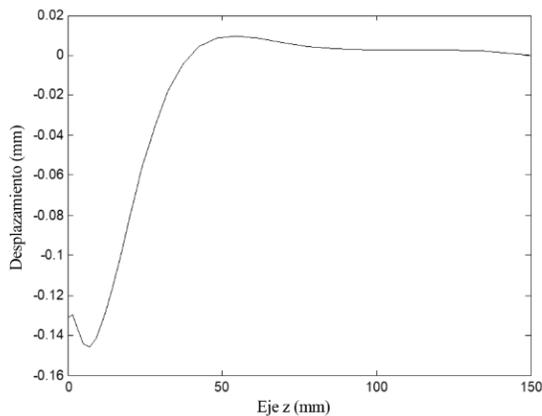


Figura 18: Desplazamiento en la mitad del espesor de la chapa cilíndrica

Se puede establecer que los principales tipos de esfuerzos que pueden afectar la resistencia post-soldadura son los esfuerzos residuales en la dirección paralela al cordón de soldadura y la tensión residual en la dirección perpendicular al cordón de soldadura. En este ejemplo serían la tensión circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$ y la tensión σ_{zz} en la dirección Z .

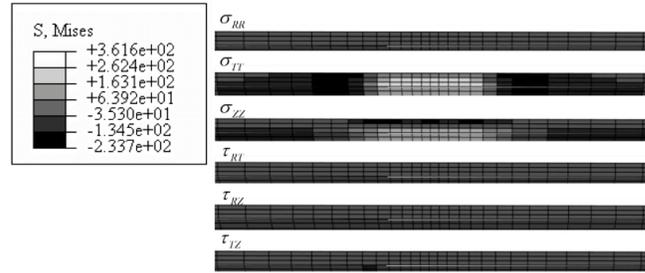


Figura 19: Distribución de tensión residual de la chapa cilíndrica

La variación de la tensión residual no es una distribución lineal simple, lo que significa que, si se utiliza el elemento chapa lineal para simplificar tensiones ocasiones, puede ser porque la placa solo puede asumir que la tensión en la dirección del espesor es una distribución lineal, y se obtienen resultados de simulación erróneos.

5. Conclusiones

En este estudio, se logró simular la soldadura con el método de elementos finitos en el pasado, la simulación de soldadura se dividió en dos partes: simulación de transferencia de calor y simulación de mecánica de sólidos, y se cambió a simulación de acoplamiento de transferencia de calor-mecánica de sólidos

La geometría del modelo experimental se utiliza para simular el experimento de soldadura mediante FEM y se comparan los resultados, y se resumen las configuraciones del modelo del software del método de elementos finitos ABAQUS para simular la soldadura con acoplamiento de transferencia de calor-mecánica sólida. Dado que la ecuación gobernante es una ecuación de acoplamiento de transferencia de calor y mecánica de sólidos, las condiciones de contorno incluyen condiciones de contorno de desplazamiento y condiciones de contorno de disipación de calor.

La tensión residual después de la soldadura es principalmente la tensión residual en la dirección del cordón de soldadura paralelo y la tensión residual en la dirección perpendicular al cordón de soldadura, y los valores de tensión residual en otras direcciones son menores. Existe un límite en el rango de influencia de la soldadura sobre la deformación posterior a la soldadura y la tensión residual de la carcasa cilíndrica. Más allá de esta distancia, tanto la deformación posterior a la soldadura como la tensión residual se aproximan a cero. Esto permite a la ingeniería analizar la soldadura de estructuras grandes. Superposición lineal para simplificar los cálculos.

Se logró comparar los cálculos de resistencia al pandeo basados en la mecánica elástica y la teoría de placas para analizar las diferencias en el pandeo de la estructura de la placa, y se simuló la soldadura de dos maneras: considerando

la deformación de la soldadura y considerando la deformación de la soldadura más la tensión residual. La resistencia al pandeo obtenida al analizar la teoría de la placa es a menudo mayor que la obtenida mediante el análisis de la mecánica elástica, pero en geometría simple las dos son diferentes.

Referencias

- Ahola, A., Lipiäinen, K., Lindroos, J., Koskimäki, M., Laukia, K., & Björk, T. (2023). On the Fatigue Strength of Welded High-Strength Steel Joints in the As-Welded, Post-Weld-Treated and Repaired Conditions in a Typical Ship Structural Detail. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 644. <https://doi.org/10.3390/jmse11030644>
- Amirafshari, A., Barltrop, N., Wright, M., & Kolios, A. (2021). Frequency of welding defects, size statistics and probabilistic models for marine structures. *International Journal of Fatigue*, 145, 106069. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069>
- Feng, G., Wang, Y., Luo, W., Hu, L., & Deng, D. (2021). Comparison of welding residual stress and deformation induced by local vacuum electron beam welding and metal active gas arc welding in a stainless-steel thick plate joint. *Journal of Materials Research and Technology*, 13(6), 1967–1979. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.105>
- Lee, JH., Kim, JS., Kang, SU. et al. Fatigue life analysis of steel tube member with T-shaped welded joint by FEM. *International Journal Steel Structure*. 17, 833–841 (2017). <https://doi.org/10.1007/s13296-017-6035-3>
- Shen, W., Qiu, Y., Xiaobin, L., Xinyu, H., Berto, F., & Hu, D. (2021). Stress magnification effect of initial deformation on the notch stress in high-strength steel weldments. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 191, 104457. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104457>
- Sun, Z., Yuan, K., Chang, Z., Bi, S., Zhang, X., & Tang, D. (2020). Ultra-low thermal conductivity and high thermoelectric performance of two dimensional triphosphides (InP₃, GaP₃, SbP₃ and SnP₃): A comprehensive first principles study. *Nanoscale*, 12(5), 3330–3342. <https://doi.org/10.1039/C9NR08679J>
- Wanzhi Steel, «Acero Q235,» 2023. [En línea]. Available: <https://wzppgi.com/es/q235-steel/>
- Zhou, H., Yi, B., Shen, C., Wang, J., Liu, J., & Wu, T. (2022). Mitigation of welding-induced buckling with transient thermal tension. *Marine Structures*, 81, 103104.

Contribución de los autores (CRediT)

Salgado-Cedeño, E.: Conceptualización, Diseño de la investigación, Revisión bibliográfica, Análisis e interpretación de los datos, Redacción – borrador original del artículo, Preparación y edición del manuscrito. **Paredes-Mera, F.:** Revisión crítica del contenido, Diseño metodológico-Corrección de estilo, Supervisión académica, Revisión – edición del artículo.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores han declarado que no existe conflicto de intereses en esta obra.

Nota del Editor

Descargo de responsabilidad: Los datos, declaraciones, opiniones contenidas en el documento son responsabilidad únicamente de los autores y no de la *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*. La Revista y sus editores renuncian a toda responsabilidad por daño a persona o propiedad resultante de los métodos, instrucciones, producto o idea mencionado en el contenido.



Derechos de autor 2025. Revista Científica FINIBUS - ISSN: 2737-6451.

Esta obra está bajo una licencia: Internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual .4.0