



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2024,
Volumen 8, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4

EFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN ACERO API

**EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE
AND WEAR RESISTANCE OF AN API 5CT STEEL**

Cynthia Abigail Guerra Linares
Universidad Autónoma de Coahuila, México

Ma de Jesús Soria Aguilar
Universidad Autónoma de Coahuila, México

Josefina García Guerra
Universidad Autónoma de Coahuila, México

Antonia Martínez Luévanos
Universidad Autónoma de Coahuila, México

Francisco Raúl Carrillo Pedroza
Universidad Autónoma de Coahuila, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12774

Efecto del Tratamiento Térmico sobre la Microestructura y Resistencia al Desgaste de un Acero API

Cynthia Abigail Guerra Linares¹

cynthia_guerra@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0001-3818-0890>

Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Coahuila
México

Ma de Jesús Soria Aguilar

ma.soria@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3910-7772>

Facultad de Metalurgia
Universidad Autónoma de Coahuila
México

Josefina García Guerra

josefinagarcia@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5441-301X>

Facultad de Metalurgia
Universidad Autónoma de Coahuila
México

Antonia Martínez Luévanos

aml5902@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3499-1693>

Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Coahuila
México

Francisco Raúl Carrillo Pedroza

raul.carrillo@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0413-0676>

Facultad de Metalurgia
Universidad Autónoma de Coahuila
México

RESUMEN

Se examinó el efecto del tratamiento térmico en la microestructura y la resistencia al desgaste de un acero API 5CT, destacando su relevancia en aplicaciones industriales, particularmente en el sector petrolero, donde la durabilidad y el rendimiento del material son críticos para la integridad de los equipos. Se realizó tratamiento térmico de recocido intercrítico a temperaturas de 730 y 790 °C, con tiempos de permanencia de 5, 10 y 20 minutos, posteriormente se analizó la microestructura, dureza, microdureza y resistencia al desgaste Pin on Disk. Los resultados obtenidos identificaron un incremento de dureza y aumento de la resistencia al desgaste del acero tratado a 790 °C, con un tiempo de permanencia de 10 minutos, cuando se emplea agua a temperatura ambiente como medio de enfriamiento, gracias a la formación de fases tales como martensita, presentes en aproximadamente un 50%.

Palabras clave: acero API, tratamiento, desgaste, corrosión

¹ Autor principal.

Correspondencia: ma.soria@uadec.edu.mx

Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Wear Resistance of an API 5CT Steel

ABSTRACT

The effect of heat treatment on the microstructure and wear resistance of an API 5CT steel was examined, highlighting its relevance in industrial applications, particularly in the petroleum sector, where the durability and performance of the material are critical for equipment integrity. Intercritical annealing heat treatment was performed at temperatures of 730 and 790°C, with holding times of 5, 10, and 20 minutes. Subsequently, microstructure, hardness, microhardness, and Pin on Disk wear resistance were analyzed. The results identified an increase in hardness and wear resistance of the steel treated at 790°C for 10 minutes, when using water at room temperature as the cooling medium, attributed to the formation of phases such as martensite, present in approximately 50%.

Keywords: API steel, treatment, wear, corrosion

Artículo recibido 10 julio 2024

Aceptado para publicación: 15 agosto 2024



INTRODUCCIÓN

El acero desempeña un papel crucial en la industria petrolera debido a su capacidad para resistir condiciones extremas de presión, temperatura y desgaste. Entre los diferentes tipos de acero utilizados en la industria petrolera, el acero API (American Petroleum Institute) destaca por su amplia aplicación en la fabricación de tuberías, equipos de perforación, estructuras submarinas y otros componentes críticos para la extracción, transporte y procesamiento de petróleo y gas (Cuenca, S. et al., 2024) (Shaanxi World Iron & Steel Co., 2018). El tratamiento térmico es una técnica fundamental en la manipulación de propiedades mecánicas y metalúrgicas del acero, permitiendo mejorar su resistencia, dureza y otras características que influyen directamente en su desempeño en condiciones operativas adversas (Queirós, G. 2020). Por ello, se sometió el acero API 5CT a temperaturas intercríticas entre el rango de 709 y 810 °C, durante tiempo suficiente para permitir la formación de una mezcla de ferrita y austenita (Srinivas, R. et al., 2022), luego al enfriar rápidamente en agua la austenita se transforma en martensita debido a la alta velocidad de enfriamiento que no permite la difusión de átomos de carbono (Abedini et al., 2019). En el contexto de la industria petrolera, donde la fiabilidad y seguridad de las infraestructuras son primordiales, el impacto del tratamiento térmico en el comportamiento del acero API adquiere una relevancia significativa (Alvarez, E. 2023).

