

Relación entre microestructura y propiedades mecánicas del acero DP780 tras tratamiento intercrítico controlado

Relationship between microstructure and mechanical properties of DP780 steel after controlled intercritical treatment

V. Miranda-López ^{a,*}, N. A. López-López ^a, M. Gerardo-Dolores ^a, C. Pérez-Téllez ^a, M. L. Saucedo-Muñoz ^a
V. M. López-Hirata ^a

^a Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, 07300, CDMX, México.

Resumen

Este trabajo analiza la influencia de tratamientos térmicos intercríticos controlados en la evolución microestructural y las propiedades mecánicas de un acero comercial de doble fase (DP780) en lámina. El diseño de los tratamientos se realizó con el software Thermo-Calc, que permitió identificar la región intercrítica entre A1 y A3, así como estimar las fracciones de martensita formadas tras el enfriamiento rápido. La validación experimental se efectuó mediante microscopía óptica y pruebas de dureza Vickers. Tras los tratamientos intercríticos, la fracción de martensita se ajustó entre 26 % y 34 %, con valores de dureza de 202 HV y 256 HV, respectivamente. Estos resultados mostraron buena concordancia con las proyecciones termodinámicas. Se identificó una tendencia clara: el incremento de martensita genera mayor dureza y resistencia. La condición con 34% de martensita se determinó como la más adecuada en cuanto a equilibrio entre resistencia y ductilidad entre las experimentadas. Sin embargo, de acuerdo a Thermo-calc es posible obtener mayores valores de dureza y tensión con mayores fracciones de martensita, aunque podría ser con pérdida de ductilidad. Estos resultados confirman que el diseño térmico asistido por simulación es una estrategia efectiva para optimizar aceros de doble fase destinados a la industria automotriz, donde la seguridad estructural y la reducción de peso son requisitos fundamentales.

Palabras Clave: Acero de doble fase; DP780; Tratamiento térmico intercrítico; Fracción de martensita; Simulación con Thermo-Calc; Dureza Vickers; Aceros avanzados de alta resistencia; Relación microestructura–propiedades.

Abstract

This work analyzes the influence of controlled intercritical heat treatments on the microstructural evolution and mechanical properties of a commercial dual-phase steel sheet (DP780). The treatments were designed using Thermo-Calc software, which allowed the identification of the intercritical region between A1 and A3, as well as the estimation of martensite fractions formed after rapid cooling. Experimental validation was carried out through optical microscopy and Vickers hardness testing. After intercritical treatments, the martensite fraction was adjusted between 26 % and 34 %, with corresponding hardness values of 202 HV and 256 HV, respectively. These results showed good agreement with thermodynamic projections. A clear trend was identified: an increase in martensite leads to higher hardness and strength. The condition with 34 % martensite was determined as the most suitable among the tested ones in terms of strength–ductility balance. However, according to Thermo-Calc, higher hardness and tensile strength values are achievable with larger martensite fractions, although possibly at the expense of ductility. These findings confirm that simulation-assisted thermal design is an effective strategy to optimize dual-phase steels for the automotive industry, where structural safety and weight reduction are critical requirements.

Keywords: Dual-phase steel; DP780; Intercritical heat treatment; Martensite fraction; Thermo-Calc simulation; Vickers hardness; Advanced high-strength steels; Microstructure–property relationship.

*Autor para la correspondencia: vmirandal1600@alumno.ipn.mx

Correo electrónico: vmirandal1600@alumno.ipn.mx (V. Miranda-López), nlopez1800@alumno.ipn.mx (N. A. López-López), mgerardod2000@alumno.ipn.mx (M. Gerardo-Dolores), cperez1800@alumno.ipn.mx (C. Pérez-Téllez), msaucedom@ipn.mx (M. L. Saucedo-Muñoz), vmlopezh@ipn.mx (V. M. López-Hirata)

Historial del manuscrito: recibido el 19/09/2025, última versión revisada recibida el 05/11/2025, aceptado el 08/11/2025, publicado el 12/12/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial4.16042>



1. Introducción

Los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS, por sus siglas en inglés) constituyen un grupo de materiales desarrollados específicamente para la industria automotriz con el objetivo de mejorar la seguridad estructural de los vehículos y, al mismo tiempo, reducir su peso para cumplir con las exigencias de eficiencia energética y normativas ambientales. Estos aceros se caracterizan por combinar alta resistencia con niveles aceptables de ductilidad, lo que permite su conformado en piezas complejas sin comprometer la integridad mecánica.

