

BAINITA: LA MICROESTRUCTURA QUE COMBINA DUREZA Y TENACIDAD EN LOS ACEROS

BAINITE: THE MICROSTRUCTURE THAT COMBINES HARDNESS AND TOUGHNESS IN STEELS

CORTEZ GARCÍA, Manuel
Alejandro ¹

SORIA AGUILAR, María De Jesús ¹

GUTIÉRREZ CASTAÑEDA, Emmanuel
José ¹

CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl
²

RESUMEN

La bainita constituye una de las microestructuras más relevantes en el desarrollo de aceros avanzados debido a su capacidad para combinar alta resistencia mecánica con adecuada tenacidad. Este trabajo presenta una revisión bibliográfica sobre la formación de la bainita y la relación entre su microestructura y las propiedades mecánicas, considerando aspectos como la morfología de la ferrita bainítica, la estabilidad de la austenita retenida, la densidad de dislocaciones y la presencia o inhibición de carburos. Se analizan los aportes clásicos de Bhadeshia y Honeycombe, así como investigaciones recientes enfocadas en aceros bainíticos libres de carburos y rutas de procesamiento mediante austemperado y enfriamiento continuo. Asimismo, se discuten aplicaciones industriales en sectores como el automotriz, ferroviario y energético. La revisión muestra que el control preciso de la transformación bainítica permite optimizar simultáneamente resistencia, dureza y ductilidad, consolidando a la bainita como una microestructura estratégica para el diseño de aceros de alto desempeño.

Palabras clave: *bainita; transformación de fase; austemperado; austenita retenida; aceros avanzados.*

1. Facultad de Metalurgia,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Monclova, Coahuila,
México

2. Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de San
Luis Potosí. San Luis Potosí, San
Luis Potosí, México.

ABSTRACT

Bainite is one of the most relevant microstructures in the development of advanced steels due to its ability to combine high mechanical strength with adequate toughness. This work presents a bibliographic review of bainite formation and the relationship between its microstructure and mechanical properties, considering aspects such as bainitic ferrite morphology, retained austenite stability, dislocation density, and carbide precipitation or inhibition.

Correspondencia
m-cortez@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0002-1540-1635>
Fecha de recepción
13 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
14 de mayo de 2026.

Classical contributions by Bhadeshia and Honeycombe are analyzed together with recent studies focused on carbide-free bainitic steels and processing routes based on austempering and continuous cooling. Industrial applications in the automotive, railway, and energy sectors are also discussed. The review demonstrates that precise control of the bainitic transformation allows simultaneous optimization of strength, hardness, and ductility, confirming bainite as a strategic microstructure for the design of high-performance steels.

Keywords: bainite; phase transformation; austempering; retained austenite; advanced steels.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS, por sus siglas en inglés) ha sido impulsado por la necesidad de materiales que ofrezcan simultáneamente elevada resistencia mecánica, buena ductilidad y comportamiento seguro frente a impacto y fatiga. En este contexto, la bainita ha adquirido un papel central dentro de la ingeniería metalúrgica moderna, al situarse como una microestructura intermedia entre la perlita y la martensita, capaz de combinar dureza y tenacidad mediante un adecuado control del tratamiento térmico y de la composición química.

Los fundamentos termodinámicos y cinéticos de la transformación bainítica se establecieron a partir de los trabajos clásicos de Bhadeshia y Honeycombe, quienes describieron la formación de láminas de ferrita bainítica acompañadas por austenita enriquecida en carbono. Estudios posteriores demostraron que la temperatura de transformación, el tamaño de grano previo y la inhibición de la precipitación de cementita influyen de manera directa en la morfología bainítica y, por ende, en las propiedades mecánicas del acero (Bhadeshia y col., 2017).

En años recientes, la investigación se ha enfocado en el desarrollo de aceros bainíticos libres de carburos, en los cuales la adición de elementos como silicio o aluminio evita la formación de cementita, favoreciendo la estabilidad de la austenita retenida y mejorando la ductilidad mediante el efecto TRIP (Transformación inducida por plasticidad). Estos avances han permitido

alcanzar resistencias superiores a 1400 MPa sin sacrificar tenacidad (García-Mateo y Caballero, 2005; Sun y col., 2024).

