

Efecto del precalentamiento en la microestructura y microdureza de los aceros ASTM A572 GR 50 y AAR M-201 GR B+ unidos por soldadura FCAW

Effect of preheating on the microstructure and microhardness of ASTM A572 GR 50 and AAR M-201 GR B+ steels joined by FCAW welding

José R. Ávila Gutiérrez^a, Luis A. Álvarez Hernández^b, César Y. Becerra Mayorga^c

Abstract:

This study analyzes the effect of preheating and the thermal influence of welding on the microstructure and mechanical properties of AAR M-201 Gr B+ and ASTM A572 Gr 50 steels after being joined through a Flux-Cored Arc Welding (FCAW) process. Five preheating temperatures of 0°F, 150°F, 300°F, 450°F, and 600°F were evaluated, analyzing each of the samples by obtaining representative metallic specimens from the welded area of both steels for metallographic examination, phase percentage calculation, and microhardness testing. The results showed that the welded pieces preheated at 600°F exhibited the highest hardness values (245 HV and 200 HV), while those welded with preheating at 450°F retained greater stability in their initial properties and less variation compared to the 150°F and non-preheated samples. It is concluded that the applied preheating does not generate phase transformations; however, it directly influences the variation in the percentage of pearlite and ferrite.

Keywords:

Microstructure, Welding, Preheating, Hardness.

Resumen:

Este estudio analiza el efecto del precalentamiento y la influencia térmica de la soldadura en la microestructura y en las propiedades mecánicas de los aceros AAR M-201 Gr B+ y ASTM A572 Gr 50, después de ser unidos mediante un proceso de soldadura por arco eléctrico (FCAW). Se evaluaron cinco temperaturas de precalentamiento de 0°F, 150°F, 300°F, 450°F y 600°F, analizando cada una de las muestras mediante la obtención de probetas metálicas representativas del área soldada de ambos aceros para realizar un análisis metalográfico, el cálculo del porcentaje de fases y pruebas de microdureza. Los resultados mostraron que las piezas soldadas con precalentamiento a 600°F presentaron los mayores valores de dureza (245 HV y 200 HV), mientras que aquellas soldadas con precalentamiento a 450°F conservaron una mayor estabilidad en sus propiedades iniciales y menor variación respecto a las muestras de 150°F y sin precalentamiento. Se concluye que el precalentamiento no genera transformaciones de fase; sin embargo, influye directamente en la variación del porcentaje de perlita y ferrita.

Palabras Clave:

Microestructura, Soldadura, Precalentamiento, Dureza.

Introducción

En manufactura, la soldadura se integra como uno de los principales procesos de unión de materiales. La

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma de Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0002-0061-2157>, Email: av419664@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0000-4623-8637>, Email: al286575@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-5213-2764>, Email: be2603081@uaeh.edu.mx

manufactura es la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades o apariencia de un material de inicio dado para fabricar piezas o productos; la manufactura también incluye el ensamble de piezas múltiples para fabricar productos (Groover, 2007, p. 4). En este sentido, la mejora continua de los procesos de manufactura resulta esencial para asegurar la calidad, eficiencia y sostenibilidad en la producción de componentes y estructuras que requieran soldadura para su elaboración.

En este marco, los aceros ocupan un papel fundamental dentro de la manufactura moderna debido a su versatilidad, resistencia mecánica y amplia disponibilidad. Entre la gran variedad de grados y normas existentes, destacan aquellos que se emplean en aplicaciones estructurales y ferroviarias, donde la confiabilidad de las uniones soldadas es crítica para garantizar la seguridad y el desempeño de los componentes. Por ejemplo, Han et al. (2025) demostraron que variaciones en el contenido de manganeso en los rieles U71Mn influyen en la microestructura y las propiedades mecánicas de las uniones soldadas, incrementando la tenacidad de impacto hasta en un 65 % al reducir esa concentración, lo que mejora la confiabilidad de la soldadura en servicio ferroviario (Han, Zhu, Liao, & Zhang, 2025).

En este trabajo se abordará el estudio de dos aceros de interés industrial: el ASTM A572 Gr 50, utilizado comúnmente en estructuras debido a su combinación de resistencia y soldabilidad, y el AAR M-201 Gr B+, empleado en la industria ferroviaria por sus propiedades específicas para servicio pesado. La caracterización de las uniones soldadas entre estos materiales permite analizar su comportamiento metalúrgico y contribuir a la mejora de los procesos de fabricación y control de calidad.

