

Influencia de la recrystalización dinámica sobre la microestructura y la dureza de un acero Hadfield por medio de forja en caliente

Influence of dynamic recrystallization on the microstructure and hardness of a Hadfield steel through hot forging

E. López-Arreola ^{a,*}, M.A. Suárez-Rosales ^a, L.P. Suastegui-Caballero ^a.

^aDepartamento de materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, 02200, Azcapotzalco, CDMX, México.

Resumen

El presente trabajo abordó un problema crítico en aceros Hadfield grado A: la segregación de elementos aleantes en los límites de grano, la cual afecta negativamente sus propiedades mecánicas. Mediante un tratamiento térmico de homogeneizado a 950 °C durante 24 horas, seguido de forja en caliente a la misma temperatura con un porcentaje de deformación del 40% se promovió la recrystalización dinámica en el material. Esto permitió obtener una microestructura refinada y homogénea, eliminando la segregación interdendrítica, reduciendo el tamaño de grano en un 36 % y logrando una distribución uniforme de dureza (254–264 HV). Estos resultados fueron corroborados mediante microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS), evidenciando la redistribución homogénea de elementos.

Palabras Clave:

Acero Hadfield, Segregación, Recrystalización dinámica, Dureza, Tamaño de grano.

Abstract

This study addressed a critical issue in Grade A Hadfield steels: the segregation of alloying elements at grain boundaries, which negatively affects their mechanical properties. A homogenization heat treatment at 950 °C for 24 hours, followed by hot forging at the same temperature with a 40% deformation degree, was applied to promote dynamic recrystallization in the material. This approach led to the development of a refined and homogeneous microstructure, eliminating interdendritic segregation, reducing the grain size by 36%, and achieving a uniform hardness distribution (254–264 HV). These findings were validated through optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), confirming the homogeneous redistribution of alloying elements.

Keywords:

Hadfield steel, Segregation, Dynamic recrystallization, Hardness, Grain size.

1. Introducción

El acero Hadfield es una aleación no magnética en la cual la transformación martensítica no ocurre debido a la presencia de elementos estabilizadores de la fase austenítica, principalmente manganeso y carbono. Esta composición confiere una matriz predominantemente austenítica, junto con la posible presencia de carburos en los límites de grano. La composición química de estos aceros se establece de acuerdo con la norma ASTM A128, la cual especifica un intervalo de 0.7 a 1.45 % de carbono y de 6 a 14 % de manganeso (Higuera et al., 2007; Valencia-Giraldo, 2012). A lo largo del tiempo se han propuesto diversas variantes de los aceros al manganeso originales; sin embargo, solo algunas han sido adoptadas debido a mejoras significativas en sus propiedades (Fernández-Tamayo et al., 2022). Dichas variantes incluyen modificaciones en el contenido de carbono y manganeso, con o sin la adición de elementos aleantes como cromo, níquel, molibdeno, vanadio o titanio (Sabzi & Farzam, 2019).

La austenita con altos contenidos de fósforo, azufre y elementos formadores de carburos masivos (V, Cr, Mn) presenta una elevada susceptibilidad a la fragilidad intergranular, considerada una de las principales causas de rechazo en producción y de fallas en servicio en los aceros al manganeso. Asimismo, la segregación de elementos de aleación en las zonas interdendríticas favorece la formación de carburos masivos y la consecuente disminución de la tenacidad del material. En la práctica industrial, este problema se ve agravado por el uso de retornos y chatarras en los procesos de fusión sin un control riguroso de los materiales contaminantes (Krugla et al., 2024; Wen et al., 2026). De igual manera, la aplicación inadecuada de tratamientos térmicos, particularmente por falta de control en la temperatura y el tiempo de austenización, constituye otra causa relevante. La corrección de estos defectos requiere un control estricto tanto de la composición química como de los parámetros del tratamiento térmico (García et al., 2010).

*Autor para la correspondencia: eloar@azc.uam.mx

Correo electrónico: eloar@azc.uam.mx (Edgar López-Arreola), masuarez@azc.uam.mx (Miguel Ángel Suárez-Rosales), al2203001532@azc.uam.mx (Leslie Polete Suastegui-Caballero).

