

ANÁLISIS MICROGRÁFICO DE SOLDADURA SMAW

Micrographic analysis of SMAW welding
Análise micrográfica de soldagem por SMAW

Juan Salamanca Sarmiento^a, Nelson Iván Villamizar Cruz^b, Edwin
Giovanny Casallas Ramírez^c, Juan Andrés García Acosta^d, Juan David
Rivera Zuluaga^e

^a Ingeniería mecánica, Semillero de materiales y procesos, Universidad Santo Tomás – Seccional Tunja;
juan.salamanca@usantoto.edu.co

^b Ingeniería mecánica, Semillero de materiales y procesos, Universidad Santo Tomás - Seccional Tunja;
nelson.villamizar@usantoto.edu.co

^c Facultad Ingeniería Mecánica, Semillero de materiales y procesos, Universidad Santo Tomás Tunja;
edwin.casallasr@usantoto.edu.co

^d Facultad Ingeniería Mecánica, Semillero de materiales y procesos, Universidad Santo Tomás Tunja;
juan.garciaa@usantoto.edu.co

^e Facultad Ingeniería Mecánica, Semillero de materiales y procesos, Universidad Santo Tomás Tunja;
juan.riveraz@usantoto.edu.co

Recibido: 13 de mayo 2025. Aceptado: 11 de septiembre 2025. Publicado: 7 de noviembre 2025.

Resumen— El estudio se centra en analizar la microestructura del acero de bajo carbono AISI 1020 tras ser sometido al proceso de soldadura *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Para ello, se prepararon muestras tanto del material original como de las zonas afectadas por el calor (ZAC) generado durante la soldadura. Las probetas se montaron en resina poliéster, se pulieron y se atacaron químicamente con una solución de Nital al 5%, lo que permitió resaltar las fases presentes en el material, como ferrita, perlita y martensita. Mediante el uso de un microscopio metalográfico se capturaron imágenes a diferentes aumentos (100x, 200x y 400x), evidenciándose que las áreas próximas al cordón, en el material base mostró matriz ferrítica con perlita dispersa y tamaño de grano fino; en la ZAC se observó crecimiento de grano y morfologías aciculares compatibles con transformación a alta velocidad de enfriamiento (bainita / martensita); mientras que el cordón evidenció granos columnares con predominio de ferrita y menor fracción perlítica. Estos resultados permiten establecer una correlación entre los parámetros del proceso de soldadura y las modificaciones en la microestructura, lo que resulta fundamental para optimizar la calidad e integridad de las uniones soldadas.

Palabras clave: Ferrita, Metalografía, Perlita, SMAW, Soldadura eléctrica.

Abstract— The study focuses on analyzing the microstructure of low-carbon AISI 1020 steel after being subjected to the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process. For this purpose, samples were prepared from both the base material and the heat-affected zones (HAZ) produced during welding. The specimens were mounted in polyester resin, polished, and chemically etched with a 5% Nital solution, which allowed the phases present in the material—such as ferrite, pearlite, and martensite—to be highlighted. Using a metallographic microscope, images were captured at different magnifications (100x, 200x, and 400x), showing that areas

near the weld bead in the base material exhibited a ferritic matrix with dispersed pearlite and a fine grain size; in the HAZ grain growth and acicular morphologies compatible with high cooling-rate transformations (bainite/martensite) were observed; while the weld bead showed columnar grains with a predominance of ferrite and a lower pearlitic fraction. These results allow a correlation to be established between the welding process parameters and the microstructural changes, which is essential for optimizing the quality and integrity of welded joints.

Keywords: *Ferrite, Metallography, Pearlite, SMAW, Electric welding.*

Resumo— Este estudo tem como objetivo analisar a microestrutura do aço AISI 1020 de baixo carbono após soldagem por arco metálico blindado (SMAW). Para tanto, amostras foram preparadas tanto do material original quanto das zonas termicamente afetadas (ZTA) geradas durante a soldagem. Os espécimes foram montados em resina poliéster, polidos e quimicamente atacados com solução de Nital a 5%, que evidenciou as fases presentes no material, como ferrita, perlita e martensita. Utilizando um microscópio metalográfico, imagens foram capturadas em diferentes ampliações (100x, 200x e 400x). Ficou evidente que as áreas próximas ao cordão no material base apresentaram matriz de ferrita com perlita dispersa e granulometria fina; na ZTA, observou-se crescimento de grãos e morfologias aciculares compatíveis com transformação por resfriamento em alta taxa (bainita/martensita). Já o cordão apresentou grãos colunares com predominância de ferrita e menor fração perlítica. Esses resultados permitem estabelecer uma correlação entre os parâmetros do processo de soldagem e as alterações na microestrutura, o que é essencial para otimizar a qualidade e a integridade das juntas soldadas.

Palavras-chave— *Ferrita, Metalografia, Perlita, SMAW, Soldagem elétrica.*

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de Soldadura eléctrica se aplican principalmente a estructuras de acero, con diversos propósitos, de esta forma se realizan continuos estudios acerca de los cambios que sufre el acero con la variación de la temperatura, producto del proceso de unión. Pero la gran mayoría de los estudios se centran en aceros de altas calidades, y pocas evaluaciones para los aceros más comúnmente usados, como ejemplo se encuentra el Diseño de un procedimiento de soldadura según código ASME, para producción de perfiles de acero (Ariza Ardila, J. A., & Gómez Barrantes, C. F., 2020). Este trabajo corresponde al área de Calidad. Pero otros trabajos son dispersos como el Análisis de la velocidad de soldadura y el efecto de la temperatura, en aceros aleados, evaluados por metalografía (Gramajo, J., Gualco, A., & Svoboda, H., 2021). Y se apoyan en la microestructura de aceros especiales, como la Evaluación metalográfica de cordón de soldadura de piezas de acero inoxidable (Ana M., 2018), o piezas específicas que estudian la fragilidad y las propiedades mecánicas de conectores de acero soldados, afectados por tensión y fricción (Reis, M. M. D. S. 2023).

A diferencia de estos estudios, los aceros de bajo carbono que son los más utilizados en la industria por su disponibilidad y costo, han recibido mucha menor atención, especialmente en análisis micrográficos detallados. esto significa que existe poca información visual y experimental sobre las transformaciones

microestructurales de estos materiales en condiciones reales de soldadura.

Para poder conocer los efectos del Proceso de Soldadura en aceros especiales, es necesario conocer la afectación de la temperatura en los aceros más usados, siempre apoyados en el Ensayo Metalográfico, tal como ocurre en investigaciones sobre la Evaluación de aceros de bajo y medio carbono, junto con acero para corte, de la clasificación AISI-SAE (Sánchez, J. M. V., et al, 2023).

Otro trabajo evalúa la soldabilidad de fundiciones (Rivas, R., Chang, B., & Ríos, E. 2021), al igual que la revisión del Procedimiento de soldadura de dos aceros diferentes (Valero Mondragón, S. M. 2019), también el Análisis metalográfico de un acero 1045 soldado, con pre y poscalentamiento, con el objetivo de reconocer la afectación generada por el choque térmico (Correa Macías, F., 2022). También se analiza la comparación de la microestructura de un acero AISI 1010, en la zona de corte con los procesos de Plasma, Oxicorte y electro hilo. (Gutiérrez Terán, F. V., & Reinoso Toledo, A. A. 2020), de la misma forma se encuentra la revisión de la microestructura de un acero AISI 1010, comparando el método de Oxicorte versus Plasma (Reyna Núñez, A. A. 2019).