Actualmente, la bainita se emplea en sectores como el automotriz, ferroviario y energético, donde se demandan materiales con alta relación resistencia-peso y comportamiento confiable bajo condiciones severas de servicio. En este contexto, resulta importante integrar el conocimiento disponible sobre los mecanismos de transformación bainítica, las rutas de procesamiento y su impacto en la microestructura final.

La creciente demanda de materiales con alta relación resistencia-peso ha impulsado el desarrollo de nuevas generaciones de aceros avanzados. Dentro de este grupo, los aceros bainíticos han adquirido especial relevancia debido a su capacidad para combinar resistencia mecánica elevada con buena tenacidad y ductilidad. Estas propiedades resultan particularmente importantes en aplicaciones estructurales sometidas a cargas dinámicas, desgaste o condiciones severas de servicio.

Desde el punto de vista metalúrgico, la transformación bainítica representa uno de los fenómenos más complejos dentro de las transformaciones de fase en los aceros. Su naturaleza combina características tanto de transformaciones difusivas, como la perlítica, así como de transformaciones displacivas, como la martensítica. Esta combinación de mecanismos, ha sido objeto de numerosos estudios experimentales y teóricos a lo largo de las últimas décadas.

Los avances en técnicas de caracterización microestructural, como la microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM) y difracción de rayos X, han permitido comprender con mayor detalle la morfología de la ferrita bainítica, la distribución de la austenita retenida y el papel de los elementos de aleación en la evolución microestructural. Estos estudios han contribuido significativamente al desarrollo de nuevos aceros bainíticos con propiedades mecánicas superiores.

El objetivo de este trabajo es revisar de manera crítica y actualizada los mecanismos de formación de la bainita y su relación con las propiedades mecánicas de los aceros, destacando los avances recientes en aceros bainíticos libres de carburos y sus aplicaciones tecnológicas.



METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló como una revisión bibliográfica sistemática enfocada en la microestructura bainítica y su relación con las propiedades mecánicas de los aceros.

La búsqueda de literatura se realizó en bases de datos científicas especializadas, incluyendo: Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Se consideraron principalmente artículos publicados en los últimos años, sin excluir trabajos clásicos ampliamente citados en la literatura metalúrgica.

Los criterios de selección incluyeron relevancia temática, calidad de la revista, claridad metodológica y contribución al entendimiento de los mecanismos de transformación y aplicaciones industriales.

La información recopilada fue analizada de manera comparativa para integrar los avances teóricos, experimentales y tecnológicos relacionados con la formación de bainita y su impacto en las propiedades mecánicas de los aceros.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

MECANISMOS DE TRANSFORMACIÓN BAINÍTICA Y EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL

La transformación bainítica ocurre a partir de la austenita mediante un mecanismo displacivo acompañado por la difusión del carbono. Este proceso conduce a la formación de láminas de ferrita bainítica y a la estabilización progresiva de la austenita residual enriquecida en carbono. A diferencia de la perlita, donde la difusión del carbono controla completamente el crecimiento laminar, y de la martensita, que se forma mediante una transformación sin difusión, la bainita representa un mecanismo intermedio en el cual la redistribución del carbono ocurre posteriormente a la nucleación de la ferrita bainítica (Bhadeshia y col., 2017).

La cinética de esta transformación depende principalmente de la temperatura y del tiempo de permanencia, factores que se describen mediante los diagramas tiempo-temperatura-transformación (TTT). Estos diagramas permiten representar las condiciones bajo las cuales la austenita se transforma en diferentes microestructuras como perlita, bainita o martensita, dependiendo de la temperatura y del tiempo de enfriamiento.

Desde el punto de vista cinético, la nucleación de la ferrita bainítica se encuentra fuertemente influenciada por la energía libre disponible para la transformación y por la presencia de defectos cristalinos que actúan como sitios de nucleación. Las fronteras de grano de la austenita previa, así como las dislocaciones y subestructuras generadas durante el procesamiento térmico o mecánico, pueden favorecer la formación de bainita.

Asimismo, la velocidad de crecimiento de las láminas de ferrita bainítica depende de la difusión del carbono desde la ferrita hacia la austenita adyacente. Este proceso provoca un enriquecimiento progresivo de carbono en la austenita residual, lo cual contribuye a su estabilización a temperaturas más bajas. Como resultado, la microestructura final puede estar compuesta por ferrita bainítica, austenita retenida y, en algunos casos, pequeñas fracciones de martensita formada durante el enfriamiento final.

