

Estudio de la Influencia de un Tratamiento Térmico Post-Soldadura en las Propiedades  
Mecánicas de Juntas Soldadas de Acero ASTM A36

Jose Daniel Pinzón Cruz y Zayra Fernanda García Ardila

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

PhD. Ingeniería de Materiales

Codirector

Laura Ximena Arenas Cordero

Ingeniera Metalúrgica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Dedico esta tesis principalmente a Dios y a la Virgencita por ser mis guías en cada paso de este camino. A mis papás, José y María, por brindarme su amor incondicional, enseñarme la importancia del esfuerzo y la dedicación, y por contribuir a mi crecimiento personal y académico. A mis hermanas, Sandra y Silvia, que han sido mis compañeras de travesías, compartiendo risas y desafíos. A mis sobrinos, Salomé, Samara y Camilo, que me inspiran a ser un ejemplo positivo en sus vidas, demostrando que con esfuerzo se puede lograr grandes cosas. A Natalia Gallardo, por cada mensaje de aliento en los momentos desafiantes durante esta etapa.

*Jose Daniel Pinzón Cruz*

Este proyecto es dedicado a mi padre Fernando García Lizarazo y a mi madre Noelia Ardila Meza que con su amor y apoyo incondicional he podido lograr esta gran meta. A mi hermana Mónica Alejandra García Ardila que con su ejemplo y valentía me han enseñado que todos los sueños se pueden cumplir. A Dios por tantas bendiciones durante esta linda experiencia que me han ayudado a crecer como persona y formarme profesionalmente.

*Zayra Fernanda García Ardila*

### **Agradecimientos**

Agradezco a Dios y a la Virgencita por permitirme vivir esta etapa llena de experiencias y aprendizajes. A mi directo, el profesor Oscar Bohórquez y a mi codirectora, la Ing. Laura Arenas y futura magíster, por guiarme en este proceso académico con sus conocimientos, paciencia y perseverancia. A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, así como la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS, a los administrativos, técnicos de laboratorio y profesores, por compartir sus conocimientos y por el apoyo brindado. Al semillero SIMA por hacer este proyecto realidad. A Camilo Contreras y Gustavo Serrano por el apoyo y comprensión en esta etapa de mi vida. A la Ing. Sara Mejía por su compañía y amistad, por brindarme conocimientos y momentos enriquecedores. A mis compañeros y amigos por llenar este paso por la universidad de aprendizajes, risas, alegrías.

*Jose Daniel Pinzón Cruz*

Doy gracias a Dios y a todas las personas que estuvieron acompañándome en este proceso universitario, a mis directores Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra y Laura Ximena Arenas Cordero por su dedicación y aprendizaje en esta etapa académica. A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por su colaboración en el uso de los laboratorios, a la Escuela de Ingeniería Mecánica por su ayuda en el uso del Laboratorio de Ensayos Mecánicos y al Semillero de Investigación en Manufactura Aplicada por acogerme en su grupo y lograr realizar el proyecto. A todos los profesores, técnicos y auxiliares que con su cooperación nada de esto sería posible. Una vez más, infinitas gracias.

*Zayra Fernanda García Ardila*

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo general .....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
2. Fundamentación Teórica.....	15
2.1 Acero estructural ASTM A36.....	15
2.2. Proceso de soldadura de arco metálico con gas de protección (GMAW).....	15
2.2.1 Métodos de transferencia .....	16
2.2.1.1 Transferencia por corto circuito.....	16
2.2.1.2 Transferencia globular. ....	16
2.2.1.3 Transferencia por spray.....	16
2.3 Post Calentamiento .....	17
2.4 Ensayos mecánicos .....	17
2.4.1 Ensayo de tracción .....	17
2.4.2 Ensayo de fatiga.....	19
2.4.3 Ensayo de microdureza .....	21
2.5 Caracterización microestructural .....	22
3. Metodología .....	22
3.1 Unión de juntas a tope de acero ASTM A36 .....	22
3.2 Obtención de probetas para ensayos mecánicos .....	24
3.3 Aplicación de tratamiento térmico.....	25

3.4 Ejecución de ensayos mecánicos .....	25
3.4.1 Ensayo de tracción. ....	25
3.4.2 Ensayo de fatiga.....	26
3.4.3 Ensayo de microdureza .....	26
3.5 Preparación metalográfica .....	27
4. Resultados y Discusión.....	27
4.1 Metalografía.....	27
4.2 Ensayo de microdureza.....	31
4.3 Ensayo de tracción .....	32
4.4 Ensayo de fatiga.....	35
5. Conclusiones.....	38
6. Recomendación.....	39
Referencias Bibliográficas .....	40

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Composición química acero ASTM A36</i> .....	15
Tabla 2 <i>Condiciones equipo GMAW</i> .....	23
Tabla 3 <i>Parámetros para el mecanismo de arrastre</i> .....	23
Tabla 4 <i>Propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tracción</i> .....	33
Tabla 5 <i>Niveles de esfuerzo en ensayo de fatiga</i> .....	35
Tabla 6 <i>Ecuación de curva S-N de junta soldada sin y con tratamiento térmico</i> .....	36

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Esquema del proceso GMAW</i> .....	15
Figura 2 <i>Métodos de transferencia</i> .....	17
Figura 3 <i>Gráfica Esfuerzo vs Deformación</i> .....	18
Figura 4 <i>Esfuerzos fluctuantes</i> .....	20
Figura 5 <i>Diagrama S-N característico</i> .....	20
Figura 6 <i>Indentador microdureza Vickers</i> .....	21
Figura 7 <i>Diagrama de flujo de ejecución de la investigación</i> .....	22
Figura 8 <i>Junta a tope soldada acero ASTM A36</i> .....	23
Figura 9 <i>Plano de las probetas. a) Ensayo de tracción. b) Ensayo de fatiga. c) Metalografía</i> ..	24
Figura 10 <i>Toma de micedurezas</i> .....	26
Figura 11 <i>Metalografía 100X. a) sin tratamiento térmico. b) con tratamiento térmico</i> .....	28
Figura 12 <i>Zona de Fusión ZF 200X. a) sin tratamiento térmico. b) con tratamiento térmico</i> .....	29
Figura 13 <i>Zona Afectada Térmicamente ZAT 200X. a) sin tratamiento térmico. b) con tratamiento térmico</i> .....	30
Figura 14 <i>Metal base MB 200X. a) sin tratamiento térmico. b) con tratamiento térmico</i> .....	30
Figura 15 <i>Microdureza con y sin tratamiento térmico</i> .....	32
Figura 16 <i>a) Curva Esfuerzo vs Deformación sin tratamiento térmico. b) Punto de fluencia sin tratamiento térmico</i> .....	32
Figura 17 <i>a) Curva Esfuerzo vs Deformación con tratamiento térmico. b) Punto de fluencia con tratamiento</i> .....	33
Figura 18 <i>Comparación de ensayo de tracción</i> .....	34

Figura 19 *Resultados del ensayo de fatiga: a) sin tratamiento térmico, b) con tratamiento térmico*

..... 36

Figura 20 *Curva S-N con y sin tratamiento térmico* ..... 37

## **Glosario**

**ASTM:** American Society for Testing and Material

**AWS:** American Welding Society

**GMAW:** gas metal arc welding

**MB:** metal base

**TT:** tratamiento térmico

**ZAT:** zona afectada térmicamente

**ZF:** zona de fusión

## Resumen

**Título:** Estudio de la Influencia de un Tratamiento Térmico Post-Soldadura en las Propiedades Mecánicas de Juntas Soldadas de Acero ASTM A36\*

**Autor:** Zayra Fernanda Garcia Ardila y Jose Daniel Pinzón Cruz\*\*

**Palabras Clave:** Acero ASTM A36, soldadura, alivio de tensiones, propiedades mecánicas, tracción, fatiga, dureza.

**Descripción:** El acero ASTM A36 es ampliamente utilizado en aplicaciones estructurales y de construcción debido a sus buenas propiedades mecánicas, su alta soldabilidad y su bajo costo. Este estudio se centró en evaluar cómo las propiedades mecánicas de una junta soldada de acero ASTM A36, unidas mediante el proceso de soldadura GMAW, se ven influenciadas al aplicar un tratamiento térmico de alivio de tensiones diseñado según norma. Para este estudio se realizaron pruebas de tracción, fatiga, dureza y caracterización metalográfica siguiendo los estándares de la *American Society for Testing and Material* ASTM. En los resultados obtenidos evidenciaron cambios significativos en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas al aplicar el post-calentamiento. Se observó una disminución de dureza en las tres zonas de la junta soldada, así como un aumento aproximado del 12% en el límite de fluencia y del 20,9% en la tenacidad, según la curva esfuerzo-deformación del ensayo de tracción. Por otro lado, la prueba de fatiga demostró que la junta soldada, tras el post-calentamiento, presenta una mayor durabilidad en ciclos al someterla a un cierto nivel de esfuerzo. Estos cambios positivos en las propiedades mecánicas se llevan a cabo con el fin de garantizar la durabilidad, seguridad y eficiencia de las juntas soldadas en aplicaciones industriales.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Programa académico. Director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. PhD. Ingeniería de Materiales. Codirector: Laura Ximena Arenas Cordero. Ingeniera Metalúrgica