El presente trabajo se ocupa de un acero de bajo carbono soldado con el proceso SMAW, una técnica ampliamente utilizada en aplicaciones industriales debido a su

simplicidad operativa, bajo costo y adaptabilidad a condiciones de trabajo variables. De esta forma, se refuerzan los hallazgos de trabajos como el Análisis Metalográfico de acero *AISI 1010*, soldado por proceso de fricción (Huaraca López, A. C., 2022), contrastando con la Revisión de la Estructura Metalográfica de piezas de acero soldadas, revisando las diversas zonas que se forman (Carlos, J., 2022), y la afectación en las propiedades mecánicas de un acero *AISI 1010* soldado, confirmando los cambios con metalografía (da Conceição, L. A. *et al.*, 2019).

Igualmente, es importante el uso de otros ensayos mecánicos, pero la metalografía es un elemento básico en la caracterización de estos procesos, materiales y tratamientos. Este enfoque permite establecer comparaciones estructurales bajo diferentes condiciones de soldadura y deformación (Higuera *et al.*, 2018), resaltando la utilidad de técnicas de análisis como la metalografía en la validación de procesos.

De esta forma, se logra contrastar resultados diversos con un mismo acero (*AISI 1010*), evaluando la deformación del acero *AISI 1010* conformado en frío (Abate, G., Osenda, A. P., & Krahmer, D. M., 2022), o el efecto de los parámetros de soldadura en las propiedades mecánicas y físicas de partes automotrices (Pegorini, E., 2020). Y el trabajo que evalúa la integridad de piezas de acero al carbono soldadas mediante radiografía, metalografía y ensayo de doblez (Cuba Pérez, A., & Tenorio Misto, J., 2021).

El trabajo desarrollado consiste en presentar una caracterización micrográfica detallada del acero *AISI 1020* soldado por *SMAW*, aportando nueva evidencia sobre un material de uso común pero poco documentado en la literatura. Los resultados esperan contribuir al diseño de procedimientos de soldadura más confiables y a la mejora de estrategias de control de calidad en aplicaciones industriales.

Este estudio analiza la conformación de una junta soldada en acero de bajo carbono, mediante la disposición de las piezas a tope con un bisel de 60 grados y la aplicación de tres cordones de soldadura. Posteriormente, se realiza una evaluación metalográfica con el fin de identificar las zonas generadas en el material como resultado del choque térmico inducido por el proceso de

soldadura, lo anterior teniendo en cuenta que en la literatura actual, no se encuentran trabajos que se dediquen a estudiar el acero de mayor empleo a nivel general, como es el acero de bajo carbono, y su afectación debida al efecto del calor y posterior enfriamiento al aire que genera el proceso de soldadura. Por lo anterior el estudio se centra en evidenciar los conocimientos básicos de los libros, pero acompañados por nuevos hallazgos que se deben al proceso de laminado o deformado, del acero empleado.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta sección detalla los elementos y procedimientos experimentales utilizados, y se divide en dos subapartados:

A. Materiales

i) Descripción de los Materiales:

- **Acero *AISI 1020*:** Se trabajaron muestras de lámina de acero de 9,52 mm (3/8”) de espesor y la composición química se presenta en la Tabla 1; este acero fue seleccionado porque representa uno de los materiales de bajo carbono más utilizados en la industria, debido a su disponibilidad, costo reducido y amplio empleo en aplicaciones estructurales y mecánicas, su elección permite obtener resultados con alta relevancia práctica y transferibles a diversos sectores industriales.

Tabla 1. Composición química del acero *AISI 1020*

Elemento	Contenido (% en peso)
Carbono (C)	0.17 – 0.23 %
Manganeso (Mn)	0.30 – 0.60 %
Fósforo (P)	≤ 0.040 %
Azufre (S)	≤ 0.050 %
Hierro (Fe)	Balance restante

Fuente: ASM International. ASM Handbook, Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.

- **Electrodos para procesos de soldadura *SMAW*:** Electrodo 6013 de diámetro 1/8” (3,17 mm) para el cordón de raíz.

- **Electrodo 6013 de diámetro 5/32" (3,93 mm) para los dos cordones de relleno:** la selección del electrodo *E6013* se debe a que es uno de los más empleados en soldadura *SMAW*, por su facilidad de uso, estabilidad del arco y capacidad de trabajar en múltiples posiciones. además, ofrece un acabado limpio y buena penetración en aceros de bajo carbono, como el *AISI 1020*, lo que lo hace ideal para este tipo de ensayos.

- **Materiales para Pulido y Ataque Químico:** Elementos para Pulido metalográfico:

- Lijas para metal N° 120, 180, 220, 320, 400, 500 y 600.
- Paño verde de billar para metalografía
- Alúmina: Luego del pulido con lijas, se realiza un pulido fino usando paños como superficie y polvos abrasivos como alúmina (1 µm) en solución acuosa.
- Reactivo de Ataque: Luego de que la probeta fue pulida, se realizó el ataque químico con solución de Nital al 5%, aplicado durante 10 segundos.
- Resina polimérica: Para realizar la metalografía del material, se cortaron 3 muestras de acero con el fin de encapsularlas en resina polimérica, de marca Quimident.

B. Equipos utilizados

- **Cámara marca LUMENERA:** cámara fotográfica que se conecta al microscopio Óptico para la obtención de las micrografías.
- **Mesa de Pulido Metalográfico:** para el pulido se empleó un equipo con variador de velocidades, y suministro automático de agua.
- **Microscopio Metalográfico Óptico:** Finalmente, las muestras se llevan a un microscopio metalográfico óptico marca Olympus, modelo *GX51*, equipado con iluminación halógena y objetivos plan acromáticos. Este equipo permite realizar observaciones de la microestructura hasta mil aumentos (1000X). Si el interés es observar la microestructura en forma macro, se puede observar a 50X y 100X, pero si se quieren observaciones con mayor detalle, se pueden usar desde 100X, 200X, 300X hasta 500X en un microscopio óptico.

C. Metodología

En el presente trabajo se desarrolló un procedimiento que busca evaluar la microestructura de un acero bajo carbono (*AISI-SAE 1020*), con las propiedades que presenta este acero comercial, para contrastarlo con los cambios microestructurales, que se generan a causa del calentamiento que produce la aplicación de un cordón, dos cordones y tres cordones de soldadura. Las actividades desarrolladas en forma secuencial fueron:

1. Elaboración de las probetas del Material original.
2. Construcción del ensamble para la junta soldada.
3. Aplicación de cordones de soldadura a las piezas.
4. Corte de muestras y construcción de probetas para metalografía.
5. Preparación y análisis micrográfico de las muestras y determinación del tamaño de grano de cada zona.

Para el estudio metalográfico de la soldadura se elaboraron 4 grupos de tres probetas cada uno, teniendo en cuenta que se empleó una muestra comercial de acero, en el estudio se construyó una muestra y dos replicas, para cada análisis.

El Grupo Inicial corresponde a 3 muestras para revisar la metalografía original del acero que se va a soldar, el segundo Grupo corresponde a las probetas que se unen por soldadura con la aplicación del cordón de raíz, el tercer grupo de uniones con aplicación de cordón de raíz y cordón de relleno y el tercer grupo con la aplicación de los tres cordones a la junta (raíz, relleno y presentación), El estudio se realiza a partir de una lámina de acero de 9,52 mm (3/8") de espesor.

i) *Elaboración de las probetas del Material original.*

Se realizó el corte de 3 piezas de la lámina de acero con dimensiones de 20 mm x 20 mm con espesor de 9,52 mm (3/8") de espesor (cf. Figura 1), y luego se montaron en resina para el pulido metalográfico, con el fin de determinar la estructura original del material a soldar.