El control de estos procesos cinéticos resulta fundamental para el diseño de tratamientos térmicos adecuados, especialmente en procesos industriales como el austemperado o el enfriamiento continuo controlado.

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LA TRANSFORMACIÓN BAINÍTICA

La composición química del acero desempeña un papel fundamental en la cinética de transformación bainítica y en la estabilidad de las fases presentes. Diversos elementos de aleación pueden modificar significativamente la velocidad de transformación, la morfología de la ferrita bainítica y la estabilidad de la austenita retenida.

El silicio es uno de los elementos más utilizados en el diseño de aceros bainíticos avanzados debido a su capacidad para inhibir la precipitación de cementita durante la transformación bainítica. Al evitar la formación de carburos, el carbono expulsado desde la ferrita bainítica se concentra en la

austenita residual, aumentando su estabilidad y favoreciendo la presencia de austenita retenida en la microestructura final.

El manganeso también tiene un efecto importante al incrementar la templeabilidad del acero y desplazar las curvas de transformación en los diagramas TTT y CCT hacia tiempos mayores. Esto permite que la transformación bainítica ocurra en intervalos de temperatura más amplios, facilitando su obtención en procesos industriales.

Otros elementos como el cromo y el molibdeno contribuyen a retardar las transformaciones difusivas, favoreciendo la formación de bainita en lugar de perlita durante el enfriamiento. Asimismo, pequeñas adiciones de boro pueden mejorar la templeabilidad al inhibir la nucleación de ferrita en los límites de grano de la austenita.

El control adecuado de estos elementos de aleación permite diseñar aceros bainíticos con microestructuras más refinadas, mayor fracción de austenita retenida y mejores propiedades mecánicas, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas generaciones de aceros avanzados de alta resistencia.

DIAGRAMAS TTT

En los diagramas TTT se distinguen regiones características de transformación, separadas por curvas que indican el inicio y el final de la transformación de fase. En particular, la denominada nariz perlítica corresponde al punto donde la transformación de la austenita ocurre con mayor rapidez. La posición de esta región es especialmente importante en el diseño de tratamientos térmicos, ya que determina las condiciones de enfriamiento necesarias para evitar la formación de perlita y favorecer la obtención de bainita o martensita.

La Figura 1 muestra un diagrama tiempo-temperatura-transformación típica para aceros hipoeutectoides, en el cual se identifican las regiones de formación de perlita gruesa, perlita fina, bainita superior y bainita inferior. Asimismo, se observa la temperatura de inicio de formación de martensita (M_s), por debajo de la cual la transformación ocurre de manera prácticamente instantánea mediante un mecanismo sin difusión. Este tipo de diagramas permite comprender la relación entre temperatura de transformación, cinética de reacción y microestructura final obtenida en el acero.



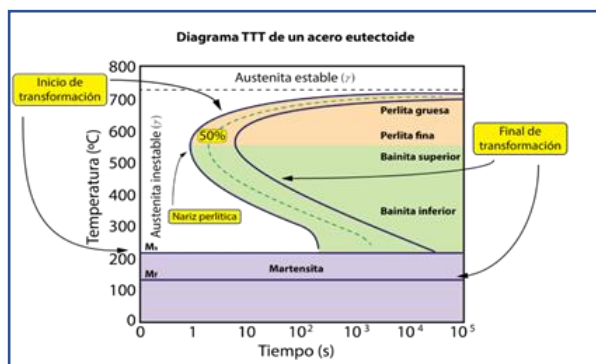


Figura 4. Diagrama TTT de las transformaciones de la austenita en aceros hipoeutectoides. (Adaptado de García-Mateo y Caballero 2005).

FORMACIÓN DE BAINITA SUPERIOR E INFERIOR

Además de la temperatura de transformación, los mecanismos de difusión del carbono desempeñan un papel fundamental en la evolución microestructural de la bainita.

A temperaturas relativamente elevadas se forma bainita superior, caracterizada por láminas de ferrita bainítica relativamente gruesas y por la precipitación de carburos entre las láminas.