Dentro de los AHSS, los aceros de doble fase (DP) ocupan un lugar destacado debido a su microestructura compuesta principalmente por una matriz de ferrita blanda y una fracción dispersa de martensita dura. Esta combinación de fases confiere a los aceros DP una curva esfuerzo–deformación sin punto de cedencia definido, con bajo límite elástico, alta resistencia a la tensión y buena capacidad de endurecimiento por deformación. Tales características resultan ventajosas para aplicaciones en zonas críticas del automóvil, como rieles, pilares, refuerzos de puertas y componentes que deben absorber energía durante impactos.

El desempeño de los aceros DP depende directamente de la fracción volumétrica, la morfología y la distribución de ferrita y martensita. Un incremento en la cantidad de martensita generalmente eleva la resistencia y la dureza, aunque a costa de reducir la ductilidad. Por lo tanto, alcanzar un equilibrio óptimo entre ambas fases es esencial para satisfacer simultáneamente los requisitos de seguridad y conformabilidad.

Una de las rutas más empleadas para modificar y controlar las fracciones de fase en los aceros DP consiste en realizar tratamientos térmicos intercríticos. Estos tratamientos se llevan a cabo en el intervalo de temperaturas comprendido entre A₁ y A₃, donde coexisten ferrita y austenita. Posteriormente, al enfriar rápidamente, la austenita intercrítica se transforma en martensita, ajustando así la relación ferrita–martensita final. El control preciso de estos parámetros requiere no sólo de experimentación, sino también del apoyo de herramientas computacionales que permitan predecir el comportamiento del acero en distintas condiciones de proceso.

En este sentido, el software Thermo-Calc se ha consolidado como una herramienta para el diseño de tratamientos térmicos en aceros avanzados, ya que permite calcular diagramas de equilibrio, temperaturas críticas, fracciones de fase y propiedades mecánicas asociadas. El uso de simulación computacional reduce el número de pruebas experimentales necesarias y proporciona un marco de referencia para interpretar los resultados obtenidos en laboratorio. El presente trabajo se centra en el acero DP780, ampliamente utilizado en la industria automotriz. El objetivo es establecer la relación entre la fracción de martensita y las propiedades mecánicas (particularmente dureza) tras la aplicación de tratamientos intercríticos diseñados con apoyo de simulaciones termodinámicas.

2. Metodología numérica

El enfoque metodológico seguido en este trabajo combinó herramientas numéricas de simulación termodinámica con pruebas experimentales de caracterización microestructural y

mecánica. Esto permitió diseñar los tratamientos térmicos intercríticos de manera controlada, validar las predicciones de fracción de fases y establecer la relación entre microestructura y propiedades mecánicas en el acero DP780.

2.1. Diseño numérico mediante ThermoCalc

Se empleó el software Thermo-Calc para calcular:

- Diagrama de equilibrio Fe–C modificado para la composición del acero DP780, que permitió identificar las temperaturas críticas A₁ y A₃.
- Región intercrítica de coexistencia ferrita–austenita, que definió los intervalos de tratamiento térmico.
- Diagramas de transformación martensítica, con los cuales se estimaron las fracciones de martensita esperadas tras el temple.
- Proyecciones de dureza Vickers y resistencia a la tensión en función de la fracción de martensita.

2.2. Material de Estudio

El material evaluado fue un acero avanzado de alta resistencia de tipo dual phase (DP780) en lámina con espesor de 2 mm. Su composición química nominal se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición química del acero DP780, % peso

Elemento	C	Si	Mn	Cr
% Peso	0.11	0.53	2.38	0.38

Este acero fue seleccionado por su amplio uso en la industria automotriz en componentes estructurales y de absorción de energía, y por su microestructura característica de ferrita y martensita en condición de entrega

2.3. Tratamientos térmicos intercríticos

Los tratamientos térmicos se llevaron a cabo en un horno con baño de grafito, el cual permitió controlar la temperatura dentro del rango intercrítico. Se seleccionaron dos temperaturas representativas:

~690 °C, cercana al límite inferior del rango, donde se espera mayor fracción de ferrita y menor de martensita.

~725 °C, hacia la parte superior del rango, con mayor volumen de austenita transformable a martensita tras el enfriamiento.

En ambos casos, las muestras se enfriaron rápidamente (temple), con el fin de transformar la austenita intercrítica en martensita.