La comprensión detallada de cómo diferentes parámetros de tratamiento térmico afectan las propiedades del acero API permite una optimización más precisa de los procesos de fabricación y tratamiento, lo que puede llevar a la aplicación efectiva de tratamientos térmicos a temperaturas intercríticas que aumentan la resistencia, tenacidad y dureza del acero API, lo que resulta en una mayor capacidad para resistir condiciones operativas adversas, como en este caso desgaste por adhesión. Esto puede conducir a una reducción en los costos de mantenimiento y reemplazo de equipos, así como a una mejora en la protección del medio ambiente al reducir la probabilidad de accidentes y derrames como también seguridad operativa en un entorno exigente como el de la industria petrolera.

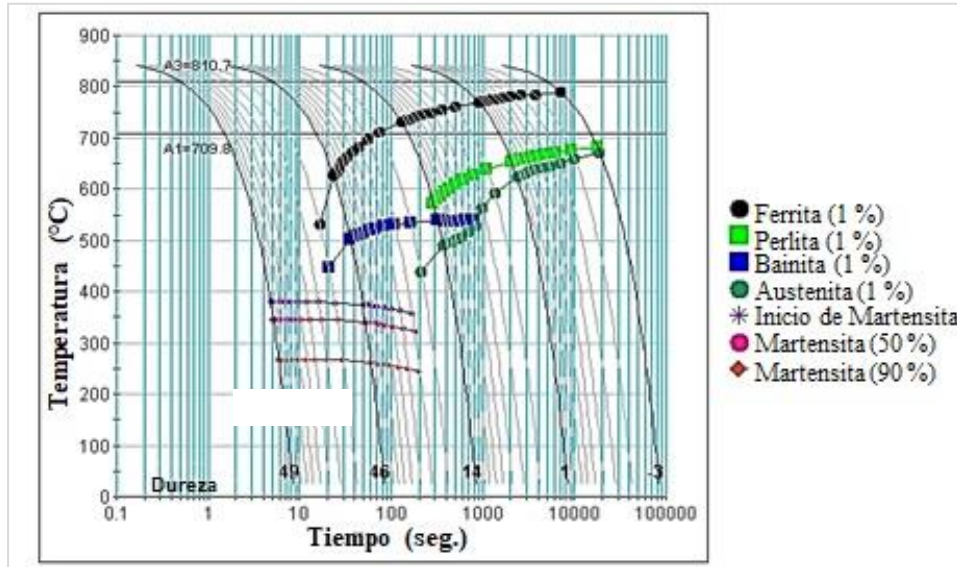
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El material de estudio en este trabajo fue acero grado API, suministrado por la empresa Altos Hornos de México S. A., en forma de placa rectangular, el cual se cortó en probetas cúbicas de 1 cm de lado para facilitar el manejo. Posteriormente se sometieron las pruebas a tratamiento térmico de recocido



intercrítico a temperaturas de 730 y 790 °C, dentro de las líneas A₁ y A₃ del diagrama CCT (transformación por enfriamiento continuo) del acero API, mostrado en la Figura 1.; seguido de un enfriamiento en agua a temperatura ambiente acorde al diseño de experimentos estilo Taguchi de arreglo ortogonal L, mostrado en la Tabla I.

Figura 1. Diagrama CCT del acero API.



Fuente: Cortesía de la empresa AHMSA.

Tabla I. Diseño de experimentos Taguchi.

Prueba	Temperatura (°C)	tiempo (min.)
1	730	5
2	730	10
3	730	20
4	790	5
5	790	10
6	790	20

Nota. Medio de enfriamiento, agua a temperatura ambiente.