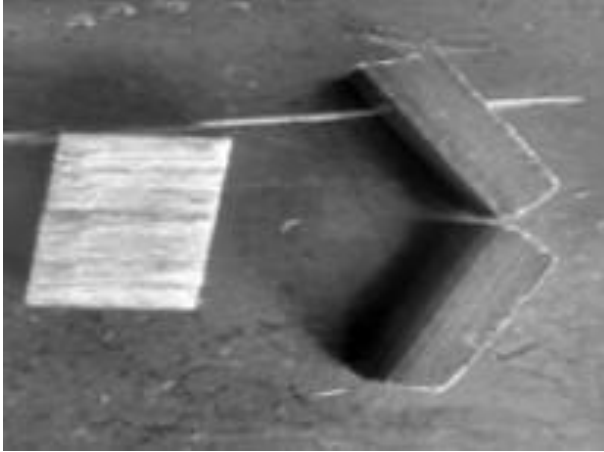


Figura 1. Muestras cortadas de acero sin soldadura.
Fuente: Autores.

ii) Construcción del ensamble para la junta soldada.

El trabajo que se realizó corresponde a la preparación de las láminas para hacer la Unión a Tope con un biselado de acuerdo con el diseño de la junta establecido, siguiendo los pasos descritos a continuación:

1. Corte de 4 láminas de dimensiones 250mmX 73 mm X 9,52 mm (3/8"), cada una (figura 3).
2. Las piezas se biselaron, por las caras que se van a soldar de acuerdo con el diseño (Figura 2).

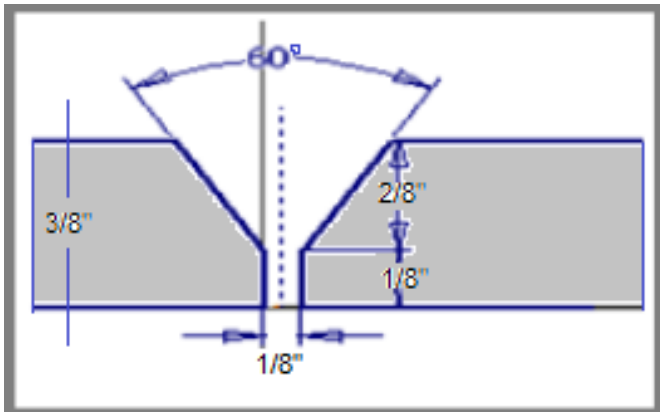


Figura 2. Diseño de la junta
Fuente: Autores.

3. Posteriormente, se procedió a apuntar las piezas a soldar con separación entre piezas de 1/8" (3,17 mm), que por norma debe ser igual al diámetro del electrodo para el primer cordón (cf. Figura 3).

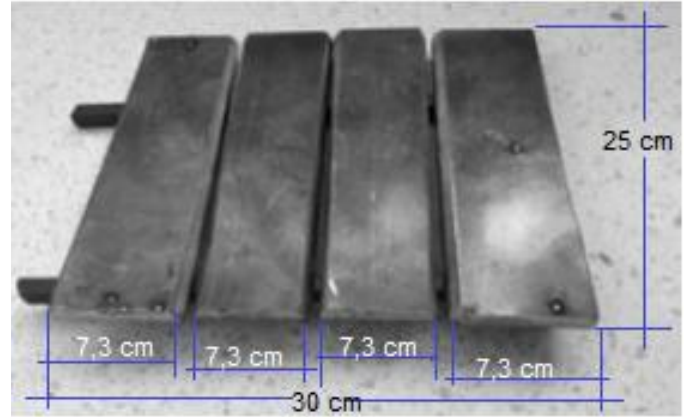


Figura 3. Piezas a soldar cortadas y apuntadas.
Fuente: Autores.

iii) Aplicación de cordones de soldadura a las piezas

Para el proceso de soldadura, se siguieron las indicaciones establecidas en el Código ASME, Sección IX, que indica:

- **Tipo de Junta:** A tope, ranura en V.
- **Posición de soldadura:** Plana (1G).
- **Electrodo empleado:** E-6013 1/8" (3,17 mm.) Cordón de raíz. E 6013 5/32" (3,93 mm.) Segundo Cordón y Tercer Cordón.
- **Ancho máximo de cordón:** 3 diámetros del electrodo aplicado.

A todas las juntas se les aplicó un primer cordón o pase de raíz, posteriormente se aplicó un segundo cordón (de relleno) a solo dos juntas del ensamble inicial (cf. figura 3) y para la última unión, se le aplicó el tercer cordón que se denomina cordón de presentación, como se muestra en la figura 5.

iv) Corte de muestras y construcción de probetas para metalografía

Posterior a la aplicación de los cordones en cada junta, se procedió a hacer cortes transversales a las uniones, como se muestra en la figura 4, lo anterior para obtener las probetas con el área deseada para la construcción de las probetas para el Ensayo de Metalografía.



Figura 4. Muestras cortadas para Metalografía.
Fuente: Autores.

Se debe indicar, que el Ensayo Metalográfico, se realizó a muestras del acero laminado elegido inicialmente para el estudio, y luego a cada muestra con soldadura (1. Cordón de raíz; 2. Cordón de raíz y cordón de relleno y 3. Cordón de raíz, cordón de relleno y cordón de presentación).

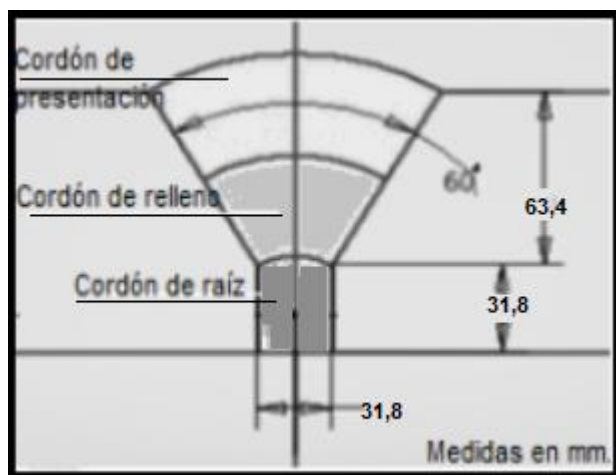


Figura 5. Diagrama de los cordones.
Fuente: Autores.

En la figura 6 se presenta en la parte superior una probeta cortada, sostenida en una prensa, a esta muestra se le aplicó un solo cordón que se realizó con electrodo 6013 de diámetro 1/8" (3,17 mm).

En la parte inferior de la figura 6 se presenta la misma imagen de la probeta con la diagramación del diseño original. Posterior a esta actividad, se encapsuló la muestra en resina polimérica, para hacer el proceso metalográfico.

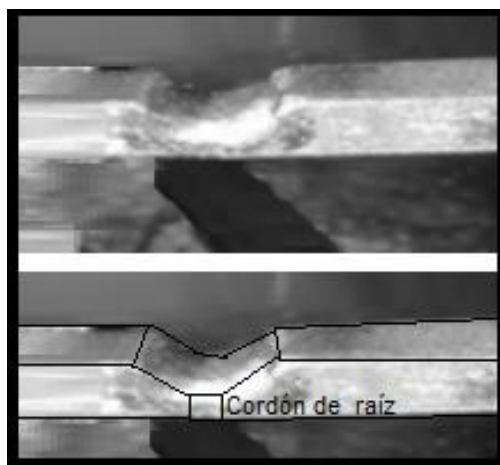


Figura 6. Probeta con aplicación de primer cordón.
Fuente: Autores.