El acero ASTM A572/A572M-21 es un acero estructural de alta resistencia y bajo contenido de aleación (HSLA) que se presenta en forma de placas, perfiles, chapas y barras. La norma especifica que este material "shall conform to the required contents of columbium (niobium), vanadium, titanium, and nitrogen, or combinations thereof" (ASTM International, 2021, sección 1.4), lo que demuestra que elementos microaleantes como el niobio y el vanadio están incluidos para mejorar propiedades mecánicas tales como la resistencia, la tenacidad y la soldabilidad.

El Acero AAR M-201 Grado B+, usado en componentes ferroviarios fundidos, contiene hasta 0.32 % de C, 0.90 % de Mn y 1.50 % de Si. Aunque ambos son soldables, el AAR M-201 B+ requiere precalentamiento para evitar

defectos por su mayor contenido de carbono y su origen fundido (Association of American Railroads, 2000).

El precalentamiento consiste en elevar la temperatura del área adyacente a la junta de soldadura antes de iniciar el aporte de metal. Este paso reduce la velocidad de enfriamiento de la soldadura, ayuda a eliminar la humedad y disminuye la tendencia a la formación de grietas por hidrógeno (American Welding Society, 2001, pp. 1–2). Además, reduce las tensiones de contracción en la soldadura y el metal base adyacente, lo que es especialmente importante en uniones con alta restricción térmica. También eleva la temperatura de algunos aceros por encima del umbral donde podrían producirse fracturas frágiles durante la fabricación, contribuyendo a una estructura metalúrgica más dúctil y resistente a grietas (ESAB, 2020). Por último, ayuda a eliminar la humedad del material base antes de la soldadura, reduciendo la posibilidad de agrietamiento por hidrógeno, ya que la humedad puede liberar hidrógeno durante el proceso de soldadura, aumentando el riesgo de agrietamiento retardado (Hobart Brothers Company, 2014).

La soldadura es un proceso de unión que produce la coalescencia de materiales al calentarlos a la temperatura de soldadura, con o sin aplicación de presión y con o sin el uso de metal de aporte (American Welding Society [AWS], 2020, p. 64). La soldadura entre materiales disímiles constituye un reto importante dentro de los procesos de manufactura, ya que las diferencias en su compatibilidad metalúrgica y en las propiedades termofísicas de los metales base pueden influir directamente en la calidad de la unión (Qin, 2022). Estos problemas se acentúan debido a las variaciones en puntos de fusión, coeficientes de conductividad y expansión térmica, así como en el contenido de carbono, lo que puede generar microestructuras heterogéneas y zonas afectadas por el calor con propiedades mecánicas distintas (El-Shennawy et al., 2024).

En la industria moderna, la unión es un término que incluye todo; cubre procesos como soldadura, soldadura fuerte, soldadura blanda, unión con adhesivos y sujeción mecánica. Estos procesos son un aspecto fundamental e importante de las operaciones de manufactura y ensamble (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 936-937). Entre estos procesos de unión, la soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW, por sus siglas en inglés) destaca por sus características técnicas, es un proceso de soldadura que utiliza un arco eléctrico entre un electrodo de metal de aporte continuo y el charco de soldadura. El proceso se realiza con la protección de un fundente contenido dentro del electrodo tubular, con o sin protección adicional de un gas suministrado

externamente, y sin la aplicación de presión. (American Welding Society, 2004, pp. 210).

El objetivo del estudio es presentar datos experimentales que evidencian cómo diversas temperaturas de precalentamiento influyen en la microestructura de los aceros soldados, mediante un análisis metalográfico para obtener un porcentaje de las fases presentes que destaca la importancia de la metalurgia en el control de parámetros de soldadura y asegurar la calidad del proceso.