Fecha de recepción: 10/10/2025 Fecha de aceptación: 07/04/2026 Fecha de publicación: 05/10/2026
<https://doi.org/10.29057/aactm.v13i13.16270>



La segregación es un fenómeno metalúrgico indeseable en los aceros, ya que puede afectar significativamente sus propiedades mecánicas y su desempeño en servicio. De acuerdo con Kurz y Fisher (2023), en su obra *Fundamentals of Solidification*, la concentración desigual de elementos aleantes durante la solidificación favorece la formación de carburos en las zonas interdendríticas, lo cual reduce la tenacidad del material y puede originar fallas prematuras. Este efecto es especialmente relevante en los aceros al manganeso del tipo Hadfield, diseñados para soportar cargas de impacto elevadas (del orden de varias toneladas) (Han et al., 2024). Los autores señalan que una velocidad de enfriamiento lenta conduce a un crecimiento excesivo del tamaño de grano y a la aparición de microsegregaciones en los límites de grano, promoviendo la precipitación de carburos y la generación de grietas. Además, las diferentes tasas de enfriamiento en una pieza fundida en arena pueden producir variaciones morfológicas y de tamaño de grano, comprometiendo la homogeneidad microestructural y, por ende, las propiedades globales del acero (Valencia-Giraldo, 2012; Kurz & Fisher, 2023).

Los aceros Hadfield son ampliamente utilizados en los sectores minero y civil debido a su alta resistencia al desgaste y al impacto, propiedades que los hacen indispensables en componentes sometidos a esfuerzos severos y condiciones extremas de trabajo. Sin embargo, estos aceros suelen presentar altos niveles de microsegregación y un tamaño de grano excesivo, lo que conlleva a una pérdida de tenacidad y al incremento de la fragilidad estructural, como se observa en la Figura 1 a) y b). Con el fin de reducir estos efectos, en el presente trabajo se propone minimizar la segregación y promover el refinamiento de grano mediante el proceso de recristalización inducida por forja en caliente. De acuerdo con Suárez Rosales (2018), la aplicación de tratamientos térmicos y mecánicos controlados permite optimizar las propiedades mecánicas de los aceros austeníticos al manganeso al mejorar su homogeneidad microestructural (Machado et al., 2021).

Por lo tanto, el presente trabajo se orienta a la corrección microestructural de estos aceros mediante técnicas de deformación en caliente, con el objetivo de promover la homogeneización de la microestructura y, en consecuencia, una distribución más uniforme de la dureza en el material. Este enfoque no solo busca mejorar el desempeño mecánico, sino también generar un impacto económico favorable al incrementar la durabilidad y la vida útil de las piezas en servicio, reduciendo fallas asociadas a heterogeneidades estructurales.

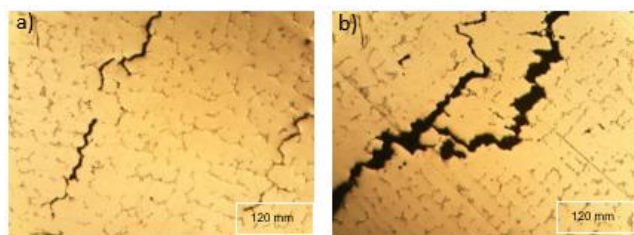


Figura 1: Microscopía óptica de la microestructura correspondiente a un acero Hadfield con grietas debido a la segregación (Suárez Rosales, 2018).

2. Desarrollo experimental

Toda la experimentación se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, específicamente en el Área de Ciencia de Materiales, donde se realizaron las etapas de procesamiento y análisis correspondientes al presente estudio.

2.1. Preparación de las probetas

Se realizó el corte de probetas de acero Hadfield grado A, a partir de un lingote obtenido mediante el proceso de colada. Se obtuvieron catorce probetas con dimensiones de $2 \times 2 \times 2$ cm.

Posteriormente, las muestras fueron rectificadas en torno con el propósito de eliminar irregularidades superficiales y asegurar uniformidad geométrica, evitando así posibles desviaciones durante el proceso de forja en caliente.