2.4. Caracterización microestructural

Las muestras fueron preparadas metalográficamente mediante corte, montaje, desbaste y pulido, y posteriormente atacadas con reactivo LePera. La observación se realizó en microscopía óptica en un microscopio Nikon Eclipse MA200, en campo claro a 1000 aumentos, capturando micrografías representativas para cada condición.

Las fracciones de ferrita y martensita se determinaron mediante análisis de imagen con el software ImageJ, a partir

de cinco campos representativos por muestra. Las fracciones obtenidas en cada campo se promediaron para obtener el valor global de cada fase.

2.5. Caracterización mecánica

Las propiedades mecánicas se evaluaron mediante pruebas de dureza Vickers siguiendo la norma ASTM E92 en un micro durómetro Future Tech modelo F-810HV. Se aplicaron cargas adecuadas para asegurar impresiones bien definidas, 300gf durante 12s. Se realizaron 12 mediciones, por muestra para obtener un valor promedio confiable.

Los resultados de dureza se correlacionaron con las fracciones de fase determinadas experimentalmente y con las proyecciones obtenidas mediante Thermo-Calc, lo que permitió establecer la relación microestructura–propiedades mecánicas en las distintas condiciones.

3. Resultados y Discusión

3.1. Análisis numérico con Thermo-Calc

El cálculo termodinámico permitió identificar con precisión la región intercrítica del acero DP780. En el diagrama de equilibrio Fe–C modificado (Fig. 1) se observa la coexistencia de ferrita (α) y austenita (γ) en el intervalo de temperaturas comprendido entre A1 y A3. Esta región fue la base para diseñar los tratamientos térmicos intercríticos.

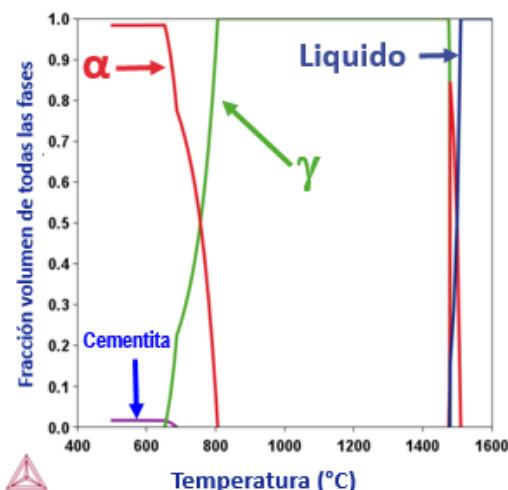


Figura 1. Diagrama de equilibrio calculado para el acero DP780 con Thermo-Calc, mostrando la región intercrítica entre A1 y A3.

De manera complementaria, se construyó el diagrama de transformación martensítica (Fig. 2) para la condición intercrítica correspondiente a 50 % austenita y 50 % ferrita. En la gráfica se aprecia cómo la fracción de martensita formada depende directamente de las temperaturas características de inicio (Ms) y finalización (Mf). A partir de Ms, la austenita intercrítica comienza a transformarse rápidamente en martensita hasta alcanzar, en torno a Mf, el valor máximo cercano al 50 %, que corresponde a la fracción de austenita disponible en el estado inicial. Este análisis permitió proyectar con precisión las fracciones finales de martensita tras el

temple, en función de la cantidad de austenita generada en el tratamiento intercrítico.

Finalmente, Thermo-Calc permitió calcular las tendencias de dureza Vickers y resistencia última a la tensión como función de la fracción de martensita (Fig. 3). Se observa una tendencia clara: al incrementar la fracción de martensita, aumentan tanto la dureza como la resistencia, aunque con un límite proyectado de estabilidad en torno al 50 % de martensita de acuerdo con la temperatura de tratamiento térmico indicado por el diagrama de equilibrio.

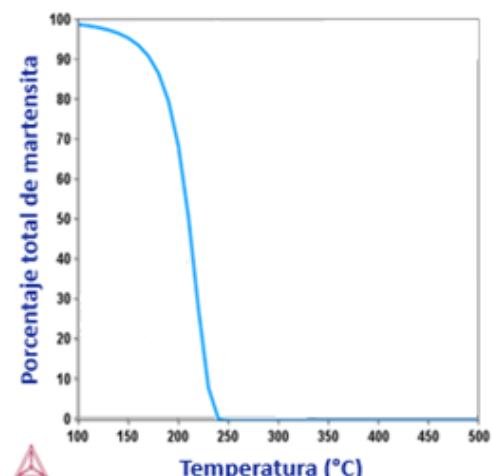


Figura 2. Diagrama de transformación martensítica para el acero DP780, indicando las temperaturas críticas Ms y Mf desde 50% austenita.