Materiales y métodos

Previo a las pruebas de pre calentamiento y soldadura fue seleccionar nuestros materiales base, el ASTM A572 Gr 50 y AAR M-201 Gr B+, posteriormente realizar cortes de 5 muestras para cada material, posteriormente limpiar las piezas usando un cepillo de acero para retirar impurezas y precalentar cuatro de ellas a 150, 300, 450 y 600°F, y una soldada sin precalentamiento, es decir, a temperatura ambiente, para corroborar las temperaturas se utilizó un termómetro infrarrojo y así se aplicó la soldadura FCAW, finalmente se preparar las muestras para el análisis metalográfico y de dureza, las actividades desarrolladas se pueden apreciar en la Figura 1.

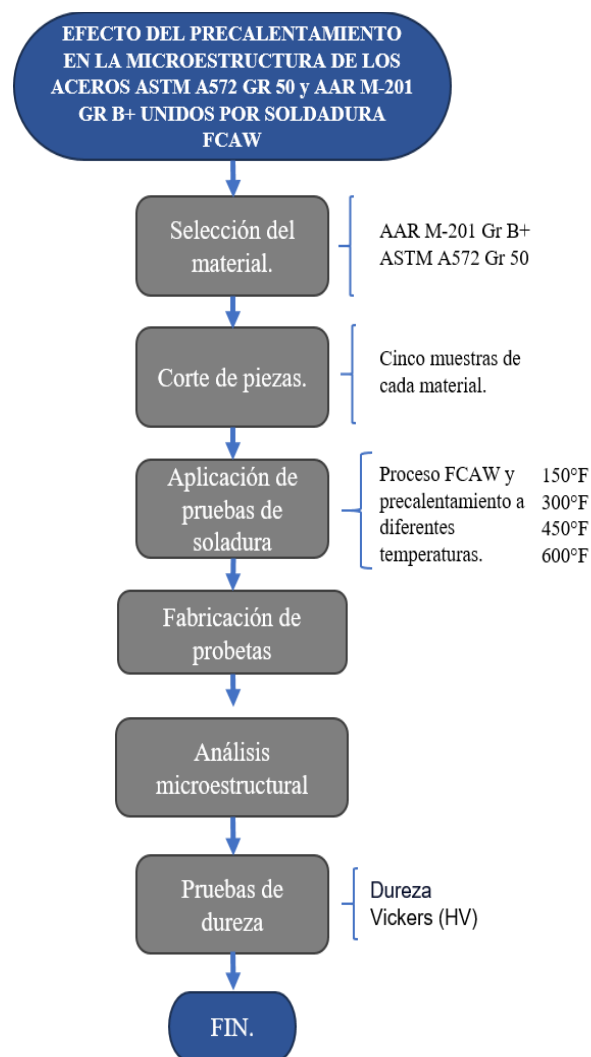


Figura 1. Diagrama general de actividades. Fuente: autores.

La composición química de los materiales se presenta en la Figura 2, donde se muestra el porcentaje de los elementos que contienen el acero ASTM A572 GR 50 y el AAR M-201 GR B+.

ELEMENTOS (% peso)	AAR M-201 Gr B+	ASTM A572 GR 50
C	0.32%	0.23%
Mn	0.90%	1.35%
P	0.04%	0.04%
S	0.04%	0.05%
Si	1.50%	0.40

Figura 2. Composición química del acero AAR M-201 Gr B + (Association of American Railroads, 2000) y

composición química del acero ASTM A572 GR 50 (Morales Agreda, 2001, pp. 1–4).

Para cada una de las pruebas de soldadura realizadas en este estudio, se aplicaron los siguientes parámetros:

- Proceso de soldadura aplicado: Se utilizó el proceso FCAW (Flux-Cored Arc Welding) el cual tiene gran versatilidad y capacidad para generar soldaduras de alta calidad en diferentes condiciones.
- Diámetro del alambre de soldadura: Calibre 1/16".
- Velocidad de alimentación del alambre: 300 pulgadas por minuto (in/min), para mantener una deposición uniforme.
- Voltaje: 26.1 ± 0.1 V, asegurando una estabilidad adecuada del arco.
- Amperaje: 300 A.
- Composición del gas de protección: CO₂ al 100%, utilizado para garantizar un entorno de soldadura libre de contaminantes.
- Clasificación del metal de aporte: Electrodo E71T-1.
- Flujo de gas: Configurado entre 24 y 45 CFH (pies cúbicos por hora).
- Stick-out: Longitud de 1/2", controlada para optimizar la estabilidad del arco y reducir las salpicaduras.
- Tipo de soldadura: Filete, empleado para unir las piezas en un diseño de traslape.
- Cantidad de cordones: Una raíz y tres cordones de vista.