Se debe tener en cuenta que el proceso de soldadura se garantiza con el diseño de la junta inicial, teniendo en cuenta que durante el proceso de soldadura los bordes y límites iniciales se redondean, haciendo difícil el seguimiento del proceso.

El segundo cordón, correspondiente al primer cordón de relleno, se realizó utilizando un electrodo E6013 de diámetro 5/32" (3,93 mm) (cf. Figura 7), y el cordón final, denominado cordón de presentación o de acabado, se ejecutó con el mismo material empleado en el cordón de relleno.

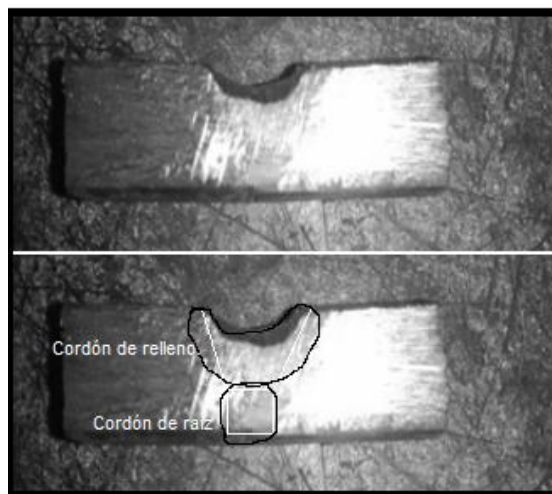


Figura 7. Pieza de soldadura con dos cordones (raíz y relleno), lista para encapsular para metalografía.
Fuente: Autores.

Es importante indicar que se realizó limpieza entre

cordones, para retirar material (escoria) que pudiera generar defectos como inclusión de escoria o poros que afecten la integridad de las muestras. En la figura 8 se presenta la muestra final de la junta soldada con los tres cordones y en la parte inferior, la misma imagen con la diagramación de diseño.

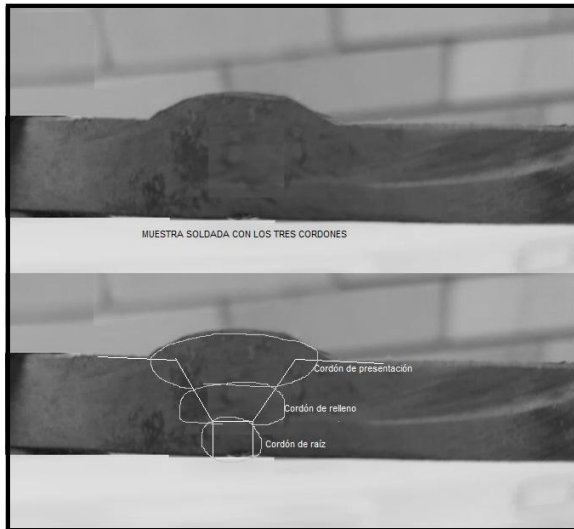


Figura 8. Muestra soldada con los tres cordones.
Fuente: Autores.

v) Preparación y análisis micrográfico de las muestras.

Una vez encapsuladas, las probetas se someten a un proceso de desbaste con lijas de carburo de silicio de grano 150, 220, 320, 400, 500 y 600, utilizando agua como lubricante. Posteriormente, se realiza el pulido con paño de billar y alúmina de 1 μm como elemento abrasivo.

Para revelar la microestructura, se aplica un ataque químico con Nital al 5 % durante 10 segundos. Finalmente, las muestras se analizan en un Microscopio Metalográfico óptico marca Olympus, modelo GX51.

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

Luego de preparar las probetas mediante procedimiento anteriormente descrito. Las imágenes se capturaron a diferentes aumentos, inicialmente se toman a 100X aplicando la norma (Asme sección IX), para comparar el tamaño y forma de grano, luego se hicieron acercamientos a 200X y 400X, para identificar, fases y componentes en detalle.

A. Piezas soldadas

Para la toma de imágenes, se determinaron tres puntos a derecha e izquierda del cordón de soldadura, para cada tipo de probeta, como se muestra en la figura 9, con el fin de observar el cambio en la microestructura generado por la afectación térmica a lo largo de la muestra soldada, considerando la división clásica en zonas: material base, zona afectada por el calor (ZAC) y cordón de soldadura (Lippold & Kotecki, 2005).

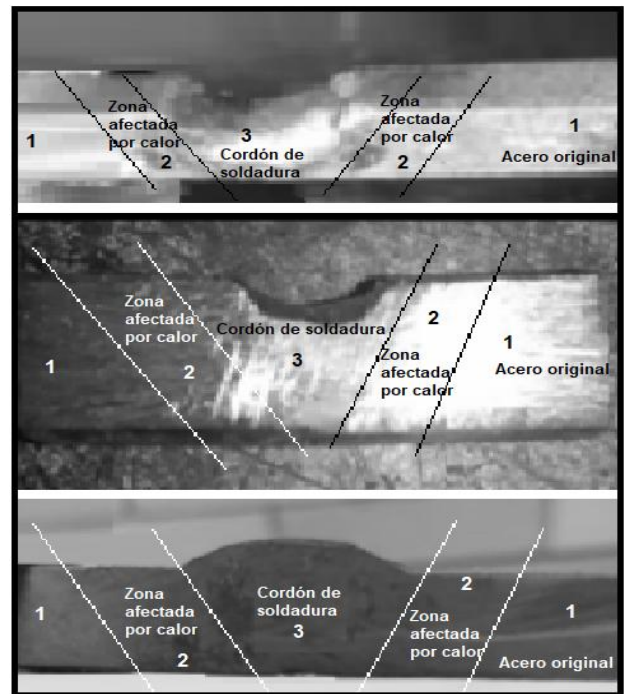


Figura 9. Puntos para toma de micrografías, en cada una de las probetas de 1, 2 y 3 cordones.
Fuente: Autores.

B. Análisis Micrográfico

i) Probeta 1, material original

Se tomaron fotografías en el material original, para poder observar la microestructura inicial de la probeta, como se entrega de fábrica.

Las micrografías de la figura 10 corresponden al material inicial de acero, como se obtiene comercialmente.

En la primera micrografía se observa el material a 100X, notando un área clara en mayoría que posiblemente

corresponde a ferrita y los puntos oscuros y grises son granos de cementita y algo de perlita. Los granos que se presentan son de forma regular, con bordes curvos y ligeramente alargados, debido a que es un material laminado y presenta líneas de estiramiento en la dirección del laminado. De acuerdo con la Norma *ASTM E112* el tamaño de grano es fino entre 8 y 9.

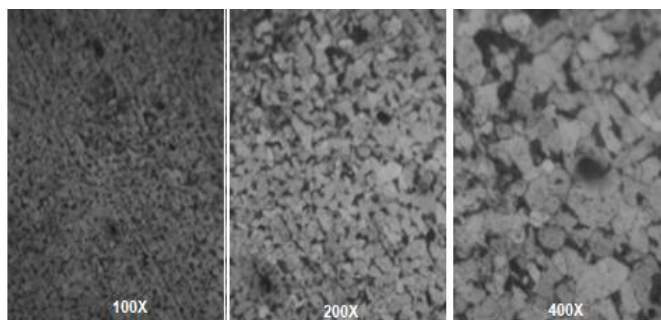


Figura 10. Muestra de acero AISI 1020 original.