2.2. Aplicación de tratamientos térmicos y termomecánicos

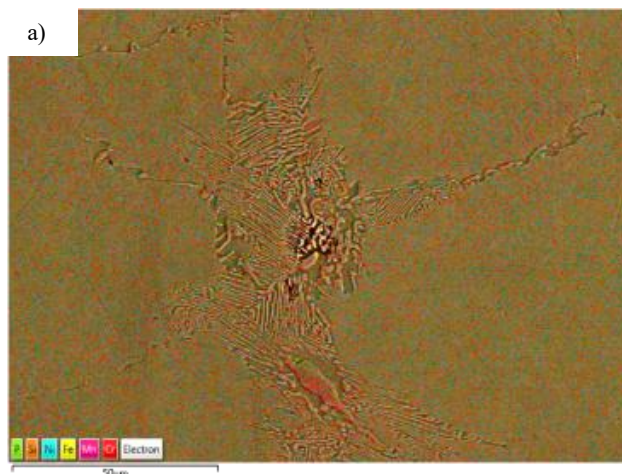
Con el objetivo de eliminar la segregación presente en el material, se efectuó un tratamiento térmico de homogeneización a una temperatura de 950°C durante 24 horas, seguido de un enfriamiento controlado dentro del horno. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de forja en caliente a una temperatura de 950°C , aplicando una deformación del 40 %, de acuerdo con lo sugerido por Vázquez Briseño (2017), con el fin de evaluar el efecto del grado de deformación sobre el refinamiento de grano y la reducción de las microsegregaciones. En la Figura 2 se muestra el proceso de forja en caliente mediante una prensa hidráulica.



Figura 2: Forja en caliente en la prensa hidráulica FLUIDICA, MODELO: FAC-120.

2.3. Caracterización microestructural

Se realizó la preparación metalográfica de las muestras, la cual consistió en un desbaste mecánico utilizando papeles abrasivos de carburo de silicio con granulometrías de 80, 180, 220, 360, 400 y 600. Posteriormente, se efectuó el desbaste fino (pulido) empleando un paño Microcloth con suspensiones de alúmina de 1.0 y $0.3\ \mu\text{m}$, hasta obtener una superficie con acabado tipo espejo. Una vez alcanzado este acabado, se aplicó un ataque químico con reactivo Nital al 2 % para revelar la microestructura del material. Finalmente, se obtuvieron micrografías mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB); además, se realizó un análisis de segregación elemental mediante la técnica de espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS). En la Figura 3 a) y b) se presenta el mapeo elemental de la probeta testigo y la deformada al 40 %, respectivamente.



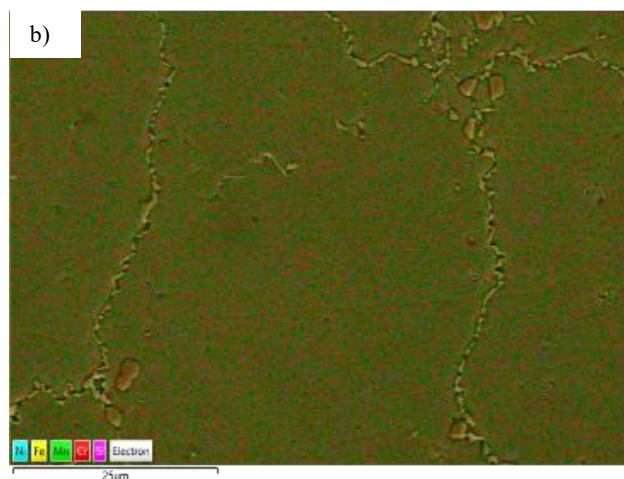


Figura 3: Mapeo elemental a) probeta testigo, b) probeta con 40% de deformación.