Previo a la soldadura, las piezas se limpiaron con el objetivo de eliminar cualquier impureza superficial que pudiera afectar la calidad de las uniones soldadas.

Una vez limpias las piezas, las juntas de soldadura fueron precalentadas con un equipo de oxiacetileno hasta alcanzar la temperatura de precalentamiento deseada. Se utilizó un termómetro infrarrojo láser, para garantizar un control de las temperaturas alcanzadas en los procesos.

Tras alcanzar la temperatura deseada, se aplicó la soldadura en cuatro pases, siguiendo un diseño de traslape para las cinco muestras como se muestra en la Figura 3. Después de que las piezas normalizarán su temperatura al ambiente, se marcó la sección a las piezas donde se obtendrán las muestras.



Figura 3. Muestras soldadas a diferentes temperaturas de precalentamiento. Fuente: autores.

Finalmente, se realizó una limpieza posterior para retirar posibles residuos de escoria.

Se cortaron 5 probetas para realizar el análisis metalográfico, una muestra interna por cada temperatura de precalentamiento a las que fueron sometidas y 2 más correspondientes a los aceros base ASTM A572 GR 50 y AAR M-201 GR B+ como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Muestras cortadas para análisis metalográfico. Fuente: autores.

Las muestras fueron preparadas siguiendo un proceso de desbaste con lijas de granulometría progresiva (60, 80, 100, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 y 2500), hasta obtener un acabado tipo espejo. Posteriormente, se realizó un pulido con pasta de diamante de 3.5, 1 y 0.5 micras, para posteriormente realizar un ataque químico con Ácido Nítrico (5 ml HNO₃) + Etanol (95%). Este ataque químico se realiza con el fin de diferenciar las fases presentes en las muestras.

Finalmente se realizó el análisis de porcentaje de fases, este es una técnica utilizada en metalurgia para determinar la proporción relativa de las diferentes fases presentes en una microestructura metálica. Se capturaron imágenes en alta resolución por cada zona analizada, considerando zonas distintas en cada uno de los dos tipos de acero que fueron unidos mediante el proceso de soldadura. Estas zonas fueron seleccionadas estratégicamente para evaluar el efecto térmico: una zona próxima (1 mm \approx 1000 μ m) a la línea de soldadura, una zona intermedia (3 mm \approx 3000 μ m) y una zona

alejada (5 mm \approx 5000 μ m). Después de capturar las imágenes se cuantifico el porcentaje de fases presentes, conformados de Perlita y Ferrita, para finalmente promediar para cada muestra y obtener un resultado general para cada una.

El análisis de microdureza se realizó utilizando un Microdurómetro Vickers, el cual emplea un indentador con punta de diamante en forma de pirámide de base cuadrada. Se efectuaron seis indentaciones en cada uno de los dos tipos de acero analizados (AAR M-201 Gr B+ y ASTM A572 Gr 50) en las probetas soldadas. El Microdurómetro utilizado es de la marca Akashi modelo MVK- E, equipado con plantilla XY y ocular manual, contando con aumentos de 100 y 500x a través del ocular, contando igualmente con un rango de carga de 10 gramos a 1000 gramos permitiendo medir indentaciones pequeñas con gran precisión. Este método es particularmente útil para analizar materiales con diferentes zonas afectadas térmicamente, como ocurre en uniones soldadas.

Resultados y discusión

En la Figura 5 y la Figura 6 se puede observar la microestructura tomada de los materiales base el acero ASTM A572 GR 50 y AAR M-201 GR B+.

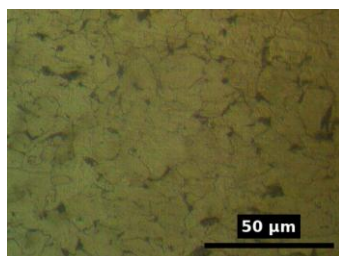


Figura 5. Microestructura óptica del acero ASTM A572 Grado 50, aumentó 400x. Fuente: autores.