Fuente: Autores.

En la imagen central, se observa el material a 200X, presentando mayor claridad y definición de los granos de ferrita, ligeramente alargada y con bordes redondeados, en esta imagen se notan depósitos de perlita y cementita en menor proporción, correspondiente con el contenido de carbono, (Sánchez *et al*, 2023).

Finalmente, en la imagen derecha de la figura 10, se observa el material a 400X que presenta granos claros ligeramente alargados, pero de bordes redondeados y con una orientación oblicua, adicional se notan pequeñas zonas oscuras (cementita) y otras grises (perlita).

ii) Micrografías de las uniones soldadas en la zona 1

Las micrografías de la figura 11 de la zona 1 corresponden al material de la junta que tiene poca o ninguna afectación debida al calor generado en el proceso de soldadura. Revisadas las muestras a diferentes aumentos, de las zonas derecha e izquierda, se muestran las imágenes más comunes en esta área del material soldado.

La imagen de la izquierda corresponde a una micrografía a 100X. En estas imágenes lo más notorio fue la disposición en líneas de los componentes, que se deben al efecto de estiramiento del proceso de laminado del acero comercial.

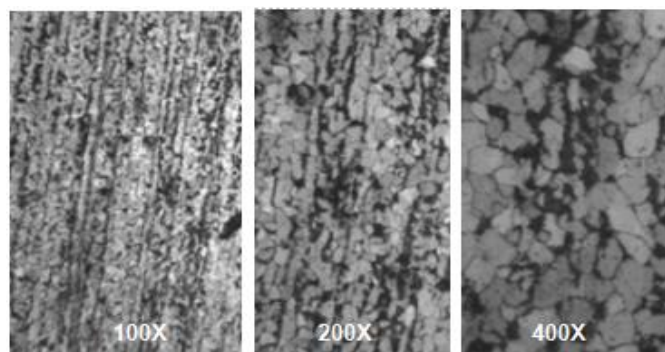


Figura 11. Micrografías de acero a der. del cordón de soldadura.

Fuente: Autores.

En la imagen se nota un predominio de áreas claras alargadas, que corresponden a ferrita y esparcidas en menor proporción áreas oscuras de cementita y áreas grises de perlita; es importante tener en cuenta que las proporciones que se observan concuerdan con el porcentaje de carbono del acero estudiado (0,20%).

Para determinar el tamaño de grano del metal base, se tomó la imagen a 400X, para hacer el conteo de los granos, teniendo en cuenta que los granos de los bordes se cuentan como mitades, sin importar el tamaño y dentro se cuentan cada zona como un grano, para determinar una cantidad aparente de granos. Con este dato se aplican las ecuaciones (1) y (2).

$$Q = 2 \log_2(M/100) \quad (1)$$

Donde:

Q= Factor de cálculo del aumento seleccionado.

M= Aumento en el que se hace el conteo de granos.

$$N = 2^{n_A - 1} \quad (2)$$

Donde:

N= Número de granos en la micrografía (muestra).

n_A = Tamaño de grano aparente según ASTM E 112.

Se aplicó el conteo de granos en la imagen, siendo los granos de color verde los medios y los azules los granos completos (cf. figura 12).

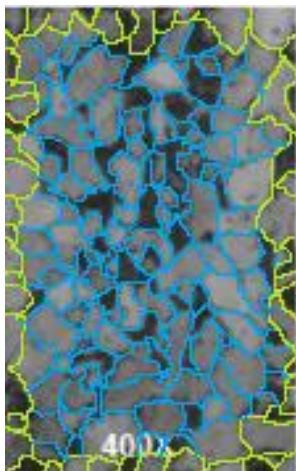


Figura 12. Muestra de material a 400x para conteo de granos.
Fuente: Autores.

Luego del ejercicio de conteo, se determinaron 54 medios granos (bordes) y 126 granos enteros.

Entonces $N = 126 \text{ granos} + 27 \text{ granos} = 153 \text{ granos}$.

Reemplazando N en la ecuación 2, se puede hallar n_A .

$$153 = 2^{n_A-1} \text{ aplicando } \ln, \text{ se tiene:}$$

$$\ln 153 = \ln 2^{n_A-1}$$

Desarrollando: $\ln 153 = (n_A-1) \ln(2)$

Despejando: $n_A = (\ln 153 / \ln 2) + 1$

$n_A = 8,25$ Numero de tamaño de grano aparente ASTM.

Se debe hallar el factor de cálculo por aumento (Ecuación 1).

$$Q = 2 \log_2(M/100)$$

$$Q = 2 \log_2(400/100) \text{ entonces } Q = 4$$

Ahora se debe hallar el número real de ASTM, con la fórmula (3):

$$n = n_A + Q \quad (3)$$

Entonces $n = 8,25 + 4 \Rightarrow n = 12$

De acuerdo a la norma *ASTM E112*, el tamaño de grano del material original, antes de la soldadura corresponde a un tamaño *ASTM* número 12, que indica una granulometría fina, que favorece las propiedades

mecánicas de resistencia y tenacidad.

La imagen central de la figura 11 es una vista a 200 aumentos (200X), y presenta una configuración similar a la imagen a 100 aumentos, con la diferencia que se aprecian mejor los granos que conforman el material, tanto sus bordes redondeados y formas alargadas, con una definición clara entre las zonas claras (ferrita) y las pocas zonas oscuras (cementita y perlita), predominando las líneas de alargamiento del material por el proceso de laminado.

La imagen derecha de la figura 11 muestra el material a 400 aumentos (400X), y en esta se observan los granos de color claro (Ferrita), que tienen formas regulares, ligeramente alargadas y en proporción predominante, mientras que en los bordes de grano formando líneas al lado del material, se presentan pequeñas aglomeraciones de material oscuro y grisoso (cementita y perlita), que forman líneas paralelas a la ferrita. En estas micrografías se puede observar la misma disposición, solo que el tamaño de los componentes es mayor.

En la figura 13 se puede observar como recurso comparativo, las imágenes obtenidas en la misma zona de material base, pero a la izquierda del cordón de soldadura, en estas la diferencia es casi nula.

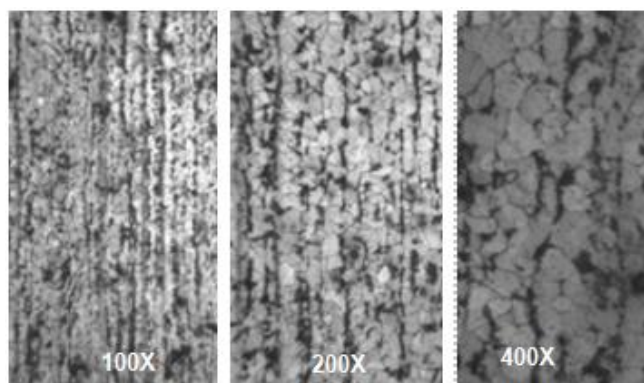


Figura 13. Micrografías de acero a izq. del cordón de soldadura.
Fuente: Autores.

iii) *Micrografías de junta soldada en Zona afectada por Calor*

Para el estudio de esta zona se comienza con el proceso de conteo de granos en la micrografía a 400 aumentos (cf. figura 14), para determinar el tamaño de grano en esta zona del material.



Figura 14. Muestra a 400x para conteo de granos en ZAC.
Fuente: Autores.

Resultado del conteo, se determinaron 64 medios granos (bordes) y 86 granos enteros.