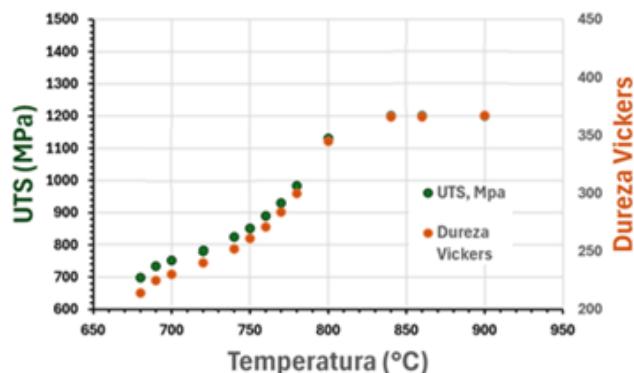


Figura 3. Relación proyectada entre dureza Vickers, resistencia última a la tensión y fracción de martensita obtenida mediante Thermo-Calc.

3.2. Resultados experimentales de microestructura

La microestructura de la condición de recibido del acero se muestra en la figura 4.



Figura 4. Microestructura del acero DP780 en condición de recibido.

En la condición de recibido, el acero presenta la microestructura característica de los aceros de doble fase, compuesta por ferrita y martensita, aunque las condiciones exactas de su tratamiento térmico previo no son conocidas. La fase clara corresponde a la ferrita y la fase oscura a la martensita.

Las microestructuras tras tratamientos intercríticos se muestran en la figura 5,

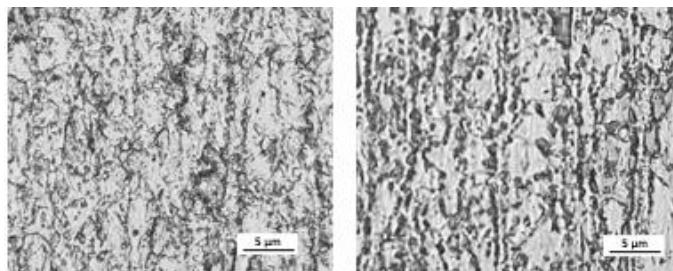


Figura 5. Microestructura del acero DP780 tras tratamiento intercrítico a ~690 °C y ~725 °C.

Después de los tratamientos intercríticos (~690 °C y ~725 °C), se observa el ajuste controlado de la fracción de fases. A ~690 °C, se obtuvo una microestructura con predominio de ferrita (74 %) y menor cantidad de martensita (26 %). A ~725 °C, se alcanzó 66 % ferrita y 34 % martensita.

3.3. Resultados de dureza

Los valores de dureza Vickers obtenidos experimentalmente se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de microestructura y dureza del acero DP780

Condición	Ferrita (%)	Martensita (%)	Dureza (HV)
~690 °C	74	26	202
~725 °C	66	34	256

Se observa que el aumento de la fracción de martensita de 26 % a 34 % se acompaña de un incremento significativo en la dureza (202 a 256 HV), confirmando la relación proyectada por Thermo-Calc, Figura 6.

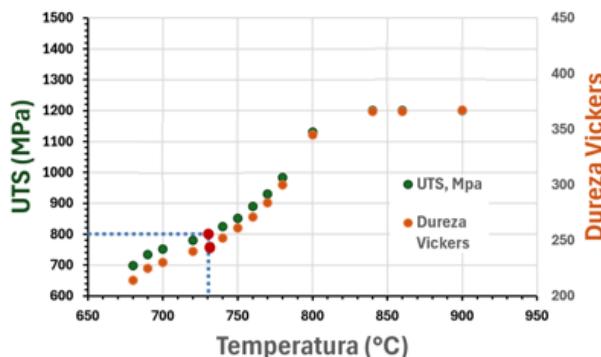


Figura 6. Comparación de la dureza experimental con las proyecciones de Thermo-Calc, mostrando la tendencia ascendente con el incremento en la fracción de martensita