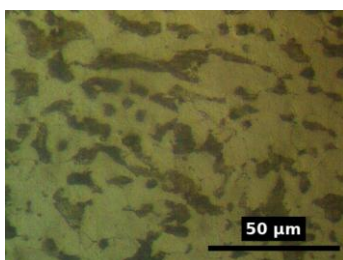


Figura 6. Microestructura óptica del acero AAR M-201 GR B+, aumentó 400x. Fuente: autores..

El análisis de las imágenes permite identificar dos fases principales. La primera es la perlita, observable en

tonalidades oscuras y grisáceas, con morfologías que permiten distinguir entre perlita fina y gruesa. La segunda fase identificada es la ferrita, manifestada en tonalidades claras, en ocasiones con estructura de granos bien definida, como se muestran en las Figuras 7 y 8.

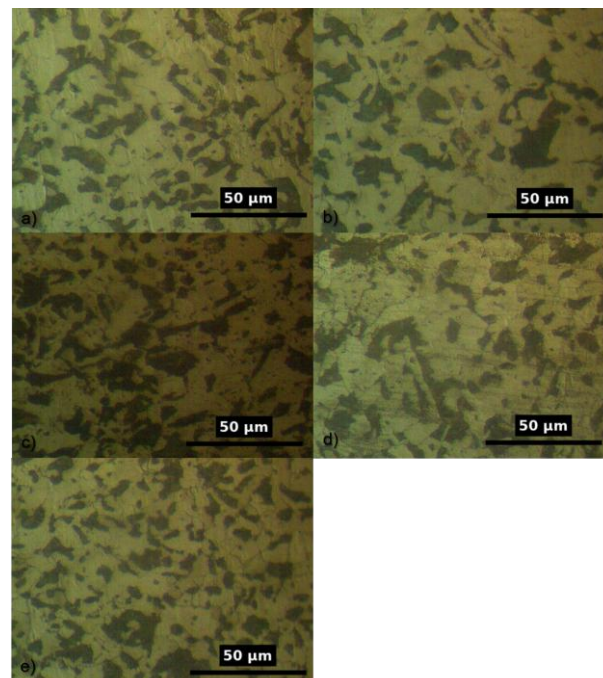


Figura 7. Microestructuras del material AAR M-201 GR B+ con diferentes temperaturas de precalentamiento. a) sin precalentamiento. b) 150°F. c) 300°F. d) 450°F. e) 600°F. Fuente: autores.

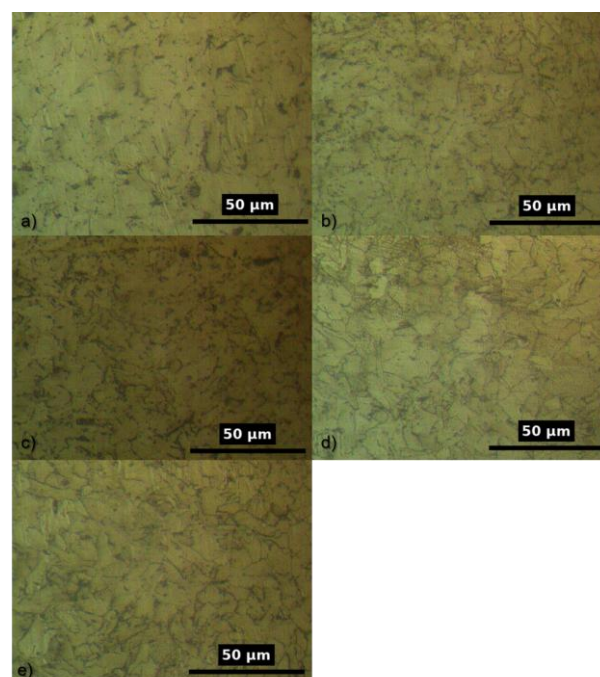


Figura 8. Microestructuras del material ASTM A572 GR 50 con diferentes temperaturas de precalentamiento. a) sin precalentamiento. b) 150°F. c) 300°F. d) 450°F. e) 600°F. Fuente: autores.

Para cada imagen capturada, se cuantificó el porcentaje de perlita (%P) y de ferrita (%F), obteniéndose un promedio con el objetivo de conocer su distribución en cada uno de los aceros analizados. En las figuras 9 y 10 incluyen el porcentaje promedio de fases derivado del análisis de múltiples imágenes por probeta, así como una microestructura representativa de cada muestra según su temperatura de precalentamiento, diferenciada por tipo de acero. El aumento o disminución de alguna de estas fases influye directamente en las propiedades del acero, especialmente en aquellas regiones afectadas térmicamente por el precalentamiento y el proceso de soldadura.