Metalografía: Se empleó una máquina pulidora rotativa y se utilizaron distintos tipos de papel abrasivo de carburo de silicio con granulometrías entre 80 y 2000 micrómetros para el desbaste de las muestras. El pulido se llevó a cabo utilizando paños de lana y alúmina con un tamaño de partícula de 0.3 micrómetros, mientras que para el ataque químico se empleó una solución de Nital al 2%. Posteriormente, la microestructura resultante fue observada utilizando un microscopio óptico estándar.

Cuantificación de fases: Se realizó con ayuda del software libre de acceso ImageJ, utilizando 50 imágenes superficiales de cada probeta a 500X de aumento, obteniendo la cuantificación mediante la coloración de los diferentes niveles.

Pruebas de dureza: Se efectuaron diez mediciones en la superficie pulida de las muestras de acero API, tratadas térmicamente, así como en una muestra de referencia, utilizando un durómetro con escala Rockwell B (HRB), empleando un indentador de bola y una carga de 100 kg (Guzmán, D. et al., 2022).

Pruebas de microdureza (HV): En las muestras pulidas hasta acabado espejo se realizaron diez indentaciones en las probetas modificadas por tratamiento térmico, para obtener la dureza en escala Vickers (HV), utilizando un indentador de punta diamante y una carga de 100 gf (gramos fuerza).

Pruebas de desgaste Pin on Disk: Se llevaron a cabo siguiendo la norma ASTM G99, con las condiciones de 10 N de carga, 250 m de distancia y velocidad de 5 m/s, y como contraparte se utilizó una bola de alúmina con frecuencia de 1 HZ. En este caso, la superficie de la muestra debe estar previamente pulida para eliminar irregularidades, suciedad o contaminantes (Quispe, D. et al., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del tratamiento térmico en la morfología y formación de fases.

Se realizó un análisis microestructural de las probetas modificadas por tratamiento térmico. Las Figuras 2 y 3 muestran microestructuras del acero API tratado a 730 y 790 °C, se observan zonas claras correspondiente a la fase ferrita, y zonas oscuras que corresponden a la fase martensita con cantidades mínimas de perlita, bainita o austenita retenida (Ennis, B. et al., 2018). Este tipo de microestructura resulta por una austenización completa al superar la línea A_1 (709 °C), y posteriormente, a medida que la temperatura aumenta, la ferrita comienza a nuclear en los límites de grano de la austenita, y durante el enfriamiento, la austenita presente se convierte en martensita, resultando en la disminución de la cantidad de austenita retenida, mientras que la ferrita formada a la temperatura del tratamiento, permanece en la microestructura (Pinzon, J. 2023).

En cuanto a su estructura, se aprecia que, a menor tiempo de permanencia a la temperatura de tratamiento térmico, se observan granos equiaxiales, de acuerdo con Monkova, 2019, es común cuando el acero es sometido a un tratamiento térmico de recocido a temperaturas intercríticas desde los 720 hasta los 900 °C (Monkova, K. et al., 2019). Cuando el acero es tratado a mayor temperatura y tiempo,

se observa la formación de martensita dentro del grano de austenita en forma de listones paralelos reagrupados, donde, la cantidad de austenita retenida depende en gran parte del contenido de carbono del acero, sin embargo las fracciones de volumen tanto de ferrita como de martensita dependen exclusivamente del tiempo de exposición (10 y 20 min) (Xiao, X. et al., 2018).

Figura 2. Microestructuras del acero API tratado térmicamente a 730 °C, a) 5, b)10 y c) 20 minutos.