2.4. Medición de durezas

Se efectuaron perfiles de dureza tanto en la probeta deformada como en la probeta testigo, con el objetivo de evaluar la influencia de la segregación sobre la dureza del material. Las mediciones se realizaron utilizando un microdurómetro Vickers Tukon, modelo 1102, con una carga aplicada de 100 gramos fuerza. Se llevaron a cabo indentaciones a lo largo de varios granos, manteniendo una distancia de 50 µm entre cada huella, tal como se muestra en la Figura 4, con el propósito de analizar la variación local de la dureza y su relación con la presencia de microsegregaciones en los límites de grano.

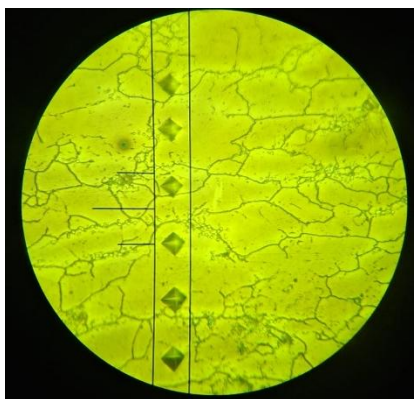


Figura 4: Toma de perfil de dureza en la probeta de acero Hadfield recristalizada con una deformación al 40%.

3. Resultados y discusión

En las Figuras 5 a) y b) se muestra la microestructura de la probeta testigo, correspondiente al material sin tratamiento térmico ni termomecánico. Se observa una matriz compuesta por granos austeníticos irregulares, heterogéneos y elongados, en los cuales se identifican carburos precipitados y colonias de perlita. Este comportamiento se atribuye al rechazo de carbono por parte de la austenita durante el enfriamiento, lo que favorece la precipitación de fases secundarias (Talebi et al., 2018). Asimismo, se evidencia la presencia de segregación interdendrítica, característica típica de los aceros provenientes del proceso de colada, donde las variaciones locales en la composición química promueven la formación de microestructuras heterogéneas.

Los carburos nuclean en los límites de grano y en las regiones interdendríticas dentro de los granos de austenita, donde tienden a presentarse de forma masiva, especialmente en los puntos triples. Esta distribución favorece la disminución de la tenacidad y puede generar un comportamiento irregular frente al desgaste; por otro lado, la dureza suele incrementarse localmente en estas zonas en comparación con la matriz, debido a la presencia de los carburos

(Bai et al., 2025). Asimismo, en las Figuras 5 c) y d) se presenta la microestructura del material posterior al tratamiento térmico.

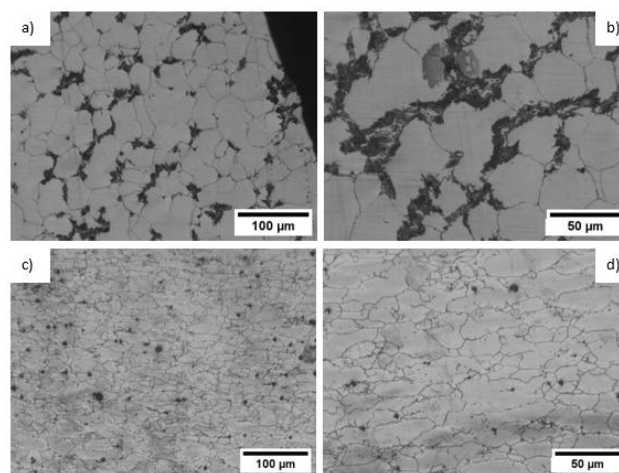


Figura 5: Microestructuras de acero Hadfield grado A a) 50x testigo, b) 100x testigo, c) 50x recristalizada, d) 100x recristalizada.

En las Figuras 6 a) y b) se presentan las micrografías obtenidas mediante MEB de la probeta testigo y de la probeta forjada en caliente al 40 % de deformación, respectivamente. En la probeta testigo se observan zonas de microsegregación, donde se identificó una morfología tipo laminillas asociada con colonias de perlita previamente observadas mediante microscopía óptica.