Los resultados obtenidos demuestran una alta correspondencia entre simulación y experimento, lo que confirma la utilidad de Thermo-Calc como herramienta de predicción en el diseño de

tratamientos térmicos intercríticos. La variación controlada de la fracción de martensita tuvo un efecto directo en la dureza del acero: una disminución a 26 % redujo la dureza a 202 HV, mientras que un incremento a 34 % permitió recuperar valores de 256 HV, cercanos a la condición original (259 HV). Esto evidencia que pequeños cambios en la proporción de martensita producen variaciones significativas en las propiedades mecánicas. Bajo este análisis, la condición cercana al 34 % de martensita se identifica como la más adecuada en términos de equilibrio entre resistencia y ductilidad, mientras que la proyección de 50 % de martensita, aunque prometedora en resistencia, deberá ser validada experimentalmente para garantizar su viabilidad en aplicaciones automotrices.

4. Conclusiones

El presente trabajo permitió establecer la relación entre la fracción de martensita y las propiedades mecánicas del acero DP780 tras tratamientos intercríticos diseñados con apoyo de simulaciones termodinámicas. Los resultados numéricos y experimentales mostraron una tendencia coherente y confirmaron el papel dominante de la microestructura en el desempeño mecánico de los aceros de doble fase. A partir del análisis realizado se destacan las siguientes conclusiones:

- Se obtuvieron microestructuras ferrita–martensita en el acero DP780 mediante tratamientos intercríticos controlados en baño de grafito.
- Las fracciones de martensita obtenidas experimentalmente (26–34 %) mostraron buena concordancia con las proyecciones calculadas por Thermo-Calc.
- El incremento de la martensita de 26 % a 34 % produjo un aumento en la dureza de 202 a 256 HV, confirmando la relación directa entre microestructura y propiedades mecánicas.
- La condición cercana al 34 % de martensita ofrece el mejor compromiso entre resistencia y ductilidad, mientras que las proyecciones por arriba de 50 % martensita se mantienen como un escenario a validar experimentalmente para aplicaciones automotrices.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de IPN- SIP-Beifi-IPN.

Referencias

- Senuma, T. (2004) Processing and Properties of Advanced High Strength Steel Sheets. Canadian Metallurgical Quarterly, Canadá, pp. 1-12.
 Fonstein, N. (2015) Advanced High Strength Sheet Steels: Physical Metallurgy, Design, Processing, and Properties. Springer International Publishing.
 G. Yang, C. Zhuang, C. Li, F. Lan y H. Yao. (2021) Study on High-Temperature Mechanical Properties of Fe–Mn–C–Al TWIP/TRIP Steel, metals, vol. 11, n° 5.
 F. Fang, H. Wang, Y. Yin y C. Lin. (2013). Thermodynamic Characterization in Intercritical Annealing Processes for Dual-Phases Steels, Advanced Materials Research, Vols. %1 de %2602-604, pp. 452-453.

- Romano-Acosta, L., García-Rincón, O., Pedraza, J., Palmiere, E. (2021) Influence of thermomechanical processing parameters on critical temperatures to develop an Advanced High Strength Steel microstructure. *J. Mater. Sci.*
- Mark, A., Westphal, M., Boyd, D., McDermid, J., Embury, D. (2009) Microstructural Design of Multiphase Advanced High Strength Steels. *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, 48, Canadá.
- Matlock, D.K., Speer, J.G. (2010) Processing Opportunities for New Advanced High-Strength Sheet Steels. *Materials and Manufacturing Processes*, 25.
- Porter, D.A., Easterling, K.E., Sherif, M.Y. (2021) Phase Transformations in Metals and Alloys, 5a ed., Taylor & Francis, EUA, pp. 375-493.
- Kokosza, A., Pacyna, J. (2010) Mechanical stability of retained austenite in unalloyed structural steels of various carbon content. *Archives of Metallurgy and Materials*, 55(4), 1001–1006.
- Adamczyk, J., Grajcar, A. (2005) Structure and mechanical properties of DP-type and TRIP-type sheets obtained after the thermomechanical processing. *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163, 162–163.
- Park, M-H., Matsubayashi, R., Shibata, A., Tsuji, N. (2024) Quantitative characterization of local deformation-fracture behavior in ferrite-martensite dual-phase steels with different martensite distributions. *Materials Science and Engineering A*, 918, 147445, 1-11.
- Ogatsu, K., Ogawa, T., Chen, T-T., Sun, F., Adachi, Y. (2025) Dramatic improvement in strength–ductility balance of dual-phase steels by optimizing features of ferrite phase. *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 289-297.