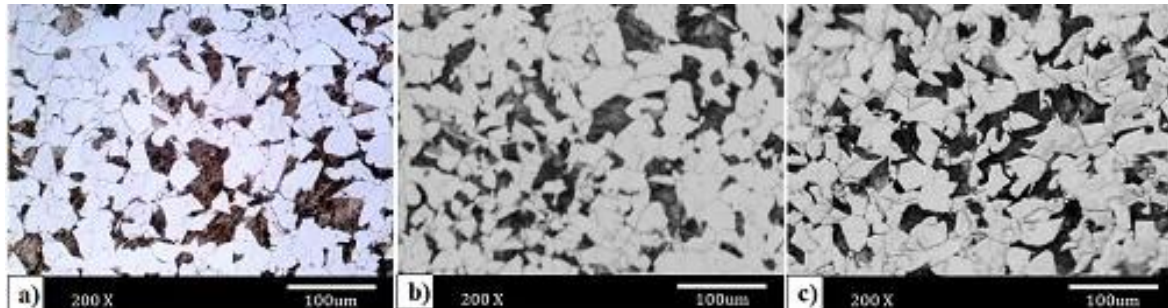
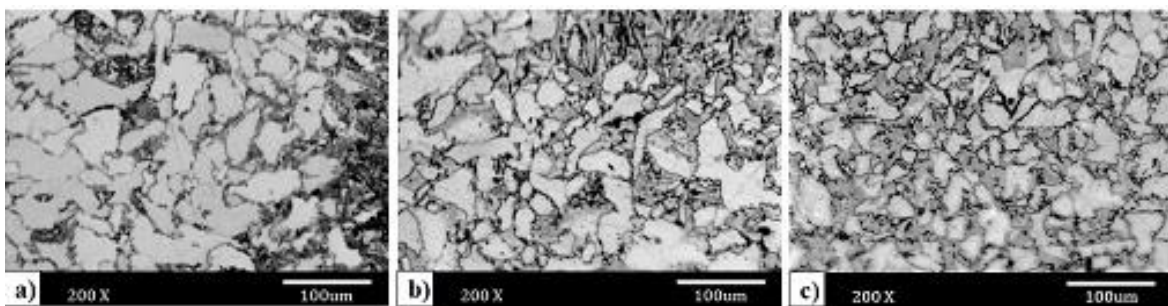


Figura 3. Microestructuras del acero API tratado térmicamente a 790 °C, a) 5, b) 10 y c) 20 minutos.



La Figura 4 muestra los resultados de DRX del acero base y tratado térmicamente, realizando una comparación de los patrones de difracción observados y las posiciones de los picos característicos, correspondientes a las fases resultantes, se observa que el acero base presenta mayor intensidad en los picos que el acero tratado a 790 °C, debido al tratamiento térmico a elevada temperatura que permite la formación de austenita la cual es más susceptible a transformarse en martensita durante el enfriamiento (Solana, Y. et al., 2022).

En general, las posiciones de los picos de difracción para ferrita y martensita, pueden variar dependiendo de la composición específica del acero y las condiciones experimentales. La fase martensita suele encontrarse en ángulos característicos como $2\theta = 44.5^\circ$ pico (110): por otro lado, los picos de difracción para la ferrita suelen estar en posiciones diferentes, $2\theta = 65.0^\circ$ pico (200) y $2\theta = 82.0^\circ$ pico (211). Esto se muestra en la Figura 5, que corresponde a la representación del ajuste obtenido

para el acero API 5CT tratado a 790 °C, por medio del software, de acceso libre, X Pert High Score Plus, el cual compara el patrón de difracción del material estudiado con la base de datos del programa, por lo que resulta un patrón selecto de acero al carbono 044-1292, mostrando en la parte inferior de la gráfica la carta cristalográfica de martensita/ ferrita (selected pattern).

Figura 4. Perfiles de difracción del acero base y tratado térmicamente a 790 °C.