Cuando la transformación ocurre a temperaturas más bajas se favorece la formación de bainita inferior, la cual presenta láminas más finas de ferrita bainítica y precipitación más dispersa de carburos dentro de la ferrita.

La Figura 2 ilustra de manera esquemática el mecanismo de formación de bainita superior y bainita inferior asociado a la difusión del carbono durante la transformación bainítica.

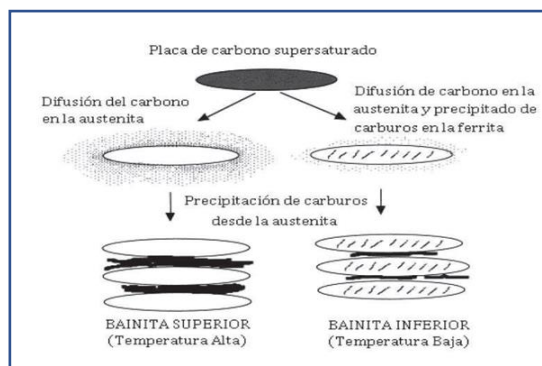


Figura 5. Bainita superior e inferior según la temperatura de transformación (Bhadeshia y col. 2017).

La diferencia entre bainita superior e inferior tiene una influencia directa en las propiedades mecánicas del acero. La bainita inferior presenta una microestructura más refinada y, por lo tanto, suele asociarse con mayores niveles de resistencia mecánica sin comprometer significativamente la tenacidad del material.

En los aceros con contenido elevado de silicio o aluminio, la precipitación de cementita durante la transformación bainítica puede inhibirse. Esto permite que el carbono expulsado desde la ferrita bainítica se concentre en la austenita residual, incrementando su estabilidad. Como consecuencia, se forma una microestructura compuesta por ferrita bainítica y austenita retenida estable, la cual puede transformarse parcialmente en martensita durante la deformación plástica, dando lugar al denominado efecto TRIP.

Este fenómeno contribuye a mejorar simultáneamente la resistencia y la ductilidad del material, lo que ha impulsado el desarrollo de aceros bainíticos libres de carburos, ampliamente investigados en los últimos años (García-Mateo y Caballero, 2005; Sun y col., 2024).

Diversos estudios han demostrado que la composición química desempeña un papel fundamental en la cinética de transformación bainítica y en la estabilidad de la austenita retenida. Elementos como silicio, aluminio y manganeso contribuyen a retardar la precipitación de carburos y a mejorar la templabilidad del acero, favoreciendo la formación de microestructuras bainíticas refinadas.

COMPARACIÓN DE INVESTIGACIONES RECIENTES

Diversas investigaciones han analizado la relación entre composición química, rutas de procesamiento y evolución microestructural en aceros bainíticos. La Tabla 1 resume algunos estudios representativos reportados en la literatura reciente, destacando los métodos de procesamiento utilizados, las microestructuras obtenidas y las propiedades mecánicas alcanzadas.

Tabla 1. Comparación de investigaciones recientes sobre aceros bainíticos.

Autor	Tipo de acero	Microestructura	Propiedades
Caballero y Bhadeshia (2004)	Bainítico de alta resistencia	Bainita ultrafina	>1500 MPa
García-Mateo y Caballero (2005)	Bainita libre de carburos	Ferrita bainítica + austenita retenida	Alta resistencia
Hu y col. (2014)	Bainítico bajo aleado	Bainita refinada	Mejora de resistencia
Kundu y col. (2020)	Bainítico medio carbono	Bainita + austenita retenida	Mayor ductilidad
Assali y col. (2024)	Bainítico industrial	Bainita refinada	Buen desempeño mecánico
Rana y col. (2024)	Bainita libre de carburos	Bainita estable	Alta resistencia
Sun y col. (2024)	Bainítico industrial	Bainita fina	Mejores propiedades
Zhou y col. (2024)	Bainítico medio carbono	Bainita libre de carburos	Microestructura refinada
Li y col. (2025)	Bainita libre de carburos	Bainita refinada	Mayor ductilidad
Mobedpour y col. (2025)	Bainítico laminado	Evolución bainítica	Mejores propiedades

DISCUSIÓN

El análisis comparativo de la literatura demuestra que la bainita constituye una microestructura altamente versátil para el desarrollo de aceros avanzados de alta resistencia.