AAR M-201 GR B+									
Sin precalentamiento 67°F	Precalentamiento a 150°F	Precalentamiento a 300°F	Precalentamiento a 450°F	Precalentamiento a 600°F					
a)	b)	c)	d)	e)					
%F	%F	%F	%F	%F	%P	%P	%P	%P	%P
63.73	62.11	53.76	55.89	50.05	36.27	37.89	46.24	44.11	49.95

Figura 9. Microestructura representativa y porcentaje promedio de fases (ferrita y perlita) en el acero AAR M-201 Gr B+ bajo distintas temperaturas de precalentamiento. Imágenes obtenidas a 400X por microscopía óptica. Fuente: Autores.

ASTM A572 GR 50									
Sin precalentamiento 67°F (19.44°C)	Precalentamiento a 150°F (65.5 °C)	Precalentamiento a 300°F (148.88°C)	Precalentamiento a 450°F (232.2°C)	Precalentamiento a 600°F (315.5°F)					
a)	b)	c)	d)	e)					
%F	%F	%F	%F	%F	%P	%P	%P	%P	%P
71.87	72.05	69.48	73.31	43.5	28.13	27.95	30.52	26.69	56.5

Figura 10. Microestructura representativa y porcentaje promedio de fases en el acero ASTM A572 Gr 50 según el precalentamiento aplicado. Microscopía óptica a 400X Fuente: Autores.

El análisis de las fases presentes en cada muestra de precalentamiento revela variaciones en la proporción de perlita y ferrita.

Para el acero AAR M-201 Gr B+, en las muestras soldadas con un precalentamiento de 150°F y sin precalentamiento (Temperatura Ambiente), se observó una disminución de perlita y un aumento de ferrita entre un 7.28% y un 8.9% respecto a las condiciones iniciales antes del proceso de soldadura.

Las muestras soldadas con 300°F y 450°F presentaron ligeras variaciones en su contenido de fases respecto a la condición inicial. En la muestra de 300°F, se observó un ligero aumento de perlita y disminución de ferrita de 1.07%, mientras que en la de 450°F ocurrió una disminución de perlita y un aumento de ferrita de 1.06%. Por otro lado, la muestra de 600°F mostró un aumento de perlita y disminución de ferrita de un 4.68%. Este resultado coincide con el diagrama de microdureza, donde la muestra de 600°F registró la mayor dureza, lo cual se asocia con el incremento de perlita en su microestructura. En la Figura 11 se observa la variación porcentual de las fases presentes en este material.

PORCENTAJE DE FASES AAR M-201 GR B+

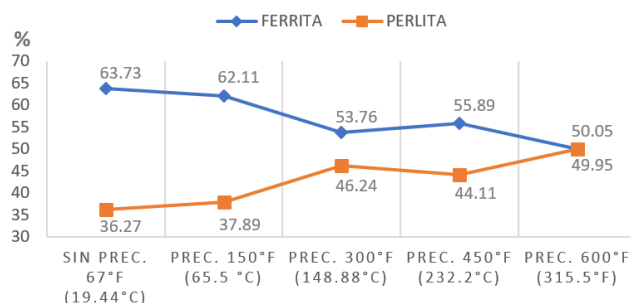


Figura 11. Variación porcentual de las fases presentes en el material AAR M-201 GR B+ después de ser soldados. Fuente: autores.

En el caso del acero ASTM A572 Gr 50, las muestras soldadas a 150°F y sin precalentamiento presentaron un aumento de perlita y disminución de ferrita entre un 5.02% y un 6.1% respecto a su condición inicial. Para la muestra de 300°F, se evidenció un aumento de perlita y disminución de ferrita del 8.49%, mientras que en la de 450°F, la variación fue de 4.66%.

Finalmente, la muestra de 600°F mostró un aumento de perlita y disminución de ferrita del 34.47%, resultado que también coincide con el diagrama de microdureza, confirmando que es la muestra con mayor dureza debido

a la mayor presencia de perlita. En la figura 12 se observa la variación porcentual de las fases presentes en este material.