Por otro lado, al realizar el proceso de forja en caliente con un 40 % de deformación, se eliminó la segregación asociada a las colonias de perlita, permaneciendo únicamente los carburos en los límites de grano. Este comportamiento fue confirmado mediante el mapeo elemental realizado por EDS. En la probeta testigo, la mayoría de los elementos de aleación se encontraban concentrados en las zonas de segregación; sin embargo, en la probeta deformada al 40 % se observó una distribución más homogénea de los elementos en la microestructura del material.

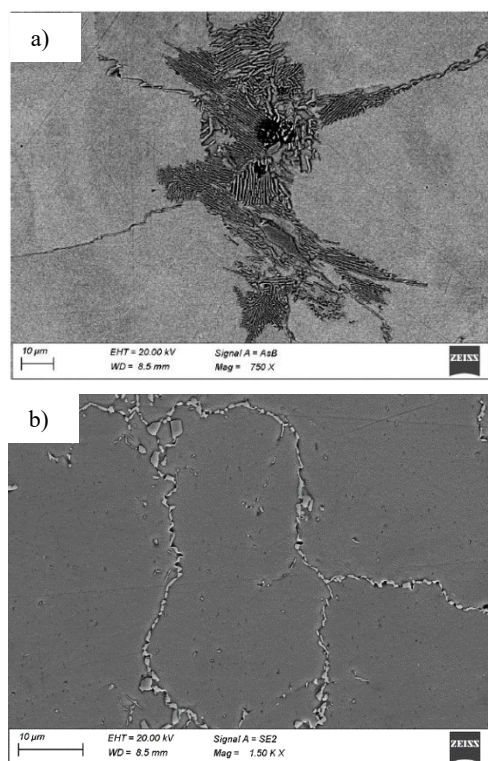


Figura 6: Micrografías mediante microscopía electrónica de barrido, a) probeta testigo, b) probeta con 40% de deformación.

Para analizar la influencia de la segregación localizada en los límites de grano, se graficaron los datos obtenidos a partir de los perfiles de dureza. En la Figura 7 se observa una variación no lineal, donde el pico máximo de dureza se registra a los 50 μm , con un valor de 562.4 HV. Este incremento se asocia con la presencia de carburos o con austenita endurecida. A los 100 μm se aprecia un decremento hasta 246.0 HV, lo que indica una zona más blanda y libre de segregación.

Esta variación puede atribuirse a un enfriamiento no uniforme durante el proceso de solidificación, a la presencia de austenita no transformada y a variaciones locales en el contenido de manganeso y cromo (Bai et al., 2025; Krugla et al., 2024; Talebi et al., 2018).

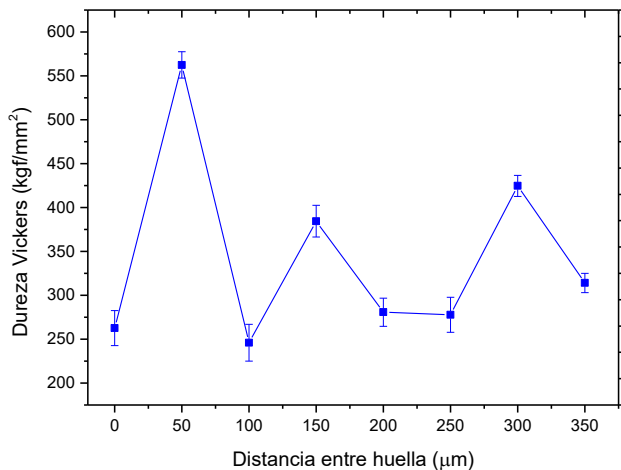


Figura 7: Perfil de dureza correspondiente a la probeta testigo de acero Hadfield grado A.

Por otro lado, en la Figura 8 se muestra el perfil de dureza correspondiente a la probeta con un 40 % de deformación, la cual presentó una menor variación entre cada indentación, evidenciando una mayor uniformidad en la respuesta mecánica del material.