En los últimos años, la investigación en aceros bainíticos se ha orientado hacia el desarrollo de microestructuras cada vez más refinadas, particularmente en sistemas conocidos como nanobainita o bainita nanométrica. Estos materiales se caracterizan por la formación de láminas ultrafinas de ferrita bainítica separadas por películas de austenita retenida enriquecida en carbono, lo que permite alcanzar combinaciones excepcionales de resistencia y ductilidad. Estudios recientes han demostrado que mediante el control de la composición



química y de las rutas de enfriamiento es posible obtener resistencias superiores a 1500–2000 MPa manteniendo una ductilidad adecuada, lo que amplía significativamente el potencial de aplicación de estos aceros en sectores estructurales avanzados (Rana y col., 2024; Zhou y col., 2024; Li y col., 2025). Estos avances refuerzan el interés científico y tecnológico en la transformación bainítica como una vía efectiva para el diseño de aceros de alto desempeño.

Diversos estudios experimentales y modelos cinéticos han contribuido a mejorar la comprensión de la transformación bainítica y su relación con las propiedades mecánicas de los aceros. Investigaciones recientes han analizado la evolución microestructural y la estabilidad de la austenita retenida en diferentes composiciones de acero bainítico, confirmando la influencia del tamaño de grano previo, la cinética de transformación y las rutas de procesamiento térmico sobre las propiedades finales del material (Peet y Bhadeshia, 2021; Wang y col., 2023). Asimismo, investigaciones recientes han explorado nuevos enfoques para el diseño de aceros bainíticos libres de carburos y su comportamiento bajo diferentes condiciones de procesamiento industrial, ampliando el conocimiento sobre los mecanismos de transformación bainítica (Wang y col., 2025).

La principal ventaja de esta microestructura radica en su capacidad para integrar mecanismos de transformación displacivos y difusivos, lo que permite alcanzar un equilibrio favorable entre resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad.

Otro aspecto relevante en el estudio de la bainita es la influencia de los elementos de aleación en la cinética de transformación y en la estabilidad de las fases presentes. Elementos como el silicio y el aluminio desempeñan un papel clave al inhibir la precipitación de cementita durante la transformación bainítica. Esta inhibición favorece la retención de carbono en la austenita, aumentando su estabilidad térmica y mecánica.

Por otra parte, elementos como el manganeso y el cromo contribuyen a mejorar la templabilidad del acero, desplazando las curvas de transformación en los diagramas TTT y CCT hacia tiempos mayores. Esto facilita la obtención de microestructuras bainíticas en secciones más gruesas del material, lo cual resulta particularmente importante en aplicaciones industriales.

Además, el desarrollo de aceros bainíticos ultrafinos ha permitido alcanzar propiedades mecánicas excepcionales. En estos materiales, el espesor de las láminas de ferrita bainítica puede encontrarse en el rango nanométrico, generando una microestructura extremadamente refinada que contribuye al aumento significativo de la resistencia mecánica sin comprometer la ductilidad.

Estos avances han abierto nuevas posibilidades para el uso de aceros bainíticos en aplicaciones de ingeniería avanzada, incluyendo componentes automotrices de alta seguridad, rieles ferroviarios de alto desempeño y estructuras sometidas a condiciones severas de carga y desgaste.

Diversos estudios coinciden en que la temperatura de transformación es uno de los factores más influyentes en la evolución microestructural de la bainita. A temperaturas más elevadas se forma bainita superior, mientras que a temperaturas más bajas se favorece la formación de bainita inferior o nanobainita.

Asimismo, la estabilidad de la austenita retenida desempeña un papel fundamental en la respuesta mecánica de los aceros bainíticos. La inhibición de la precipitación de cementita mediante la adición de silicio o aluminio favorece la partición del carbono hacia la austenita residual, incrementando su estabilidad frente a la transformación martensítica durante la deformación.

Desde el punto de vista del procesamiento, las rutas tradicionales de austemperado isotérmico han sido complementadas por estrategias más viables industrialmente, como el enfriamiento continuo controlado y el ausforming, las cuales permiten generar microestructuras bainíticas refinadas en tiempos más cortos.

CONCLUSIONES

La revisión realizada confirma que la bainita representa una de las microestructuras más versátiles en el diseño de aceros avanzados de alta resistencia.