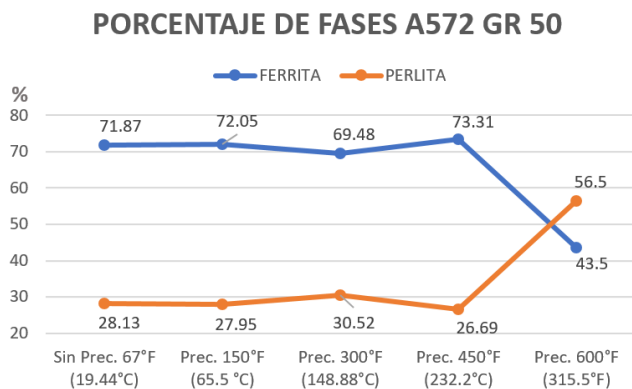


Figura 12. Variación porcentual de las fases presentes en el material A572 GR 50 después de ser soldados. Fuente: autores.

El aumento de perlita y disminución de ferrita incrementa la dureza y resistencia mecánica, debido a la mayor presencia de cementita en la perlita, puede mejorar la resistencia a la tracción, el desgaste y la rigidez estructural. Sin embargo, el material se puede volver menos dúctil y más propenso a fracturas por impacto si la cantidad de ferrita disminuye excesivamente.

El aumento de ferrita y disminución de perlita reduce la dureza y resistencia mecánica, pero puede aumentar la ductilidad y tenacidad. También tiende a mejorar el comportamiento frente a la deformación plástica y la resistencia al desgaste por fricción, así como a incrementar la resistencia a la corrosión, ya que la ferrita posee menor contenido de carbono.

Para cada tipo de acero en las probetas soldadas, se obtuvo un valor promedio de microdureza, cuyos registros se presentan en la Figura 13.

MICRODUREZA VICKERS		
Temperatura de precalentamiento	AAR M-201 GR B+	ASTM A572 GR 50
Muestra base	186	188
Temperatura ambiente	223	191
150°F	221	181
300 °F.	230	190
450°F	220	183
600°F	245	200

Figura 13. Promedio de microdureza en cada tipo de acero. Fuente: Autores

De acuerdo con la Figura 15, el acero AAR M-201 Gr B+ presentó un incremento de dureza superior al del acero ASTM A572 Gr 50. Además, en ambos materiales se observó que las muestras soldadas con un precalentamiento de 600°F exhibieron un mayor aumento de dureza en comparación con aquellas sin precalentamiento o con temperaturas más bajas.

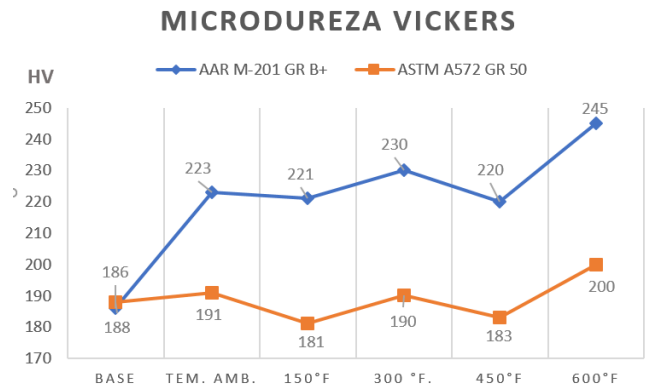


Figura 14. Comportamiento de microdureza para cada tipo de acero en cada muestra soldada.

Asimismo, se muestra el comportamiento de la microdureza en cada tipo de acero dentro de las muestras soldadas. Esta medición permitió visualizar la respuesta de los materiales tras el proceso de soldadura, facilitando su comparación entre ambos.

Conclusiones

Se confirmó que la temperatura de precalentamiento influye en la modificación de las propiedades microestructurales y mecánicas de los aceros AAR M-201 Gr B+ y ASTM A572 Gr 50, soldados mediante FCAW. Tras el proceso de soldadura, la temperatura más alta se registró en la muestra con precalentamiento de 600°F, alcanzando 1076°F (580°C). Sin embargo, esta temperatura no fue suficiente para provocar una transformación de fase diferente, ya que en los aceros al carbono la transformación ocurre en los rangos críticos de temperatura, conocidos como temperaturas de transformación.