### Abstract

**Title:** Study of the Influence of Post-Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties of ASTM A36 Welded Steel Joints\*

**Author(s):** Zayra Fernanda Garcia Ardila y Jose Daniel Pinzón Cruz\*\*

**Key Words:** ASTM A36 steel, welding, stress relieving, mechanical properties, tensile, fatigue, hardness.

**Description:** ASTM A36 steel is widely used in structural and construction applications due to its good mechanical properties, high weldability, and low cost. This study focused on evaluating how the mechanical properties of an ASTM A36 steel welded joint, joined by the GMAW welding process, are influenced by applying a standard designed stress relieving heat treatment. For this study, tensile, fatigue, hardness and metallographic characterization tests were carried out following the standards of the American Society for Testing and Material ASTM. The results obtained showed significant changes in the mechanical properties of the welded joints when post-heating was applied. A decrease in hardness was observed in the three zones of the welded joint, as well as an increase of approximately 12% in the yield strength and 20,9% in toughness, according to the stress-strain curve of the tensile test. On the other hand, the fatigue test showed that the welded joint, after post-heating, presents a greater durability in cycles when subjected to a certain level of stress. These positive changes in mechanical properties are carried out in order to ensure the durability, safety and efficiency of welded joints in industrial applications.

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Academic program. Director: Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra. PhD. Materials Engineering. Co-director: Laura Ximena Arenas Cordero. Metallurgical Engineer

## Introducción

El acero ASTM A36 debido a su óptima combinación de propiedades mecánicas, soldabilidad y bajo costo, se emplea ampliamente en aplicaciones estructurales y de construcción. Ciertas aplicaciones requieren la unión del material mediante soldadura, siendo un proceso de unión localizado que se suele realizar usando calor, presión o fricción (Silveira et al., 2021). La tecnología de la soldadura se ha extendido prácticamente a todas las industrias y se adapta a situaciones de procesos tanto manual como automático. De hecho, la importancia de realizar soldaduras de forma automática radica en la capacidad de mejorar la eficiencia y la precisión en el proceso de unión, permitiendo mayor productividad y calidad en la soldadura (Yang et al., 2021).

Como consecuencia de estos procesos, se ven afectadas las propiedades mecánicas del material, esto debido a la presencia de tensiones residuales, cambios de fase y afectaciones térmicas, especialmente en la zona afectada térmicamente ZAT, convirtiendo la soldadura en un proceso crítico (Arista et al., 2021)

Es de gran importancia evaluar los cambios microestructurales y las propiedades mecánicas de las juntas soldadas para garantizar seguridad y calidad en los productos finales. Debido al calentamiento localizado y al enfriamiento durante el proceso de soldadura, se produce una distribución de temperatura no uniforme en la junta soldada y sus zonas aledañas, dando como resultado la formación de tensiones residuales (Eisazadeh et al., 2015). Una de las alternativas para eliminar las tensiones residuales, es realizar un tratamiento térmico.

Por lo anterior, se planteó determinar la influencia al aplicar un tratamiento térmico de post-calentamiento como técnica de alivio de tensiones, en las propiedades mecánicas de una junta soldada de acero estructural ASTM A36 por el proceso GMAW. Bajo este enfoque, se realizaron

pruebas mecánicas de tracción, fatiga y dureza, siguiendo la norma ASTM E8-E8M-22, ASTM E606/E606M-21, ASTM E384-11 respectivamente y caracterización metalográfica. Por lo que este estudio es de interés para la industria donde, se suele usar el acero estructural ASTM A36. Permitiendo evaluar la variación de las propiedades mecánicas al realizar un tratamiento térmico de alivio de tensiones, con la finalidad de mitigar fallas de servicio y prolongar la vida útil de los equipos.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Determinar la influencia de un post-calentamiento en las propiedades mecánicas de juntas soldadas a tope por el PROCESO GMAW al acero estructural ASTM A36.

### **1.2 Objetivos específicos**

Desarrollar juntas soldadas a tope de acero estructural ASTM A36 mediante el proceso de soldadura GMAW con tratamiento de post-calentamiento, siguiendo los parámetros establecidos en la norma AWS D1.1/D1.1M:2020.

Evaluar la microestructura de las juntas soldadas obtenidas del acero estructural ASTM A36 antes y después de efectuarse el tratamiento térmico.

Establecer la afectación del post-calentamiento en las propiedades mecánicas en las juntas soldadas.

## 2. Fundamentación Teórica

### 2.1 Acero estructural ASTM A36

Es un acero al carbono de calidad estructural y aplicable para la fabricación de estructuras soldadas, atornilladas o remachadas para la industria de la construcción e ingeniería, cuya composición química se evidencia en la Tabla 1 (ASTM International, 2019).

**Tabla 1**

*Composición química acero ASTM A36*

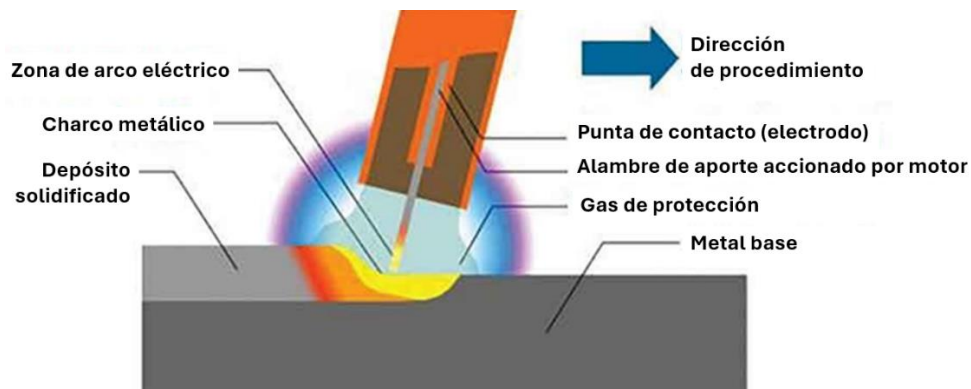
C, Max %	Mn, %	P, Max%	S, Max %	Si, %	Cu, min %
0.26	...	0.04	0.05	0.40 Max	0.20

### 2.2. Proceso de soldadura de arco metálico con gas de protección (GMAW)

Es un proceso de soldadura usado para la unión de piezas metálicas, por medio de un arco eléctrico establecido entre el electrodo metálico sólido consumible y la pieza de trabajo (Castellanos et al., 2020). En este proceso comúnmente se utiliza un gas inerte como sistema de protección del charco metálico. En la Figura 1, se puede encontrar la ilustración del proceso GMAW.

**Figura 1**

*Esquema del proceso GMAW*



Nota. adaptado de Vasdev, R. (2020).

### ***2.2.1 Métodos de transferencia***

El proceso GMAW presenta distintas maneras de depositar el material de aporte, acorde a los parámetros seleccionados como la tensión y la corriente. Se pueden presentar los siguientes métodos de transferencia:

**2.2.1.1 Transferencia por corto circuito.** Esta transferencia ocurre a tensiones y corrientes bajas, por lo tanto, presenta una disminución en la entrada de calor comparado con los otros métodos de transferencia. Generalmente, es usada para soldar piezas de calibres delgados, ya que su deposición del metal suele ser en forma de gota con un tamaño similar al diámetro del electrodo (Castellanos et al., 2021).

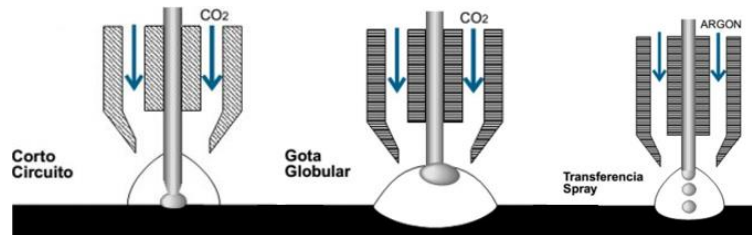
**2.2.1.2 Transferencia globular.** El presente método de transferencia se encuentra situado entre el mecanismo de transferencia del corto circuito y transferencia por spray; por ende, se utiliza tensiones y corrientes moderadas (mayores a modo de corto circuito) (Castellanos et al., 2021). Suele ser usado para soldar materiales con espesores entre 1/8" a 1"; la deposición del material es en forma de gota con un tamaño mayor al diámetro del alambre.