Entonces $N = 86 \text{ granos} + 32 \text{ granos} \Rightarrow N = 118 \text{ granos}$.

Reemplazando N en la ecuación 2, se puede hallar n_A .

$$118 = 2^{n_A - 1} \text{ aplicando } \ln, \text{ se tiene:}$$

$$\ln 118 = \ln 2^{n_A - 1}$$

Desarrollando: $\ln 118 = (n_A - 1) \ln(2)$

Despejando: $n_A = (\ln 118 / \ln 2) + 1$

$n_A = 6,91$ Numero de tamaño de grano aparente ASTM.

Se debe hallar el factor de cálculo por aumento (Ecuación 1).

$$Q = 2 \log_2(M/100)$$

$$Q = 2 \log_2(400/100) \text{ entonces } Q = 4$$

Ahora se debe hallar el número real de ASTM, con la fórmula (3):

$$n = n_A + Q \quad (3)$$

Entonces $n = 6,91 + 4 \Rightarrow n = 10,91$

Se aproxima, entonces $n = 11$

En esta zona se nota el cambio en la granulometría ocasionado por el fuerte calentamiento y posterior enfriamiento (temple) al aire, se notan zonas alargadas

con puntas y de mayor tamaño.

La imagen de la figura 15 a la izquierda corresponde a la constitución granular del acero soldado en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) a 100 aumentos (100X), presentando un componente claro en mayoría (ferrita), con disposición aleatoria y un ligero crecimiento del grano con respecto al material original. La granulometría no muestra una dirección específica, adicional a lo anterior, los componentes grises y negros (anteriormente cementita y perlita) se agruparon en formas alargadas, dentro de la matriz de ferrita, cambiando su estructura por efecto del calentamiento cercano a la fusión (1.400°C aprox.) y el enfriamiento al aire (temple al aire), produciendo zonas con puntas y formas alargadas, características de la formación de Martensita.

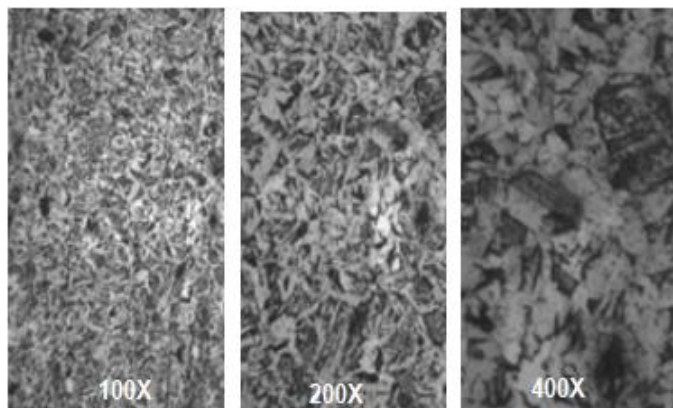


Figura 15. Micrografías de la zona afectada por el calor (ZAC) a derecha del cordón de soldadura.

Fuente: Autores.

En la imagen central se observa el acero soldado a 200 aumentos (200X), con predominio de componente claro (ferrita), con un ligero crecimiento de grano en contraste con la estructura inicial y sin una dirección o desplazamiento definido, intercaladas en la ferrita se observan las estructuras oscuras y grises, inmersas en la estructura ferrítica, estas zonas más oscuras y dispersas corresponden a una microestructura con mayor desorden estructural (martensita), lo anterior se puede evidenciar teniendo en cuenta las formas alargadas y de forma acicular (aguja), que presentan estas agrupaciones. La formación alargada de la martensita obliga al crecimiento ligeramente alargado de los granos de ferrita.

La imagen derecha de la figura 15 corresponde al acero soldado a 400 aumentos (400X) y muestra la matriz de

ferrita, con inclusiones de granos oscuros (martensita) de formas alargadas y en algunos partes aglomeraciones con puntas.

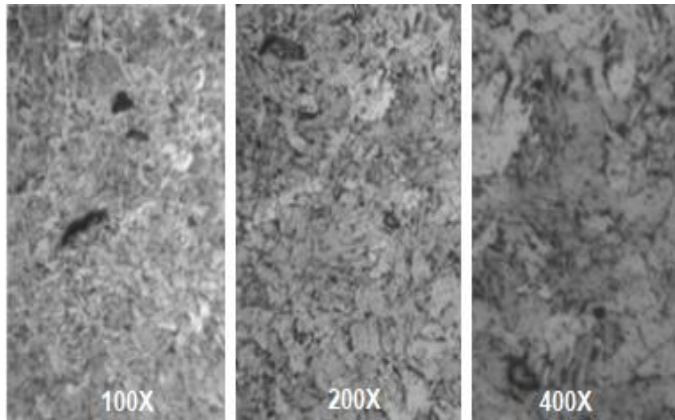


Figura 16. Micrografías de la zona afectada por el calor (ZAC) a izquierda del cordón de soldadura.

Fuente: Autores.

La figura 16 muestra la parte izquierda de la Zona Afectada por el Calor, presentando la estructura similar de las de la zona izquierda.

iv) *Micrografías de junta soldada en Cordón de Soldadura*

Para el estudio de la granulometría del cordón de soldadura se inicia también con la determinación del tamaño de grano, iniciando con el conteo de granos a 400 aumentos (cf. fig. 17). Teniendo en cuenta que esta zona es la que recibe más calor y movimiento, se espera que las características del tamaño de grano privilegien un aumento en la resistencia del material.

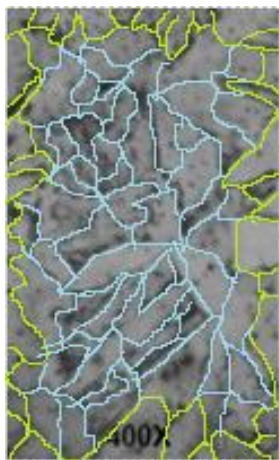


Figura 17. Muestra a 400x para conteo de granos en ZAC.

Fuente: Autores.

Resultado del conteo, se determinaron 38 medios granos (bordes) y 72 granos enteros.

Entonces $N = 72 \text{ granos} + 19 \text{ granos} \Rightarrow N = 91 \text{ granos}$.

Reemplazando N en la ecuación 2, se puede hallar n_A .

$$91 = 2^{n_A-1} \text{ aplicando ln, se tiene:} \\ \ln 91 = \ln 2^{n_A-1}$$

Desarrollando: $\ln 91 = (n_A-1) \ln(2)$

Despejando: $n_A = (\ln 91 / \ln 2) + 1$

$n_A = 6,4$ Numero de tamaño de grano aparente ASTM.

Se debe hallar el factor de cálculo por aumento (Ecuación 1).

$$Q = 2 \log_2(M/100) \\ Q = 2 \log_2(400/100) \text{ entonces } Q = 4$$

Ahora se debe hallar el número real de ASTM, con la fórmula (3):

$$n = n_A + Q \quad (3)$$

Entonces $n = 6,5 + 4 \Rightarrow n = 10,4$

Se aproxima, entonces $n = 10$

En esta zona se nota el cambio en la granulometría ocasionado por el fuerte calentamiento y el movimiento ocasionado por la oscilación y el avance del electrodo, generando crecimiento de grano con alargamiento debido al movimiento.

La imagen izquierda de la figura 18 muestra la zona 3 correspondiente a la metalografía del cordón de soldadura depositado a 100 aumentos, en esta imagen se identifica una matriz de color claro bastante amplia (ferrita) con muy pocos puntos más oscuros (cementita y perlita dispersa), el tamaño de grano observado es mayor en comparación con las micrografías anteriores.