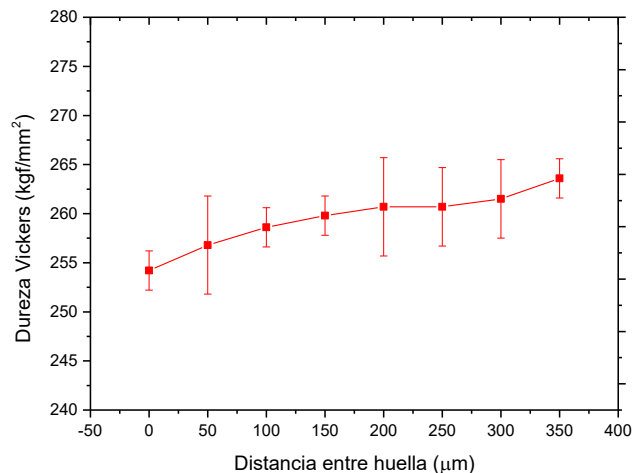


Figura 8: Perfil de dureza correspondiente a la probeta con 40% de deformación de acero Hadfield grado A.

Este comportamiento corrobora que, posterior al tratamiento térmico y termomecánico, el acero Hadfield presentó una disminución significativa de la segregación, lo que condujo a la homogeneización de la microestructura y de la dureza.

Finalmente, para complementar el análisis del efecto de la recrystalización dinámica promovida en el acero Hadfield con 40 % de deformación, se realizó la medición del tamaño de grano antes y después de los tratamientos aplicados al material. La determinación del tamaño promedio de grano se efectuó conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM E112 (Standard Test Methods for Determining Average Grain Size).

En las Tablas 1 y 2 se presentan los valores obtenidos para la probeta testigo y la probeta deformada al 40 % en caliente, respectivamente.

Tabla 1: Medición del tamaño de grano de la probeta testigo del acero Hadfield grado A.

Longitud [μm]	Numero de granos	Tamaño de grano [μm]
463.922	8	57.990
509.351	6	84.892
402.649	5	80.530
462.944	7	66.135
586.571	7	83.796
535.486	6	89.248
356.209	6	59.368
353.267	5	70.653
324.189	4	81.047
539.058	7	77.008

Tabla 2: Medición del tamaño de grano de la probeta deformada al 40 % en caliente del acero Hadfield grado A.

Longitud [μm]	Numero de granos	Tamaño de grano [μm]
438.742	7	62.677
422.535	8	52.817
456.723	7	65.246
378.494	13	29.115
366.888	9	40.765
345.708	9	38.412
373.057	11	33.914
499.676	8	62.460
554.61	11	50.419
606.487	14	43.321

Se observó que, en la probeta testigo, el material presentó un tamaño de grano promedio de $75.07 \pm 11 \mu\text{m}$. Por otro lado, en la probeta deformada en caliente se registró una disminución significativa del tamaño de grano, alcanzando un valor promedio de $47.91 \pm 13 \mu\text{m}$. Esta reducción evidencia el efecto del proceso de forja en caliente y de la recrystalización dinámica, los cuales favorecen el refinamiento de grano y, por consiguiente, una microestructura más homogénea.

Empleando la ecuación (1), se determinó el porcentaje de reducción obtenido durante el proceso de recrystalización, obteniéndose un valor de 36.2 %.

$$\% \text{ Reducción} = \frac{\text{inicial} - \text{final}}{\text{inicial}} \times 100 \quad (1)$$

Esto indica que el tratamiento térmico de homogeneizado, seguido del proceso de forja en caliente, no solo eliminó la segregación del material, sino que también refinó la microestructura, favoreciendo una mayor densidad de límites de grano, característica propia de procesos que combinan deformación, recuperación y formación de nuevos granos.

4. Conclusiones

En este estudio se comprobó que la combinación del tratamiento térmico de homogeneización con la deformación plástica en caliente constituye una estrategia eficaz para optimizar las propiedades mecánicas del acero Hadfield. La recrystalización dinámica inducida durante la forja al 40 % de deformación refinó notablemente la microestructura y eliminó la segregación, lo que se tradujo en una mayor uniformidad de dureza. Estos resultados son de especial relevancia para las industrias minera y civil, donde el acero Hadfield es ampliamente empleado en componentes expuestos a impactos y

abrasión, ya que contribuyen a prolongar su vida útil y desempeño en servicio.