**2.2.1.3 Transferencia por spray.** Este método de transferencia ocurre en atmósferas a base de argón y en altas tensiones y corrientes, por lo tanto, presenta mayor entrada de calor. Se deposita alrededor de 500 y 5000 gotas por segundo con un tamaño de diámetro menor del alambre (Llano, C., 2009), produciendo voluminosos charcos de soldadura. Suele ser utilizado para soldar piezas con grandes espesores debió que por medio de este método se presentan pocos problemas de falta de fusión y penetración.

En la Figura 2, se puede observar la manera en la cual se deposita el material de aporte en cada método de transferencia en el proceso GMAW.

## Figura 2

### *Métodos de transferencia*



Nota. Adaptado de (Ingeniería Online, 2020).

## 2.3 Post Calentamiento

Es un proceso térmico posterior a la soldadura que se realiza para aliviar los esfuerzos causados por el proceso de unión localizado para mejorar las propiedades mecánicas y el rendimiento de las estructuras soldadas a una determinada temperatura (Código de Soldadura Estructural-Acero, 2020). El procedimiento se realiza de acuerdo con la norma AWS D1.1/D1.1M:2020. Sección 7.8.

## 2.4 Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos permiten evaluar el comportamiento de los materiales ante diferentes condiciones de carga. Las propiedades mecánicas a partir de los distintos ensayos ayudan a la caracterización de los materiales y aseguran la calidad de los productos (ASM Handbook, 2000)

### 2.4.1 Ensayo de tracción

Es una prueba mecánica utilizada para determinar la relación entre el esfuerzo y la deformación cuando se somete el material a una fuerza de tracción uniaxial en constante aumento hasta que se produce la falla (Askeland & Wright, 2017). El procedimiento del ensayo se basa en la norma ASTM E8/E8M-22.

Este ensayo nos permite determinar el límite elástico ( $\sigma_y$ ), resistencia última de tracción ( $\sigma_{sut}$ ), el módulo de Young ( $E$ ) y la deformación unitaria ( $\varepsilon$ ), de un material por medio de la gráfica de esfuerzo vs. deformación como se muestra en la Figura 3.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Siendo en la Ecuación 1,  $\sigma$  el esfuerzo (MPa),  $F$  la fuerza uniaxial (N) que se ejerce en la probeta y  $A_0$  el área inicial de la probeta ( $\text{mm}^2$ )

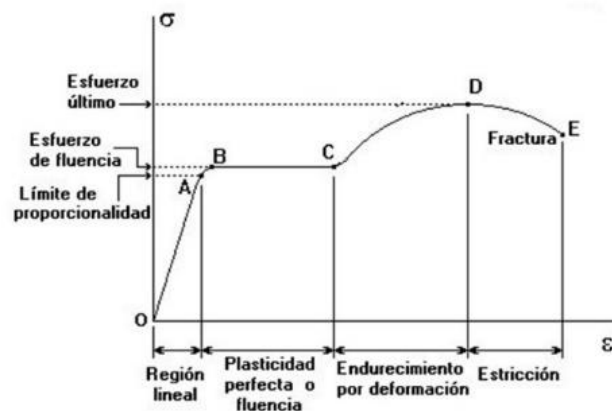
$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (2)$$

En la Ecuación 2,  $L$  es la longitud de deformación que presenta la probeta durante el ensayo y  $L_0$  la longitud inicial. Finalmente, en la Ecuación 3, se muestra el procedimiento para determinar el módulo de elasticidad.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

### Figura 3

*Gráfica Esfuerzo vs Deformación*



Nota. Adaptado de (Acevedo, M., 2019).

### 2.4.2 Ensayo de fatiga

Es una prueba mecánica que consiste en someter al material a un esfuerzo cíclico que puede estar por encima o debajo de la resistencia a la fluencia con una frecuencia específica (Callister & Rethwisch, 2019). Durante este proceso se produce la falla del material al aplicar un número de ciclos suficientes. Las cargas pueden aplicarse axialmente, en torsión o en flexión. Este ensayo permite tener el número de ciclos resistivos bajo un modelo de carga. El procedimiento del ensayo se basa en la norma ASTM E606/E606M-21.

La variabilidad de las cargas durante la fatiga adopta la forma de un patrón sinusoidal, facilitando un análisis más preciso sobre el comportamiento del material.

Durante las pruebas de fatiga, es esencial tener en cuenta el esfuerzo mínimo ( $\sigma_{min}$ ) y el esfuerzo máximo ( $\sigma_{max}$ ). Además, el esfuerzo medio ( $\sigma_m$ ) y la amplitud ( $\sigma_a$ ) están constituidos por dos componentes  $\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$ , de acuerdo con la Ecuación 4 y 5 respectivamente.

Otro factor que se emplea es la relación de esfuerzos **R**, que se define según la Ecuación 6.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (4)$$

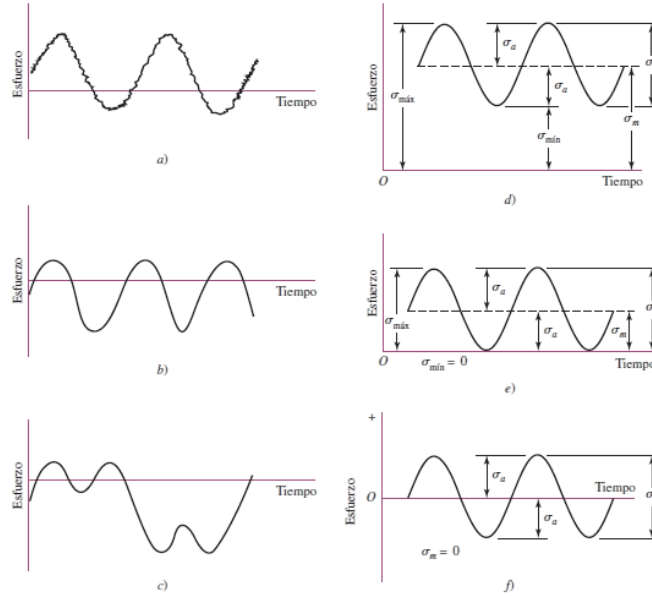
$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (5)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (6)$$

La Figura 4 muestra las relaciones entre el esfuerzo y el tiempo donde, *a*) es el esfuerzo fluctuante con pulsaciones de alta frecuencia; *b*) y *c*) es el esfuerzo fluctuante no sinusoidal; *d*) es el esfuerzo fluctuante sinusoidal; *e*) es el esfuerzo repetido y *f*) es el esfuerzo sinusoidal completamente invertido (Budynas, R., 2021).

**Figura 4**

*Esfuerzos fluctuantes*

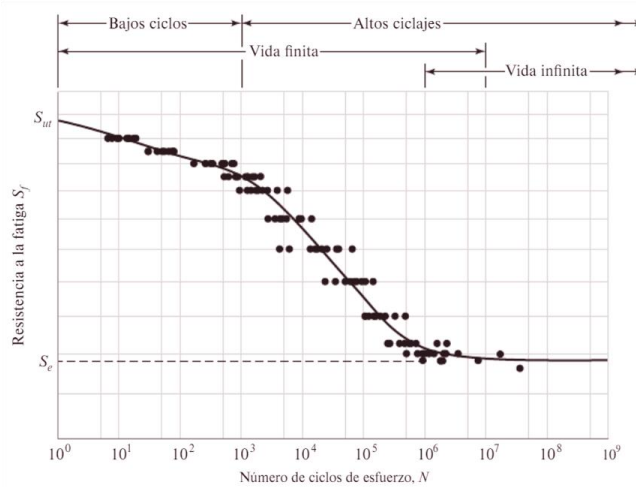


Nota. Adaptado de Budynas, R. G. (2021).

Al realizar un análisis de fatiga, se obtiene el diagrama S-N también llamada curva de Wöhler, establece una relación entre el esfuerzo aplicado (S) y el número de ciclos de carga (N) hasta que el material falle.

**Figura 5**

*Diagrama S-N característico*



Nota. Adaptado de Budynas, R. G. (2021).

Además, existe una representación analítica de la curva S-N, que relaciona el esfuerzo cíclico y el número de ciclos de falla que se expresa por el modelo de Basquin,  $S$  es el valor de esfuerzo al que está sometido el material,  $A$  significa el valor de intersección con el eje de esfuerzo y  $m$  es el coeficiente de endurecimiento por deformación dinámica.

$$S = A * (N)^m \quad (7)$$

### 2.4.3 Ensayo de microdureza

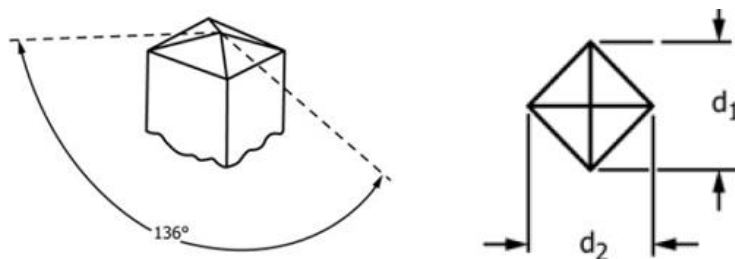
Es un ensayo de microdureza por microindentación que consiste en medir la resistencia superficial del material ante la penetración realizada por un indentador en forma de pirámide presentado en la Figura 6, el cual, se realiza bajo condiciones de carga estática específica, según la norma ASTM E384-22. Donde  $D$  es la media aritmética de  $d_1$  y  $d_2$ , Ecuación 8, y  $P$  la carga aplicada en  $kgf$ , Ecuación 9.