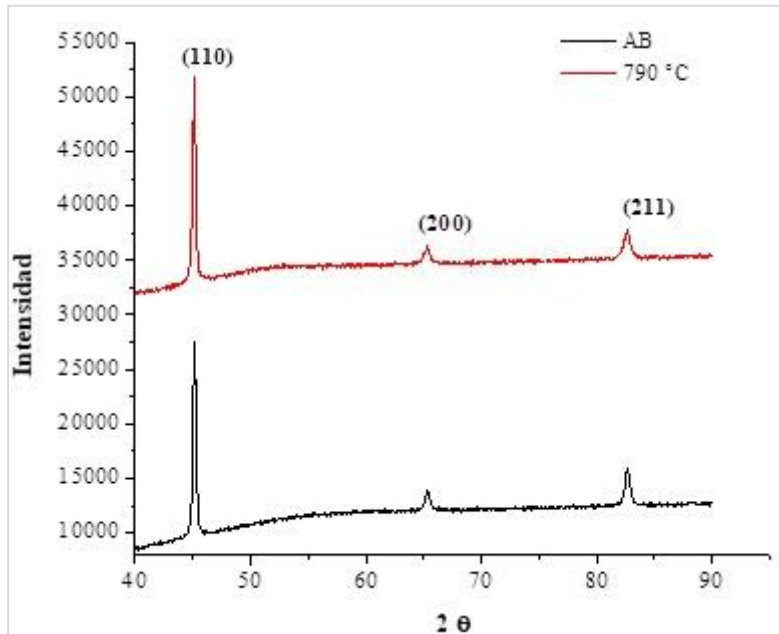
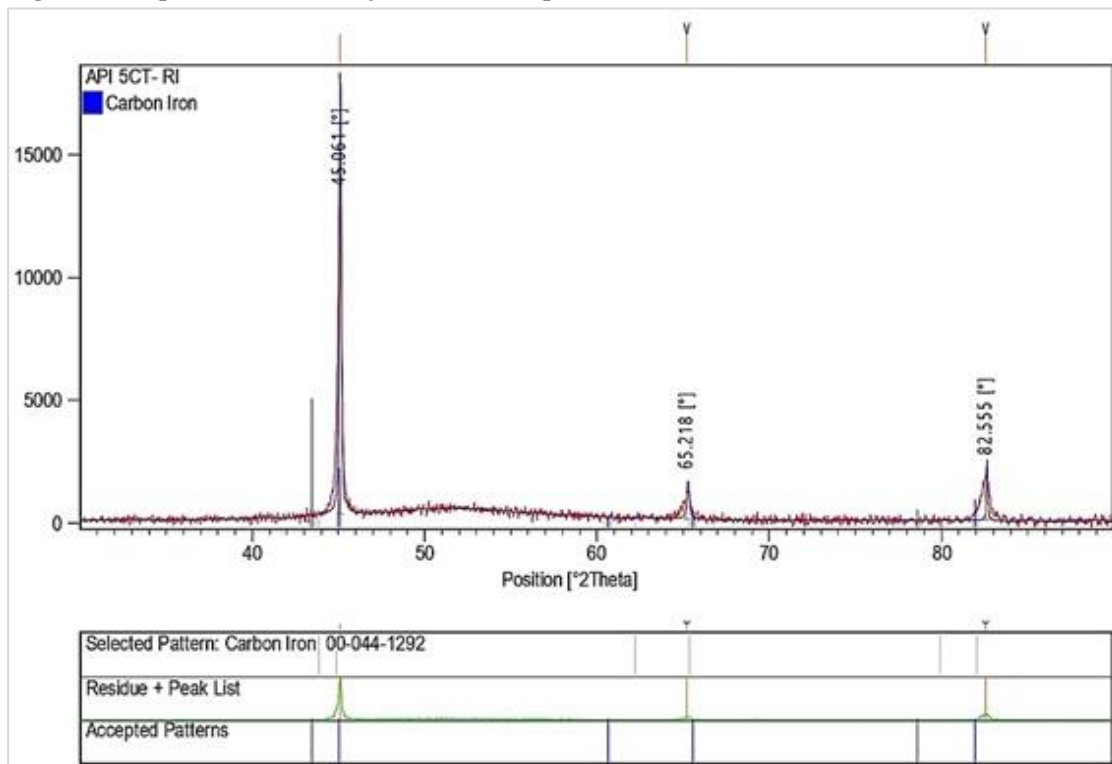


Figura 5. Representación del ajuste obtenido para el acero API 5CT tratado a 790 °C.



Fuente: Elaborado con Software de acceso libre X'Pert HighScore Plus.

Efecto de la temperatura y del tiempo en la dureza y en la fase formada: Análisis estadístico.

Con ayuda del software ImageJ, se realizó un análisis comparativo de cuantificación de las fases de ferrita y otras fases presentes (martensita con cantidades mínimas de perlita, bainita o austenita retenida), de las muestras tratadas a diferentes temperaturas y tiempos, enfriadas en agua, los resultados se muestran en la Tabla II. En general, se observa un incremento proporcional de las fases resultantes con la temperatura y el tiempo de permanencia del tratamiento que seguido de un enfriamiento rápido en agua, permite alcanzar hasta un 50% de fases restantes (martensita con cantidades mínimas de perlita, bainita o austenita retenida), las cuales proporcionan dureza al acero, debido a la presencia de estructuras cristalinas distorsionadas y que a su vez, obstruyen el movimiento de dislocaciones, lo que aumenta la resistencia del material y su capacidad para resistir la deformación plástica (Schincariol, V. (2022)).