El control preciso de la temperatura de transformación, la cinética de difusión del carbono y la inhibición de la precipitación de cementita permiten obtener microestructuras refinadas con fracciones significativas de austenita retenida estable.

Los avances recientes en rutas de procesamiento han demostrado la viabilidad industrial de estas microestructuras, consolidando a la bainita como una alternativa tecnológica clave para aplicaciones estructurales exigentes.

En términos generales, el estudio de la transformación bainítica continúa siendo un área activa de investigación dentro de la metalurgia física. La comprensión detallada de los mecanismos de nucleación, crecimiento y estabilización de las fases presentes permite diseñar nuevas composiciones de acero y optimizar rutas de procesamiento térmico capaces de generar microestructuras cada vez más refinadas y eficientes desde el punto de vista mecánico.

Por ello, el desarrollo de aceros bainíticos avanzados representa una línea estratégica para la industria siderúrgica moderna, especialmente en un contexto donde se requiere mejorar simultáneamente el desempeño mecánico, la seguridad estructural y la eficiencia en el uso de materiales.

AGRADECIMIENTOS

Manuel Alejandro Cortez García, No. CVU: 642172 agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y a la Universidad Autónoma de Coahuila, por el apoyo brindado en el desarrollo del proyecto de tesis.

REFERENCIAS

- Assali, A., Virtanen, P. y Haouaoui, M. (2024). Modelling and experimental validation of bainite formation under dynamic cooling conditions. *Acta Materialia*, 262: 119456. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.119456>
- Bhadeshia, H. K. D. H. y Honeycombe, R. (2017). *Steels: Microstructure and Properties* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Bhadeshia, H. K. D. H. (1980–2017). Some aspects of the bainite transformation. PhD Thesis. University of Cambridge.
- Caballero, F. G. y Bhadeshia, H. K. D. H. (2004). Very strong bainite. *Materials Science and Technology*, 20(8): 814–818.
- Callister, W. D. (2018). *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. Wiley.
- García-Mateo, C. y Caballero, F. G. (2005). Ultra-high strength bainitic steels. *ISI International*, 45(11): 1736–1740.
- Hu, F., Wu, K. M. y Zheng, H. (2014). Effect of prior austenite grain size on bainitic microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Science*, 49(24): 8312–8318.
- Kundu, S., Ray, R. K. y Bhattacharya, D. (2020). Microstructure and ductility in medium carbon bainitic steels. *Materials Science and Engineering A*, 777: 139087.
- Li, J., Zhang, T., Wang, H. y Xu, Y. (2025). Improving fracture strain of carbide-free bainitic steel via ausforming treatment. *Materials Today Communications*, 37: 109876. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.109876>
- Mobedpour, R., Fazeli, F. y Zurob, H. S. (2025). Microstructure evolution of cold-rolled carbide-free bainite steel sheets during continuous annealing process. *Metals*, 15(2): 125. <https://doi.org/10.3390/met15020125>
- Ohmori, Y. y Maki, T. (1991). Microstructure and toughness of bainitic low alloy steels. *Materials Transactions, JIM*, 32(7): 631–641.
- Peet, M. y Bhadeshia, H. K. D. H. (2021). Modeling bainite transformation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 52(3): 1345–1355.
- Rana, R., Das, S., Singh, V. y Ghosh, S. (2024). Design of carbide-free bainitic steels for hot rolling practices. *Philosophical Magazine Letters*, 104(2): 85–97. <https://doi.org/10.1080/09500839.2024.2322552>
- Sun, B., Wang, D. y Yan, W. (2024). Optimization of continuous cooling bainitic transformation for industrial strip steels. *ISI International*, 64(5): 879–888. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-503>

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Wang, P., Chen, P., Yang, D., Wang, T. y Yi, H. (2023). 980 MPa grade low-alloy carbide-free bainitic steel obtained by dynamic continuous cooling transformation. *Crystals*, 13(2): 213.
- Wang, Q., Liu, J., Zhang, X. y Chen, P. (2025). New insights for preformed martensite of carbide-free bainitic steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 29: 4321–4335. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.012>
- Zhou, K., Zhang, Z. y Wang, R. (2024). Effect of silicon and cooling rate on carbide-free bainitic transformation in medium-carbon steels. *Materials Science and Engineering A*, 890: 145832. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.145832>