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (mm) \quad (8)$$

$$HV = \frac{1.854 * P}{D} \quad (9)$$

### Figura 6

*Indentador microdureza Vickers*



*Nota.* Tomado de ASTM International. (2022).

## 2.5 Caracterización microestructural

Es un procedimiento que permite observar la microestructura de los metales y sus aleaciones, que se presenta en las zonas de interés (Guzman-Flores et al., 2017). Las muestras por examinar se prepararon metalográficamente a partir de la norma ASTM E3-11.

## 3. Metodología

El estudio de las propiedades mecánicas de juntas soldadas de acero ASTM A36 tras un tratamiento térmico de alivio de tensiones, se llevó a cabo según el procedimiento detallado en la Figura 7.

**Figura 7**

*Diagrama de flujo de ejecución de la investigación*



### 3.1 Unión de juntas a tope de acero ASTM A36

Se soldaron cuatro pares de placas de acero ASTM A36, diseñadas bajo la normativa AWS D1.1/D1.1M:2020; con dimensiones de 15cm x 35cm con espesor de 4.5 mm y una separación entre placas de 1/8". Para esto, se utilizó el equipo de soldadura SWEISS SKY 3550 por el proceso

GMAW con gas protección de Ar-25CO<sub>2</sub>, por el método de transferencia por spray, manejando los siguientes parámetros que se encuentra en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Condiciones equipo GMAW*

Voltaje [ V ]	Amperaje [ A ]	Flujo de Gas [L/min]
24,4	185	15

La máquina de arrastre trabajó bajo los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Parámetros para el mecanismo de arrastre*

Ancho [ in ]	Ciclos [ Hz ]	Velocidad de arrastre [mm/min]	Retrasos [s]		
			Izquierda	Centro	Derecha
0.70	90	200	0,01	0,08	0,01

Finalmente, se obtuvo la junta soldada mostrada en la Figura 8. Este proceso se repitió en cuatro placas adicionales. Donde se realizó inspección visual, sin evidencia de poros superficiales, socavaduras y falta de penetración en las juntas soldadas.

**Figura 8**

*Junta a tope soldada acero ASTM A36*



### 3.2 Obtención de probetas para ensayos mecánicos

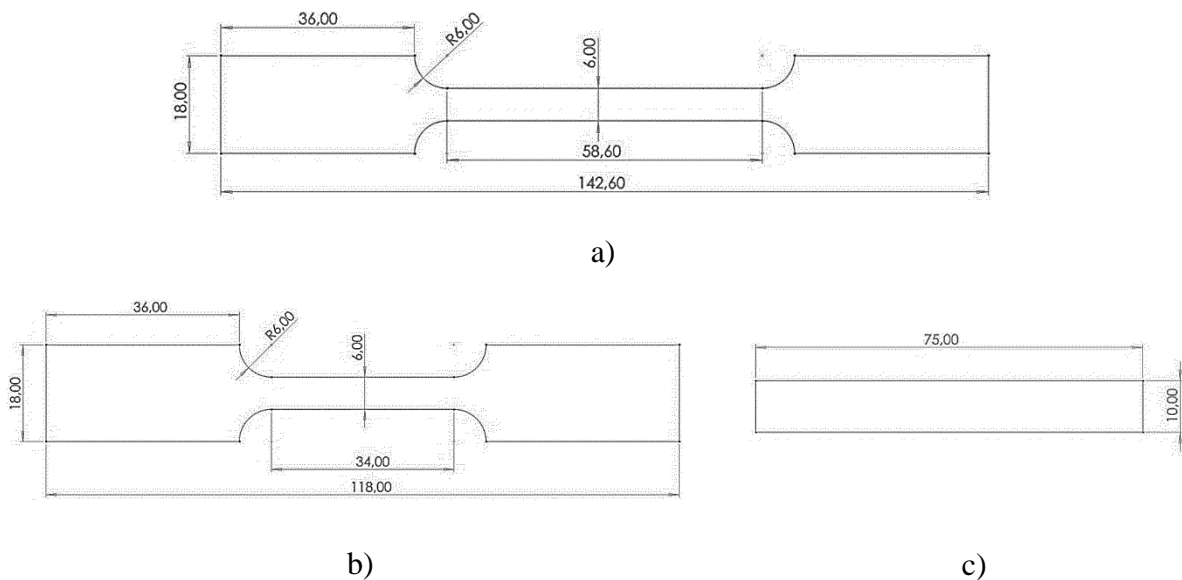
Las probetas para el ensayo de tracción y fatiga se diseñaron bajo los parámetros establecidos por las normas ASTM E8/ E8M-22 y ASTM E606/E606M-21. Además, se extrajeron muestras de la junta soldada para el ensayo de dureza y su respectiva metalografía.

Los ensayos mecánicos se realizaron con siete probetas para tracción, veinte probetas para fatiga, una para dureza y metalografía. De igual modo, se utilizó la misma cantidad para los ensayos con tratamiento térmico.

La geometría de las probetas para la ejecución de los ensayos se puede observar en la Figura 9. Los cortes de las probetas se efectuaron por chorro de agua para evitar alteraciones en propiedades mecánicas del material.

#### Figura 9

*Plano de las probetas. a) Ensayo de tracción. b) Ensayo de fatiga. c) Metalografía*



### 3.3 Aplicación de tratamiento térmico

El tratamiento térmico de alivio de tensiones se ejecutó conforme a los requerimientos de la norma AWS D1.1./D.1.1M: 2020 sección 7.8. Las probetas se cargaron en una mufla a una temperatura de 315°C y se calentaron a una tasa controlada de 6.1 °C/min, Ecuación 10), hasta alcanzar una temperatura de 630°C. Una vez alcanzada esta temperatura, se mantuvo un periodo de sostenimiento de 40 minutos para permitir la recristalización y el alivio de las tensiones internas. Finalmente, se llevó a cabo un enfriamiento lento a una velocidad aproximada 1 °C/min hasta los 315°C, momento en el cual se retiraron las probetas del horno.

$$\frac{220 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}}{0.6} = 366.67 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h} = 6.1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \quad (10)$$

### 3.4 Ejecución de ensayos mecánicos

#### 3.4.1 Ensayo de tracción.

Las probetas fueron evaluadas en la máquina universal de ensayos mecánicos MTS BIONIX de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, bajo la norma ASTM E8/E8M-22. Se aplicó un esfuerzo axial en cada una de ellas hasta su rotura con una velocidad de deformación de  $V_{def} = 4 \text{ mm} / \text{min}$ , valor que se encuentra dentro del rango indicado por la norma, el cual establece una velocidad de deformación de 0,05 a 0,5 mm/mm de la longitud de la sección reducida (58,6 mm) por minuto, así mismo, se captó la elongación de cada probeta a partir del extensómetro láser MTS LX 500. Con los datos obtenidos se realizó la gráfica esfuerzo vs. deformación.

### 3.4.2 Ensayo de fatiga

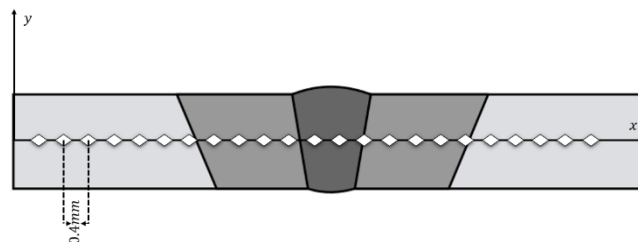
Se ejecutó bajo la norma ASTM E606/E606M-21. Dicho ensayo se efectuó en la maquina MTS BIONIX de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Se sometieron las probetas a cuatro niveles de esfuerzo con respecto a su límite elástico (95%, 90%, 85%, 80%), el cual, se halló en la curva de esfuerzo- deformación obtenida en el ensayo de tracción, también la relación de carga se estableció en un rango de  $R = 0.1$  lo que implica que los ensayos se realizaron bajo un esquema de tracción-tracción. Al finalizar el presente ensayo, se construyó la gráfica de S-N y se realizó su adecuado análisis.

### 3.4.3 Ensayo de microdureza

Se trabajó bajo la norma ASTM E384-11, donde dicho ensayo se llevó a cabo en la máquina BRUKER UMT TRIBOLAB de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Empleando un indentador punta de diamante. Cada toma de dureza se efectuó aplicando una fuerza de 4 Newton (N) o 0,497 kgf, durante 8 segundos, ya que la norma indica no exceder los 10 segundos desde la aplicación inicial de la fuerza hasta que se alcanza la fuerza de prueba. Las microindentaciones se realizaron con una separación de 0,4 mm a lo largo de la probeta, tal como se muestra en la Figura 10.