El cambio de fase en estos aceros se inicia a 727°C, cuando la ferrita y la perlita comienzan a transformarse en austenita. Dado que no se alcanzó esta temperatura, la microestructura de ferrita y perlita permaneció en equilibrio. Sin embargo, se apreció un cambio porcentual en las fases presentes.

Para mayor dureza y resistencia, el precalentamiento a 600°F mostró los mayores valores de dureza y un incremento en la cantidad de perlita en todos los análisis,

lo que mejora la resistencia al desgaste y la capacidad de carga. Si lo que se busca es mantener el equilibrio entre resistencia y ductilidad, precalentar a 450°F es la mejor opción, seguido de 300°F, ya que ambas temperaturas mostraron un comportamiento más estable en los análisis de microdureza y porcentaje de fases.

Concluimos que el precalentamiento reduce los efectos negativos en los aceros soldados, al igual que otras investigaciones, demostraron que en comparación con las uniones sin precalentamiento, el precalentamiento mejoró significativamente las propiedades mecánicas, destacando la mejora de las propiedades mecánicas gracias al precalentamiento. Estos hallazgos demuestran que el precalentamiento mejora significativamente la evolución de las propiedades mecánicas, lo que lo convierte en una técnica valiosa en aplicaciones industriales (Sudarsono et al., 2024).

El control del precalentamiento y del enfriamiento es crucial para obtener resultados óptimos en la soldadura. En este estudio, se simuló el proceso real, pero factores como la temperatura ambiente y las técnicas de precalentamiento pueden afectar las propiedades finales del material.

Referencias

- American Welding Society. (2001). *Fundamentals of Preheat*. Miami, FL: AWS. pp. 1-2.
- American Welding Society. (2004). *Welding Handbook, Volume 2: Welding Processes, Part 1* (9ª ed.). Miami, FL: AWS. pp. 210
- American Welding Society. (2020). *Standard Welding Terms and Definitions (AWS A3.0M/A3.0:2020)*. Miami, FL: AWS. p. 64.
- Association of American Railroads. (2000). *AAR Manual of Standards and Recommended Practices: Section C – Part II: Specification M-201 – Steel Castings*. Washington, DC: AAR. pp. 1-8.
- ASTM International. (2001). *Specification A 572/A 572M-01: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel* (Morales Agreda, trad.). Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- ASTM International. (2021). *ASTM A572/A572M-21: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel*.
- El-Shennawy, M., Sehsah, A. M., & otros. (2024). *Efecto de los parámetros de soldadura en la microestructura y propiedades mecánicas en la soldadura por fusión disímil de acero inoxidable AISI 304 con hierro fundido dúctil grado A536*. *Scientific Reports*. Recuperado de <https://www.nature.com/articles/s41598-024-70050-0/>
- ESAB. (2020). *Preheating and post weld heat treatments*. Recuperado de https://esab.com/us/nam_en/esab-university/articles/preheating-and-post-weld-heat-treatments/
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas* (3ª ed.). México: Pearson Educación. p. 4. ISBN 978-970-260-997-1
- Han, Y., Zhu, C., Liao, H., & Zhang, L. (2025). *Effect of manganese content on microstructure and properties of welded joints of U71Mn rails*. *Frontiers in Materials*, 12, 1597601.
- Hobart Brothers Company. (2014). *The consequences and control of hydrogen in the welding process*. Recuperado de <https://www.hobartbrothers.com/resources/technical-articles/the-consequences-and-control-of-hydrogen-in-the-welding-process/>
- Kalpajian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (5ª ed.). México: Pearson Educación. pp. 936-937. ISBN 978-970-260-997-1
- Sudarsono, A., Arifin, A., Gunawan, Wijaya, M. R. Y. Q. A., Barata, L. O. A., & Ramli, M. I. (2024). The effect of preheating on the mechanical properties of AISI 1037 and AISI 304 welded joints using Shielded Metal Arc Welding. *Materials*, 17(23), 5780.
- Qin, F. (2022). *Microestructura y propiedades mecánicas de uniones de metales disímiles aluminio-acero*. *Frontiers in Materials*. Recuperado de <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2021.813118/full>