Asimismo, este trabajo demuestra la importancia de controlar los parámetros termomecánicos en el diseño de aceros con microestructuras estables y propiedades superiores. Futuros estudios podrían enfocarse en analizar la influencia de elementos aleantes adicionales o distintas tasas de enfriamiento para potenciar aún más el comportamiento del material. En conjunto, esta investigación aporta conocimiento valioso para el desarrollo de aceros austeníticos al manganeso con menor segregación y con dureza más homogénea en el material.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, por las facilidades otorgadas, así como por el acceso a sus laboratorios y recursos técnicos que contribuyeron al desarrollo de este estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Bai, Z., Zhang, L., Shu, T., Wu, X., & Shen, M. (2025). Carbide precipitation behavior and impact toughness of austenitic hot-forging die steels after long-term holding at high temperatures. *Journal Name*. <https://doi.org/10.1002/srin.202500378>
- Fernández-Tamayo, M. L., Mondelo-García, F., Parada-Expósito, A., & Pino, A. S. (2022). Influencia del tratamiento térmico sobre microestructura y dureza de esteras en acero Hadfield con cromo. *Ingeniería Mecánica*, 25(1), 17-28.
- García, A., Varela, Á., Mier, J. L., Camba, C., & Barbadillo, F. (2010). Estudio tribológico de aceros austeníticos tipo Hadfield: influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste. *Revista de Metalurgia*, 46(Número Extraordinario), 47–52. <https://doi.org/10.3989/revmetalmadrid.04.1XIIPMS>
- Han, J., Luo, S., Liu, N., Chen, K., Xie, S., Wang, W., & Zhu, M. (2024). Experimental investigation on effect of cooling rate on carbide precipitation during solidification of high manganese steel. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.047>
- Higuera, O. F., Tristanchó, J. L., & Florez, L. C. (2007). Fundamentos teóricos de los aceros auteníticos al manganeso (aceros hadfield). *Scientia et Technica*, 13(34), 231-236.
- Krugla, M., Offerman, S. E., Sietsma, J., & Hanlon, D. N. (2024). Microsegregation influence on austenite formation from ferrite and cementite in Fe–C–Mn–Si and Fe–C–Si steels. *Metals*, 14(1), 92. <https://doi.org/10.3390/met14010092>
- Machado, P. C., Pereira, J. I., & Sinatora, A. (2021). Subsurface microstructural dynamic recrystallization in multiscale abrasive wear. *Wear*, 486, 204111. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204111>
- Sabzi, M., & Farzam, M. (2019). Hadfield manganese austenitic steel: a review of manufacturing processes and properties. *Materials research express*, 6(10), 1065c2. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3ee3>
- Suárez Rosales, M. Á. (2018). Desarrollo de aceros austeníticos al manganeso (Hadfield) con optimización de las propiedades mecánicas mediante refinamiento de grano y tratamientos térmicos (Proyecto de investigación asignado por la SIP 20181985). Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, Campus Zacatecas, Instituto Politécnico Nacional.
- Talebi, S. H., Jahazi, M., & Melkonyan, H. (2018). Retained austenite decomposition and carbide precipitation during isothermal tempering of a medium-carbon low-alloy bainitic steel. *Materials*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/ma11081441>
- Valencia Giraldo, A. (2012). Los aceros avanzados. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería.
- Valencia Giraldo, A. (2012). El acero Hadfield revisitado. *Revista Colombiana de Materiales*, (3), 1–24. <https://doi.org/10.17533/udea.rcm.13224>
- Vázquez Briseño, L. (2017). Teoría de la plasticidad a los procesos de formado de metales. México: Pearson Educación de México.
- W. Kurz, D.J. Fisher, “Fundamentals of solidification”, Trans tech publications ltd., (2023).
- Wen, Z., Tan, Z., Xu, L., Shi, C., & Xiong, L. (2026). Effect of elemental segregation and minor phase on mechanical properties of as-cast super-thick steels studied using in-situ synchrotron X-ray and neutron diffraction. *Microstructures*, 6, 2026017. <https://doi.org/10.20517/microstructures.2025.16>