**Figura 10**

*Toma de micedurezas*



Nota. Adaptado de (Wikimedia Commond, 2005).

### **3.5 Preparación metalográfica**

Con el objetivo de revelar y analizar la microestructura del acero ASTM A36 antes y después de un post calentamiento de alivio de tensiones, de la zona de fusión (ZF), la zona afectada térmicamente (ZAT) y el material base (MB), se realizó la preparación metalográfica bajo la norma ASTM E3-11. Las piezas se sometieron a desbaste y pulido hasta tener un acabado superficial tipo espejo, se atacaron con una solución de nital al 2% con un tiempo de inmersión de 2 a 5 segundos. Luego del ataque, las muestras se lavaron con etanol y se secaron con aire. Finalmente se observó las microestructuras en el microscopio OLYMPUS GX 71 de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Industrial de Santander.

## **4. Resultados y Discusión**

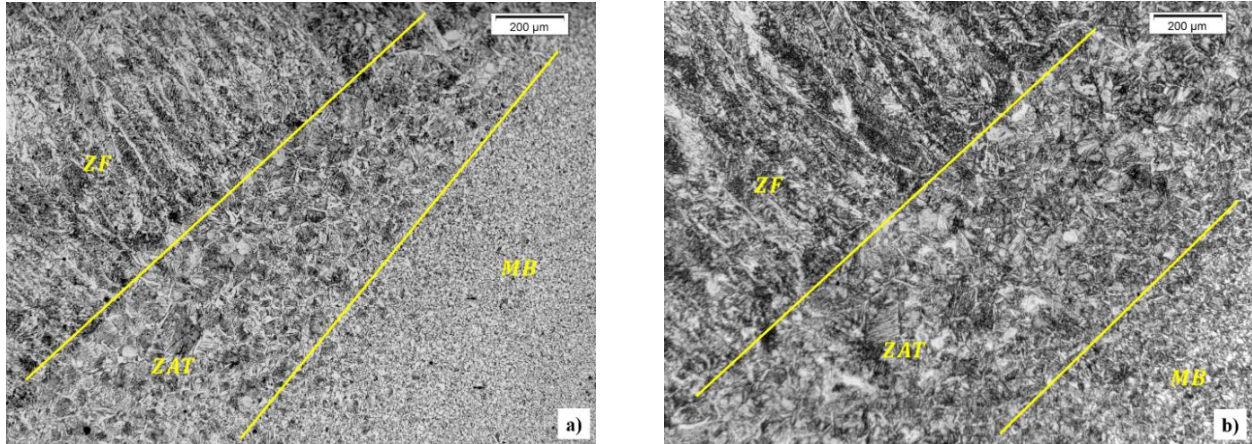
Los resultados presentes en esta sección fueron regidos bajo las normativas mencionadas anteriormente. Por lo tanto, se incluyeron comparaciones entre los ensayos realizados antes y después de la aplicación del tratamiento térmico de alivio de tensiones.

### **4.1 Metalografía**

En la Figura 11 se puede observar las tres zonas de la junta soldada; material base (MB), zona afectada térmicamente (ZAT) y zona de fusión (ZF) antes y posterior al tratamiento de alivio de tensiones.

**Figura 11**

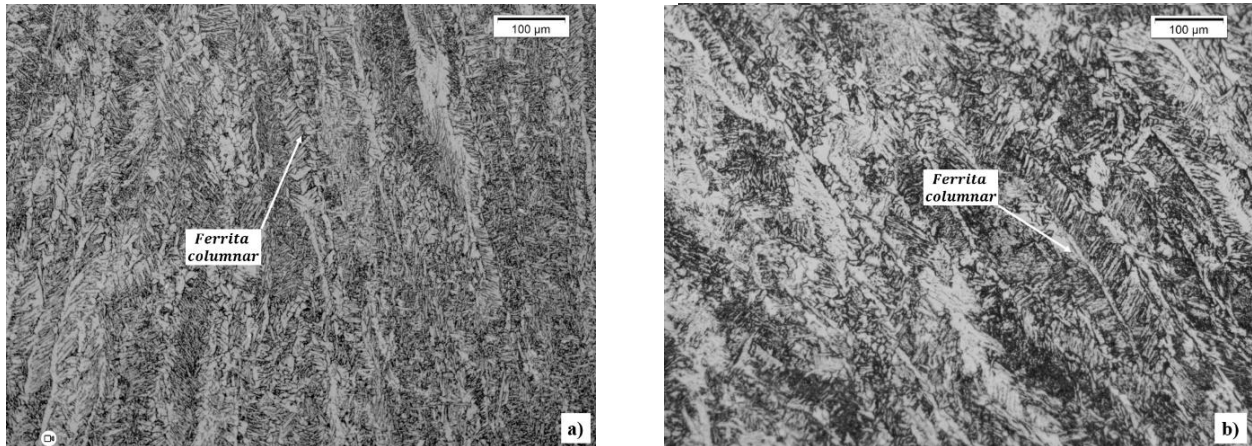
*Metalografía 100X. a) sin tratamiento térmico. b) con tratamiento térmico.*



En la zona de fusión (ZF), se observa una microestructura de ferrita columnar, debido al modo de solidificación direccional del metal fundido que ocurre a altas temperaturas desde los bordes de grano hacia el interior del cordón de soldadura (Rout & Jena, 2020) como se presenta en la Figura 12-a. Al aplicar el tratamiento térmico se presentan más zonas blancas de granos de ferrita, es decir, se homogeniza la estructura con límites de grano más definidos debido a que el carbono presente en la perlita se desplaza hacia las regiones de ferrita y reduce el contenido de cementita Figura 12-b (Yuwono et al., 2022).

**Figura 12**

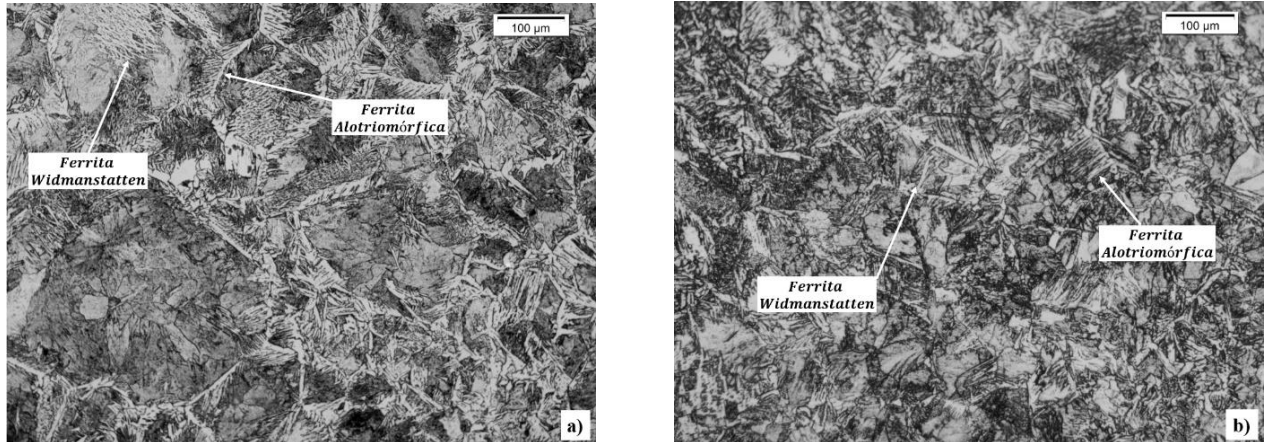
*Zona de Fusión ZF 200X. a) sin tratamiento térmico. b) con tratamiento térmico*



Por otra parte, en la ZAT se presenta ferrita alotriomórfica caracterizada por su crecimiento irregular en algunos límites de grano durante el enfriamiento de la soldadura y ferrita Widmanstätten por su crecimiento alargado en el grano de forma paralela debido a la rápida solidificación Figura 13-a (Guzman-Flores et al., 2017). En la Figura 13-b se observa un cambio en la morfología a causa de la entrada de calor y mayor homogenización en los granos. Se da la presencia de ferrita alotriomórfica con una disposición menos irregular, además de ferrita Widmanstätten con su estructura alargada. (Yuwono et al., 2022).