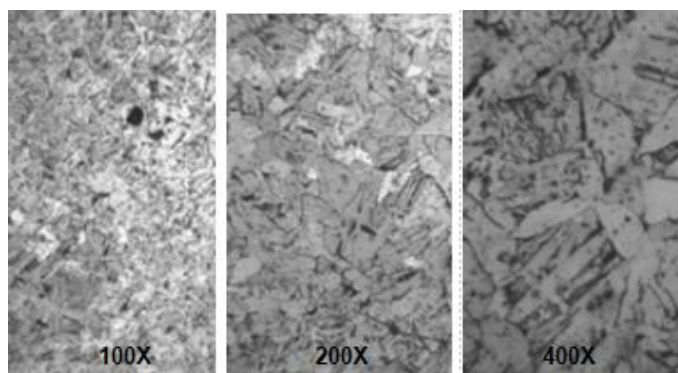


Figura 18. Micrografías del cordón de soldadura.

Fuente: Autores.

La presencia de perlita en esta zona se debe a que el enfriamiento fue más lento en el cordón de soldadura, lo que permitió la transformación de parte de la austenita en perlita en lugar de martensita; por esta razón, no se observan estructuras martensíticas, ya que no se alcanzó la velocidad crítica de enfriamiento necesaria para su formación. También se observan unos puntos oscuros, pero se deben a mugre o inclusiones en la toma de la micrografía.

En la imagen central de la figura 18 se observa la zona del cordón de soldadura a 200 aumentos, permitiendo detallar una geometría del grano más alargada en forma de columna rectangular que se genera por el calentamiento continuado y movimiento del electrodo durante la aplicación del cordón (Schey J., 1990).

El cambio de estructura en el cordón de soldadura se debe a que en esta parte se desarrolla un proceso de fundición localizado inmediato y con desplazamiento regulado, manteniendo el calentamiento en la zona cercana, lo que ocasiona un direccionamiento en la dirección del crecimiento del grano. De igual manera la ausencia de formas puntudas o angulares se debe al lento calentamiento que se genera y al enfriamiento también lento, eliminando la posibilidad de formación de formas martensíticas.

En la imagen derecha de la figura 18 se observa la zona 3 a 400 aumentos; se logra definir claramente la formación de los granos columnares (ferrita), con poca presencia de áreas oscuras (perlita). Tal como se mencionó anteriormente, la aparición de perlita y no martensita en esta zona se explica por la menor velocidad de enfriamiento del cordón, que favorece la

transformación perlítica.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Evaluación Comparativa de las Zonas

El estudio micrográfico ha permitido distinguir claramente tres zonas diferenciadas en la probeta soldada: el material base, la *Zona Afectada por el Calor* (ZAC) y el cordón de soldadura. Una interpretación comparativa cuantitativa evidencia lo siguiente:

i) *Material Base*

Las micrografías del material base, observadas a aumentos de 100X, 200X y 400X, muestran una distribución homogénea de una matriz de ferrita con inclusiones de perlita distribuidas de forma equiaxial. El tamaño de grano reducido es característico de un acero de bajo carbono (AISI 1020) que no ha sido afectado por procesos térmicos significativos. Se puede inferir que, en ausencia de variaciones térmicas, la estabilidad de la microestructura garantiza propiedades mecánicas consistentes. Este resultado confirma la expectativa de que los aceros de bajo carbono presentan una microestructura estable, lo que los hace ampliamente utilizados en aplicaciones estructurales donde se requiere homogeneidad y predictibilidad mecánica.

ii) *Zona Afectada por el Calor (ZAC)*

En esta zona, la incidencia del choque térmico se traduce en una modificación significativa de la microestructura. Los análisis muestran la aparición de martensita intercalada con la ferrita y perlita, evidenciada por cambios en el tono y la disposición irregular de los granos.

La presencia de una fracción martensítica sugiere una transformación rápida debida al choque térmico que se genera en el proceso de soldadura, lo que ocasiona un impacto en las propiedades mecánicas (como la dureza y la fragilidad) de las zonas circundantes. Se observa además una diferencia en la unión y enfriamiento de los granos, en donde los puntos más cercanos al cordón presentan una mayor deformación y modificación de la forma de grano comparado con aquellos ubicados a mayor distancia de la fuente de calor, este comportamiento se ha evidenciado al analizar aceros de bajo carbono sometidos

a procesos térmicos intensos (Da Conceição *et al.*, 2019). Este resultado evidencia la crítica importancia de controlar los parámetros térmicos, ya que pequeñas variaciones en el ciclo de enfriamiento pueden provocar transformaciones no deseadas que afectan la tenacidad y durabilidad de la unión.

iii) *Cordón de Soldadura*

En el área del cordón se identifica la formación de una estructura de granos columnares, debida a aspectos como el calor y al movimiento oscilatorio del electrodo durante el proceso SMAW. La disminución notable de perlita en esta zona confirma la idea de una rápida solidificación, permitiendo que la ferrita pueda disolver más carbono y aumente el tamaño de grano. La orientación definida del crecimiento de grano y la morfología de los granos sugieren un perfil térmico caracterizado por altas velocidades de enfriamiento y direccionalidad térmica que condicionan la estructura final del cordón.

B. Evaluación de los aspectos de soldadura y la influencia del calor

Los resultados obtenidos sugieren una relación entre los parámetros del proceso, tales como el tipo y diámetro del electrodo, la velocidad de soldadura y la secuencia de los cordones, además las diferencias observadas entre las zonas identificadas en la unión soldada se reflejan en la distribución y morfología de las fases microestructurales.

El primer cordón (raíz), realizado con electrodo 6013 de 1/8", genera un choque térmico que provoca un cambio microestructural, que se disminuye con el aumento en la distancia al punto de soldadura.

Los cordones de relleno y presentación, ejecutados con un electrodo de mayor diámetro (5/32"), pudieron haber aumentado la cantidad de calor transferido y disminuyendo el choque térmico, favoreciendo así la formación de estructuras columnares y la coalescencia de fases menos estables.

Estos hallazgos se sitúan en línea con estudios previos <Huaraca López, 2022; da Conceição *et al.*, 2019; Cuba Pérez & Tenorio Misto, 2021>, que destacan la correlación entre las condiciones térmicas durante la soldadura y las subsecuentes alteraciones microestructurales, lo cual es determinante para la calidad

e integridad del ensamblaje soldado. De esta forma, se refuerza la necesidad de optimizar los parámetros de soldadura no solo para asegurar la continuidad metalúrgica, sino también para reducir defectos internos que puedan comprometer el desempeño en servicio.

C. Afectación en las propiedades del material

La heterogeneidad observada entre las zonas implica que las propiedades mecánicas variarán localmente en la probeta soldada:

- La zona del material base mantiene condiciones ideales para la ductilidad y tenacidad.
- La ZAC, con la formación de martensita y la alteración del tamaño de grano, puede presentar incrementos en la dureza, pero a costa de una posible reducción en la tenacidad, haciéndola más vulnerable a la fractura por esfuerzos cíclicos o impactos.
- En el cordón de soldadura, la presencia de granos columnares sugiere una mayor anisotropía en las propiedades, lo que debe ser evaluado mediante ensayos mecánicos adicionales para determinar su comportamiento bajo condiciones de servicio. Este tipo de comportamiento ha sido documentado al asociar la formación direccional de los granos con efectos anisotrópicos en uniones soldadas (Huaraca López, 2022).