**Figura 13**

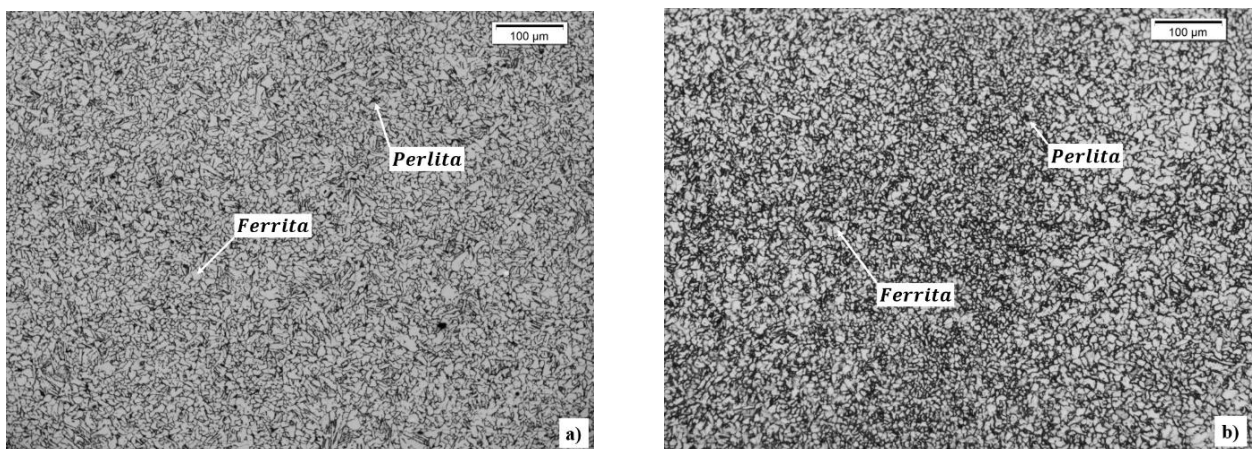
*Zona Afectada Térmicamente ZAT 200X. a) sin tratamiento térmico. b) con tratamiento térmico*



Finalmente, en el MB, se puede apreciar gran cantidad de granos de ferrita (zona clara) y colonias de perlita (zona oscura) de manera distintiva, como se muestra en la Figura 14-a. Se evidencia que luego de aplicar el tratamiento térmico hay una homogenización en la matriz ferrita-perlita lo que genera una mayor uniformidad en la distribución de ambas fases con una disposición más regular.

**Figura 14**

*Metal base MB 200X. a) sin tratamiento térmico. b) con tratamiento térmico*



## 4.2 Ensayo de microdureza

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de dureza, los cuales muestran que la probeta sometida a tratamiento térmico tiene una disminución de la dureza a medida que se acerca a la ZF de la junta soldada.

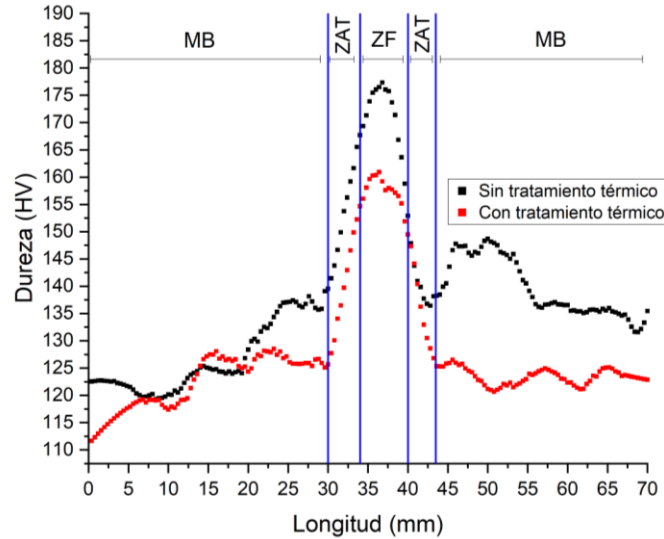
En la ZF, como se observa en la Figura 12-b, se evidenció la formación de una microestructura más blanda (ferrita y perlita), es decir, ocurrió una mayor transformación de la perlita que refleja una disminución de la dureza en esta zona, debido a la reducción de la cantidad de cementita (componente de la perlita), que es una fase dura, y el aumento relativo de la ferrita, que es más blanda.

Para la ZAT, resulta una reducción de la dureza debido a la relajación de tensiones residuales, el crecimiento del grano ferrítico y la homogenización de la perlita. Así mismo, el MB presenta el mismo comportamiento, debido a la presencia de zonas más blandas en el metal, por tanto, reduce la fragilidad del metal mejorando la capacidad del material para absorber energía sin fallar.

En general, las tensiones residuales generadas durante el proceso de soldadura se redistribuyen y a su vez disminuyen, reduciendo la concentración de tensiones internas, provocando la disminución de dureza a lo largo de la junta.

**Figura 15**

*Microdureza con y sin tratamiento térmico*

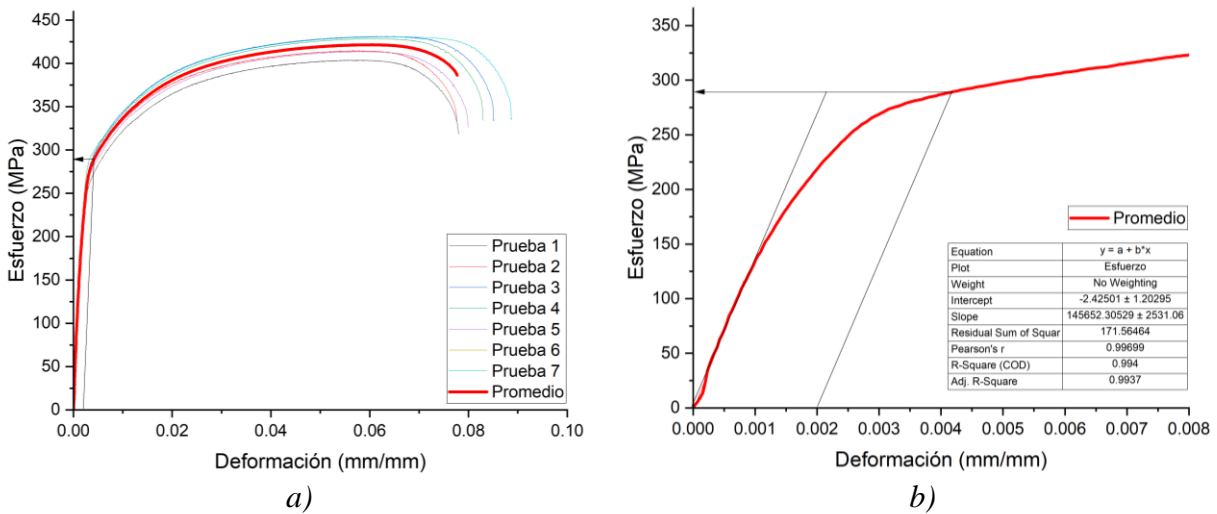


**4.3 Ensayo de tracción**

A continuación, se puede observar los resultados obtenidos en el ensayo de tracción y a su vez propiedades que se pueden determinar a partir de la gráfica.

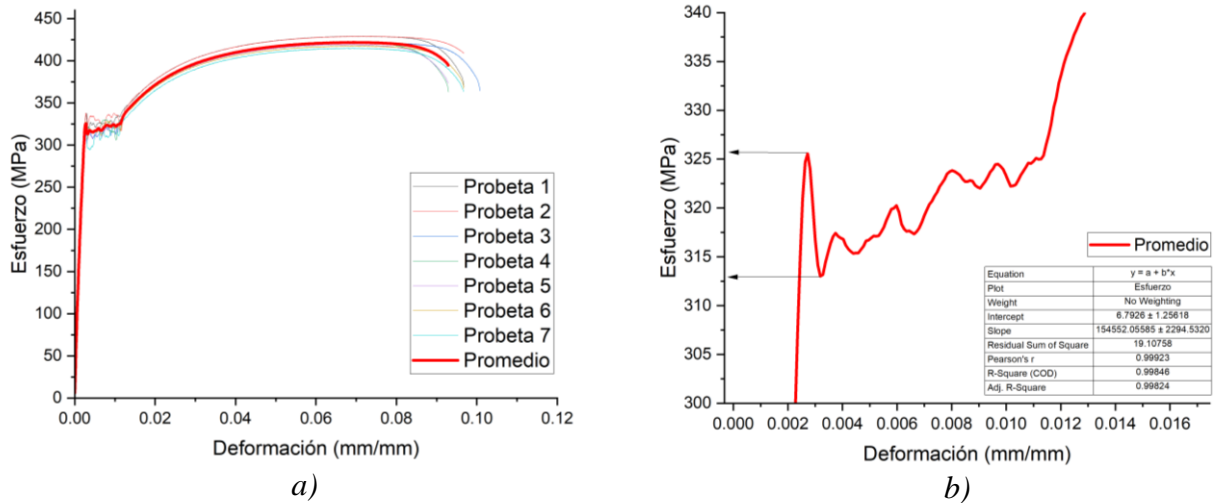
**Figura 16**

*a) Curva Esfuerzo vs Deformación sin tratamiento térmico. b) Punto de fluencia sin tratamiento térmico*



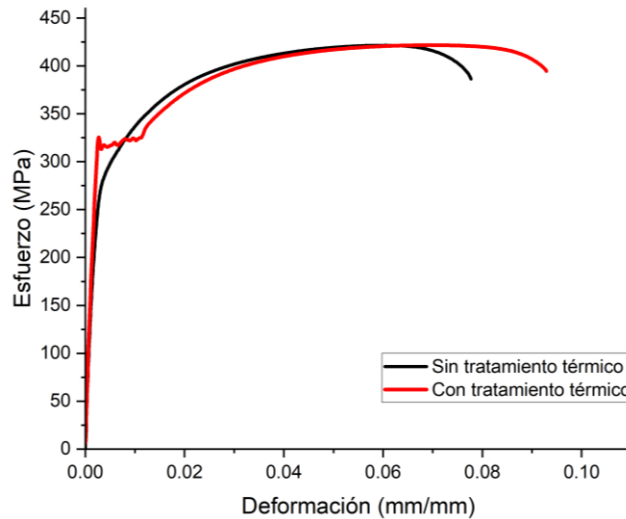
**Figura 17**

a) Curva Esfuerzo vs Deformación con tratamiento térmico. b) Punto de fluencia con tratamiento

**Tabla 4**

Propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tracción

Probetas	Esfuerzo último de tracción $\sigma_{ut}$ (MPa)	Límite de fluencia $\sigma_y$ (MPa)	Deformación unitaria (%)	Módulo de elasticidad (GPa)	Tenacidad MJ/m <sup>3</sup>
Sin tratamiento térmico	421.610	289.772	7.773	145.652	30.033
Con tratamiento térmico	421.820	325.562 Máx	9.289	154.552	36.304

**Figura 18***Comparación de ensayo de tracción*

En la Tabla 4, se puede apreciar algunas propiedades mecánicas halladas a partir de la curva esfuerzo-deformación. Al aplicar un recocido de alivio de tensiones, se evidencia una mejoría en las propiedades de la junta soldada; se puede apreciar que en las probetas con tratamiento térmico en la curva de esfuerzo-deformación como se muestra en la Figura 18, se presenta el límite de fluencia aparente donde indica que la junta soldada entra en una zona elástica-plástica, que se observa típicamente en materiales dúctiles que, al aplicar una fuerza en la soldadura, la carga se distribuye homogéneamente a lo largo del material, por otro lado, el límite de fluencia presentó un aumento del 12,4% con respecto a la juntas sin tratamiento térmico.

El esfuerzo último de tracción tiene un aumento no significativo del 0,05% con respecto a la probeta sin tratamiento térmico. Por otro lado, la tenacidad aumentó un 20,9% en comparación con la junta sin post-calentamiento, mientras que la deformación unitaria incrementó un 19,5%, lo que mejora la capacidad del material de soportar una mayor carga sin presentar falla, es decir, la junta soldada con tratamiento térmico demostró ser más dúctil.

Finalmente, se evidenció una variación del 6,1% en el módulo de elasticidad con respecto a la junta soldada sin tratamiento térmico, aunque el alivio de tensiones genera cambios en las propiedades mecánicas, este cambio se atribuye principalmente a un error de medición en el extensómetro usado durante el ensayo.

#### 4.4 Ensayo de fatiga

En la Tabla 5, se puede apreciar los valores de esfuerzos a los que fueron sometidas las probetas en cada nivel.

**Tabla 5**

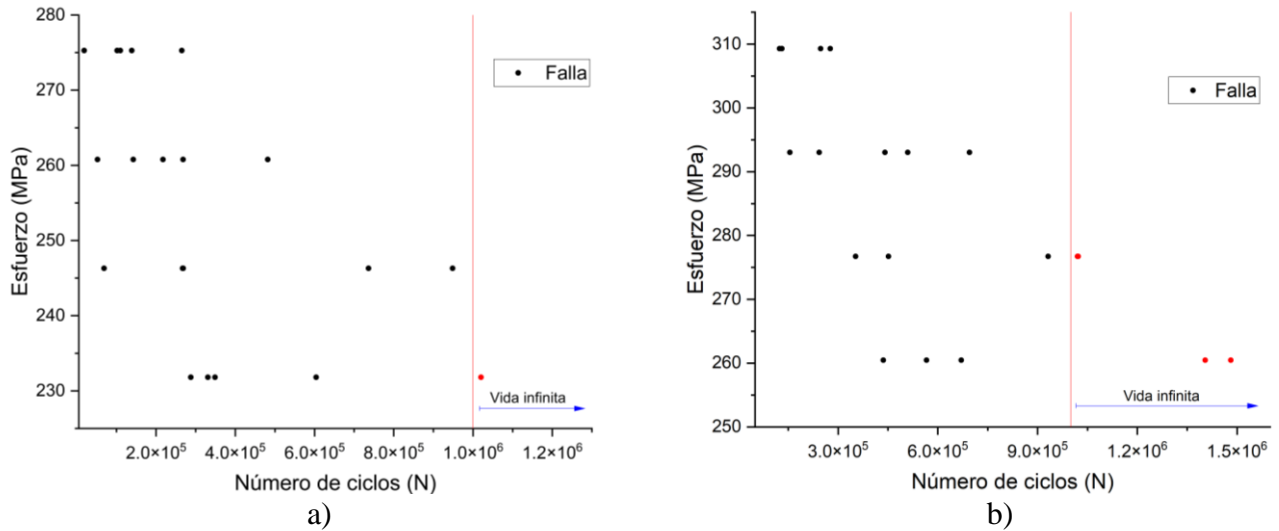
*Niveles de esfuerzo en ensayo de fatiga*

<b>Probeta</b>	<b>Niveles</b>	<b><math>\sigma_{m\acute{a}x}</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_{m\acute{i}n}</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_m</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_a</math> (MPa)</b>
Sin tratamiento térmico	1	275.283	27.5283	151.406	123.877
	2	260.795	26.0795	143.437	117.358
	3	246.306	24.6306	135.468	110.838
	4	231.818	23.1818	127.500	104.318
Con tratamiento térmico	1	300.978	30.098	165.538	135.440
	2	285.137	28.514	156.825	128.312
	3	269.296	26.930	148.113	121.183
	4	253.455	25.346	139.400	114.055

Los datos obtenidos de los ciclos resistivos en los distintos niveles de esfuerzos aplicados en el ensayo de fatiga, se puede observar en la Figura 19, a continuación:

**Figura 19**

*Resultados del ensayo de fatiga: a) sin tratamiento térmico, b) con tratamiento térmico*

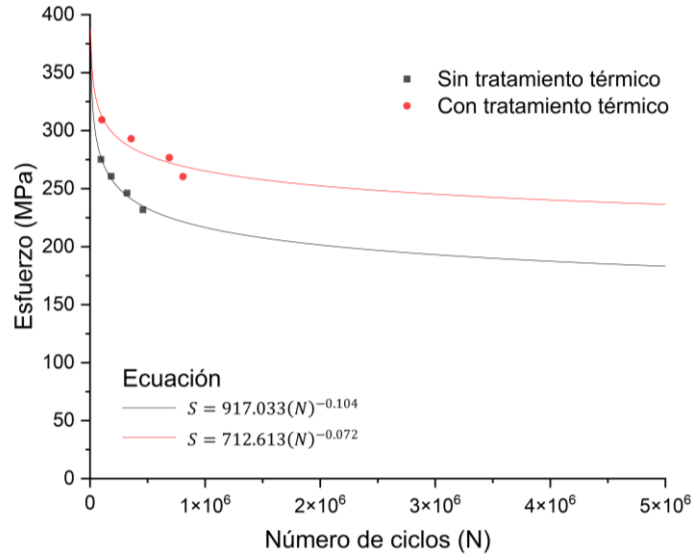


La curva de Basquin tiene un modelo característico  $S = A * (N)^m$ , donde  $S$  es el valor de esfuerzo a la que es sometida la probeta,  $A$  representa el valor de intersección con el eje de esfuerzo (coeficiente de resistencia a la fatiga) y  $m$  hace referencia al coeficiente de endurecimiento por deformación dinámica, que representa la capacidad de deformación plástica. En la Tabla 6, se puede apreciar el modelo de la curva de Basquin antes y después de efectuar el alivio de tensiones en la junta soldada.

**Tabla 6**

*Ecuación de curva S-N de junta soldada sin y con tratamiento térmico*

Proceso	Ecuación de la recta S-N	Coefficiente $m$	Variable A
Sin tratamiento térmico	$S = 917.033(N)^{-0.104}$	-0.104	917.033
Con tratamiento térmico	$S = 712.613(N)^{-0.072}$	-0.072	712.613

**Figura 20***Curva S-N con y sin tratamiento térmico*

$$\text{Sin tratamiento térmico} \quad S = 917.033(N)^{-0.104} \quad (11)$$

$$\text{Con tratamiento térmico} \quad S = 712.613(N)^{-0.072} \quad (12)$$

Se establece una relación entre las Ecuaciones 11 y 12, donde el número de ciclos (N) influye en la razón entre los esfuerzos, es decir, depende tanto de una constante como de una diferencia que varía con N.

$$\frac{S_{Sin TT}}{S_{con TT}} = 1.287(N)^{-0.032} \quad (13)$$

En el ensayo de fatiga al aplicar el alivio de tensiones se observa una mejora en la resistencia a la tracción estática en la curva real de tracción del 28,7% de la junta soldada con post-calentamiento con respecto a la soldadura sin tratamiento térmico. Por otro lado, hay una mejora logarítmica en base diez con respecto al número de ciclos del 3,2% de la resistividad del esfuerzo en relación con la junta sin tratamiento térmico.