V. CONCLUSIONES

A. Impacto Directo del Calor en la Microestructura

Se confirma que el proceso de soldadura SMAW induce transformaciones significativas en la microestructura del acero AISI 1020. El choque térmico genera un gradiente de transformación, donde la zona cercana al cordón de soldadura presenta un tamaño de grano agrandado, formación de martensita y orientación columnar, en contraste con la homogeneidad del material base; estos hallazgos son consistentes con lo señalado por Huaraca López (2022) y Sánchez et al. (2023), quienes destacan la sensibilidad de los aceros de bajo carbono a la variación térmica en procesos de soldadura.

B. Relación entre Parámetros de Soldadura y Calidad del Ensamblaje

La variación en los diámetros de los electrodos y la secuencia de aplicación de los cordones repercute en la distribución de fases y en la configuración final del conjunto soldado. Los parámetros empleados favorecen la formación de diferentes microestructuras, lo que sugiere la necesidad de optimizar los aspectos de soldadura para balancear la calidad, la resistencia y la integridad de la unión; este comportamiento concuerda con estudios como los de Parmar y Dubey (2017), quienes demostraron la influencia crítica de los parámetros operativos en la estabilidad de la unión.

C. Implicaciones en las propiedades mecánicas y funcionales

Las variaciones microestructurales detectadas implican posibles diferencias en las propiedades mecánicas locales. La mayor dureza en la ZAC y la anisotropía en el cordón podrían afectar el desempeño en servicio, lo que resalta la importancia de utilizar análisis metalográficos como herramienta predictiva en el control de calidad; lo anterior lo corroboran estudios previos donde se observa una correlación directa entre las variaciones estructurales en zonas soldadas y cambios en la resistencia y tenacidad del material (Conceição *et al*, 2019) y (Cuba Pérez, Tenorio Misto, 2021).

D. Validez y relevancia de la metodología metalográfica

La preparación cuidadosa de las probetas (pulido, montaje y ataque químico) ha sido determinante para obtener imágenes con claridad y detalle, lo que demuestra la relevancia de seguir protocolos meticulosos, alineados con normas internacionales como *ASTM E3* y *ASTM E407*, para garantizar la fiabilidad de los ensayos metalográficos.

E. Líneas de investigación futura

Se recomienda la integración de ensayos mecánicos complementarios y técnicas de caracterización avanzadas, tales como microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis de dureza Vickers o micro dureza, espectroscopía de energía dispersiva (EDS), entre otros, para establecer una correlación directa entre la microestructura y las propiedades estructurales del acero soldado. Además, la comparación con otros procesos de soldadura permitirá determinar la aplicabilidad y beneficios relativos de cada método en aplicaciones industriales específicas; este tipo

de enfoque ha sido respaldado por trabajos como el de Lippold y Kotecki (2005), quienes enfatizan la importancia de técnicas complementarias para evaluar la soldabilidad y comportamiento del acero bajo condiciones reales.

1. REFERENCIAS

- [1] Abate, G., Osenda, A. P., & Krahmer, D. M. Degree of deformation versus microhardness of an *AISI 1010* cold forged steel.
- [2] Acosta Acosta, C. J. (2020). Análisis de soldadura del acero inoxidable martensítico *AISI 420* con acero de medio carbono *AISI 1045* y bajo carbono *AISI 1018* por soldadura *SMAW* y su influencia en las propiedades mecánicas (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica).
- [3] Ana M. (2018) Estudio de la microestructura de un cordón de soldadura de un acero P91 mediante microscopía electrónica de transmisión.
- [4] Ariza Ardila, J. A., & Gómez Barrantes, C. F. Validación de un proceso de soldadura (GTWA) para la fabricación de perfiles estructurales: caso de estudio perfiles fabricados por la empresa *ICOPERFILES SA*.
- [5] Carlos, J. (2022). Metalografía de la Soldadura.
- [6] Cuba Pérez, A., & Tenorio Misto, J. (2021). Estudio radiográfico, metalográfico y ensayo de doblez de soldadura en planchas de acero con bajo contenido en carbono de 6 milímetros en espesor.
- [7] Da Conceição, L. A., Antunes, R. M., da Silva Costa, C. A., Aparecida, Í. L., da Luz, A. V., da Silva, A. N., ... & Cabral, R. D. F. (2019). Estudo da morfologia e das propriedades mecânicas do aço 1010. *Revista Valore*, 4(1), 936-944.
- [8] Gramajo, J., Gualco, A., & Svoboda, H. (2021). Efecto de la velocidad de soldadura sobre la microestructura en aleaciones *FE-CB-CR-W-MO-NB*.
- [9] Gutiérrez Terán, F. V., & Reinoso Toledo, A. A. (2020). Análisis comparativo de los efectos producidos ante la aplicación de procesos de corte por oxígeno (*OFC*), plasma (*PAC*) y electrohilo (*WEDM*) (Bachelor's thesis, Quito, 2020.).
- [10] Higuera, F., Sarmiento, J. R. S., Joya, L. F. A., & Becerra, M. A. (2018). Análisis de acero laminado antes y después de soldado, mediante

- pruebas de metalografía y macroataque. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 9(1).
- [11] Huaraca López, A. C. (2022). Caracterización metalográfica y evaluación del perfil de dureza en una junta soldada de acero ASTM A36 mediante el proceso de soldadura por fricción rotacional.
- [12] Pegorini, E. Análise dos parâmetros do processo de soldagem a ponto por resistência na qualidade das juntas em estruturas automotivas.
- [13] Reis, M. M. D. S. (2023). Estudo de fragilização e propriedades mecânicas de arames utilizados em armadura de tração de cabos umbilicais soldados de topo por resistência e por fricção.
- [14] Reyna Núñez, A. A. (2019). Análisis microestructural del acero al carbono 1 010 después de ser sometido un proceso de corte por oxicorte y por plasma (Doctoral dissertation, Departamento de Metalurgia).
- [15] Rivas, R., Chang, B., & Ríos, E. (2021). Soldabilidad de fundiciones de hierro gris, hierro nodular y de acero inoxidable A304. análisis metalográfico. *Revista De la Escuela de Estudios de Postgrado*, 0(1), 19-24.
- [16] Sánchez, J. M. V., Castro, J. W. Z., Avellan, D. B. H., Pinargote, M. Z., & Cobeña, J. G. Z. (2023). Caracterización de los aceros 1018, 1020, y df2 según la norma SAE (Society of Automotive Engineer). *MQRInvestigar*, 7(2), 130-147.
- [17] Valero Mondragón, S. M. (2019). Estudio metalográfico de una soldadura eléctrica de aleaciones disimiles.
- [18] Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. John Wiley & Sons.
- [19] A. C. Huaraca López, “Análisis metalográfico de acero AISI 1010 soldado por fricción,” *Revista de Ingeniería y Tecnología*, vol. 15, no. 2, pp. 45–53, 2022.
- [20] J. M. V. Sánchez, L. Torres, and P. Ramírez, “Evaluación micrográfica de aceros de bajo y medio carbono soldados por SMAW,” *Revista Científica de Materiales y Procesos*, vol. 12, No. 1, pp. 33–42, 2023.
- [21] R. S. Parmar and S. Dubey, “Effect of welding parameters on the mechanical properties of low carbon steel welds,” *international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, Nos. 7–8, pp. 2145–2153, 2017.
- [22] ASTM International, ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- [23] ASTM International, ASTM E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- [24] ASME BPVC, Edición 2023, Sección IX, QG-101