## 5. Conclusiones

Al aplicar el proceso GMAW a juntas soldadas a tope de acero ASTM A36, siguiendo los parámetros de la norma AWS D1.1/D1.1M:2020 y un tratamiento de post-calentamiento, se logró obtener soldaduras de alta calidad con propiedades mecánicas mejoradas.

El análisis microestructural de las juntas soldadas de acero ASTM A36 reveló cambios significativos tras el tratamiento térmico de post-calentamiento. La homogenización observada en el material base, caracterizada por una mayor uniformidad en la distribución de los granos de perlita y ferrita, permite la disminución de esfuerzos residuales que contribuye a una mejora sustancial en la resistencia a la fractura, ductilidad y la capacidad de las juntas soldadas para soportar cargas dinámicas y estáticas.

Respecto a las propiedades mecánicas, se observó una mejoría en cada una de ellas; la dureza disminuyó, por ende, aumentó la ductilidad de la junta soldada, siendo beneficioso para aplicaciones donde se requieren tener un equilibrio entre la resistencia y ductilidad, como en las estructuras de construcción. En el ensayo de tracción, a través de la curva de esfuerzo-deformación con tratamiento térmico, se observa una zona elástoplástica, característica en materiales dúctiles. Esta zona no se presenta en la junta sin tratamiento. Para las juntas soldadas sometidas al alivio de tensiones, presentan una mayor deformación antes de la fractura, por ende, su tenacidad aumentó un 20,9%.

Los resultados del ensayo de fatiga revelaron un incremento en la vida útil de las juntas soldadas tras la aplicación del tratamiento de alivio de tensiones. Este hallazgo indica que la homogenización microestructural inducida por el post-calentamiento permitió que las juntas soldadas soportaran un número de ciclos mayor con respecto a las juntas sin tratamiento. En concreto, se presentó un incremento del 28,7% en la resistencia a la tracción en el material cuando

se realiza el tratamiento térmico. Así mismo, el tratamiento térmico contribuye a una mejora logarítmica del 3,2% en el número de ciclos de fatiga y permite un aumento en la capacidad de la junta soldada para resistir cargas cíclicas.

El tratamiento térmico de alivio de tensiones aplicado a juntas soldadas a tope de acero ASTM A36, realizadas mediante el proceso GMAW, demostró ser una herramienta eficaz para mejorar significativamente las propiedades mecánicas de las uniones. Específicamente, se ha observado un incremento del 0,05% del esfuerzo último de tracción, 19,5% de la deformación unitaria y 20,9% de la tenacidad con respecto a la junta soldada sin post-calentamiento en los ensayos estáticos. En el ensayo de fatiga, se determinó el incremento del 28,7% en la resistencia a la tracción de las juntas soldadas con tratamiento térmico y una mejora logarítmica en base diez del 3,2% en el número de ciclos, en comparación con las juntas sin alivio de tensiones en relación con el comportamiento dinámico. Estas mejoras se traducen en un mayor rendimiento y confiabilidad de las estructuras soldadas, contribuyendo a una mayor seguridad en aplicaciones industriales.

## **6. Recomendación**

Para futuros proyectos relacionados con este tema de investigación, se recomienda un estudio comparativo de alivio de tensiones empleando otros procesos de soldadura, como el proceso SMAW, el cual es ampliamente utilizado en la industria. Este análisis permitirá evaluar la eficiencia de cada método en términos de reducción de tensiones residuales, microestructura y propiedades mecánicas, adicionando un estudio de la resistencia a la corrosión de las juntas soldadas antes y después del alivio de tensiones.

### Referencias Bibliográficas

ASTM International. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM E3-11.

ASTM International. Standard Specification for Carbon Structural Steel, ASTM A36/A36M-19.

ASTM International. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM E384-11.

ASTM International. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM E606/E606M-21.

ASTM International. Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8/E8M-22.

ASTM International. Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, ASTM E92-23.

AWS. Structural Welding - Steel. AWS D1.1/D1.1M:2020.

Arista, B. V., Flores, I. G., González, C. E. C., Vargas, L. R., & Villasana, J. del P. (2021). On the effect of  $Q_n$  e  $t$  on compressive residual stresses and ductile toughness of dissimilar HAZ in robotic GMAW joints between A572-50 and A36 steels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(5–6), 1535–1546.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06622-5>

Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales* (7th ed.).

ASM International. (2000). *ASM Handbook, Vol 8: Mechanical Testing and Evaluation*.

Budynas, R. (2021). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2019). *Ciencia e ingeniería de materiales*.

Castellanos-González, O. M., Moreno-Uribe, A. M., Ramón-Ramón, S. A., & Jácome, J. L. (2021).

Evaluación de la transferencia metálica y estabilidad del proceso GMAW. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3), 47–60. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021003>

Eisazadeh, H., Achuthan, A., Goldak, J. A., & Aidun, D. K. (2015). Effect of material properties

and mechanical tensioning load on residual stress formation in GTA 304-A36 dissimilar weld. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.021>

*Ensayos de dureza | Struers.com.* (s. f.). <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing>

Guzman-Flores, I., Vargas-Arista, B., Gasca-Dominguez, J. J., Cruz-Gonzalez, C. E.,

González-Albarrán, M. A., & del Prado-Villasana, J. (2017). Efeito do movimento da tocha na

microestrutura, resistência à tração e ao impacto, e fratura da ZAC e cordão de solda por processo GMAW robotizado em aço ASTM A36. *Soldagem e Inspecao*, 22(1), 72–86. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2201.08>

Ingeniería Online. (2020, 27 octubre). *PROCESO DE SOLDADURA GMAW | Ingeniería Online.*

Ingeniería Online. <https://www.ingenieriaonline.com/proceso-de-soldadura-gmaw/>

Kellai, A., Kahla, S., Dehimi, S., Kaba, L., & Boutaghou, Z. (2022). Effect of post weld heat

treatment on the microstructure and mechanical properties of a gas-tungsten-arc-welded 304 stainless steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(11–12), 8171–8186. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09896-5>

- Llano, C. (2009). Soldadura GMAW - MIG/MAG, un proceso rápido, limpio y versátil. *Revista VirtualPRO*. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/soldadura-gmaw---mig-mag-un-proceso-rapido-limpio-y-versatil>
- Monterrosa, M. J. A., Uribe, C., Luispeña, & Rafaelredondo. (2019). ENSAYO DE TRACCIÓN DE PROBETAS METÁLICAS. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/331310495\\_ENSAYO\\_DE\\_TRACCION\\_DE\\_PROBETAS\\_METALICAS/figures](https://www.researchgate.net/publication/331310495_ENSAYO_DE_TRACCION_DE_PROBETAS_METALICAS/figures)
- Rout, P. K., & Jena, P. C. (2020). Mechanical Characterization and Microstructural Study of Carbon Steel Welded Joint Made Under SMAW and GMAW Processes. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 847–855. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2696-1\\_82](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2696-1_82)
- Serrati, D. S. M., Silva, R. M., Wiezel, J. G. G., Cunha, D. B., de Araújo, D. B., & Vilarinho, L. O. (2023). Effects of heat and vibration treatments for welding on residual stresses and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(3–4), 1473–1481. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12011-x>
- Silveira, G. M. S., Jorge, J. C. F., de Souza, L. F. G., Mendes, M. C., Almeida, F. A. C., Filho, W. A. S., Costa, J. F. M., & Chuvas, T. C. (2021). Microstructural characterization and mechanical properties of high-strength steel weld metals obtained by GMAW process with rotating electrode (GMAW-RE). *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(4). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02932-7>
- Standard Specification for Carbon Structural Steel 1*. (n.d.). [https://doi.org/10.1520/A0036\\_A0036M-19](https://doi.org/10.1520/A0036_A0036M-19)

- Yang, L., Wang, H., Huo, B., Li, F., & Liu, Y. (2021). An automatic welding defect location algorithm based on deep learning. *NDT and E International*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102435>
- Yuwono, I., Tranggono Agus Salim, A., Cahya Aditama, C., Rosallino, R., Rohmatul Nugroho, S., Eka Febrianti, D., & Aditama, R. (2022). An Analysis of GMAW Welding Connections on A36 Material with a Heat Treatment and Rapid Cooling Process. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 8(1), 14–19.