Sánchez, B. 2018, determinó la fracción de volumen de martensita mediante cuantificación de fases con ayuda del software Image Pro Plus del acero doble fase obtenido por tratamiento térmico entre las temperaturas de 789 a 860°C, y obtuvo una fracción de volumen de martensita-bainita de 54.20 %, con un intervalo de confianza de 50.79 %. Lo que resulta en porcentajes similares dentro del rango de temperaturas intercríticas (709- 810 °C) mostradas en el diagrama CCT de la Figura 1.

Tabla II. Resultados del porcentaje de fases obtenidas.

Prueba	T (°C)	t(min)	Medio de enfriamiento	Martensita con cantidades mínimas de perlita, bainita o austenita retenida (%)	Ferrita (%)
1	730	5	Agua	37.04	62.96
2	730	10	Agua	37.75	62.25
3	730	20	Agua	41.33	58.67
4	790	5	Agua	33.71	66.29
5	790	10	Agua	45.87	54.13
6	790	20	Agua	50.61	49.39

La Figura 6, 7 y 8 muestran las gráficas de efectos principales de dureza y microdureza del acero tratado, se observa que el acero API 5CT sometido a un tratamiento térmico de recocido intercrítico a 790 °C durante 20 minutos y enfriado en agua, permite la obtención de aceros con microestructura ferrita-martensita, con valores de dureza de 36.5 Rockwell B y microdureza de 305.27 Vickers en la fase martensita, la cual se encuentra presente hasta en un 50.61 con cantidades mínimas de bainita, perlita y

austenita retenida, lo que proporciona mayor dureza al material. En comparación, el acero tratado a 730 °C, durante 20 minutos y enfriado en agua, obtuvo 14.33 % de martensita, una dureza de 17.7 Rockwell B y microdureza de la fase martensita de 233.73 Vickers, por lo que, se obtiene mayor dureza al realizar el tratamiento a mayor tiempo de permanencia. Cualquiera que sea la carga y el volumen de fracción de martensita, la dureza de la martensita es mayor que la de la ferrita, sin embargo, la dureza de la martensita depende del contenido de carbono (Krauss, G. 1999). El incremento en el tiempo de exposición favorece la formación de granos de mayor tamaño, lo cual se refleja en la tendencia de la gráfica, así como también en microestructuras de doble fase, por lo que la dureza de la fase martensita está influenciada por la ferrita circundante, lo que lleva a una disminución de la medición (Vasquez, A. 2018).

Figura 6. Gráfica de efectos principales de dureza HRB.

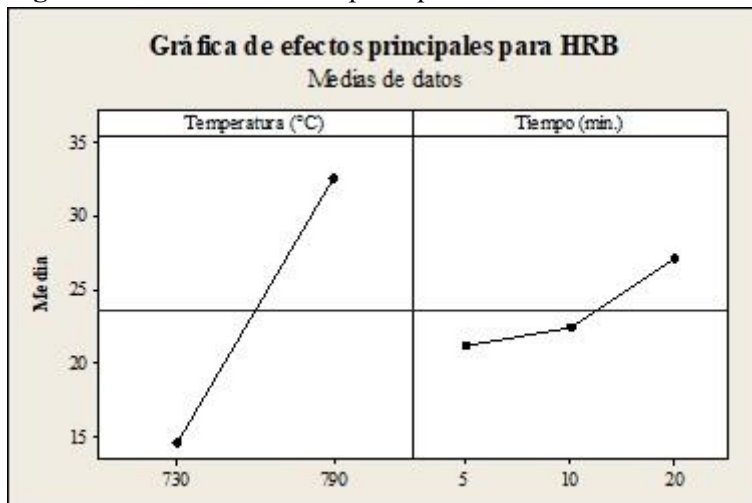


Figura 7. Gráfica de efectos principales HRV- Fases resultantes

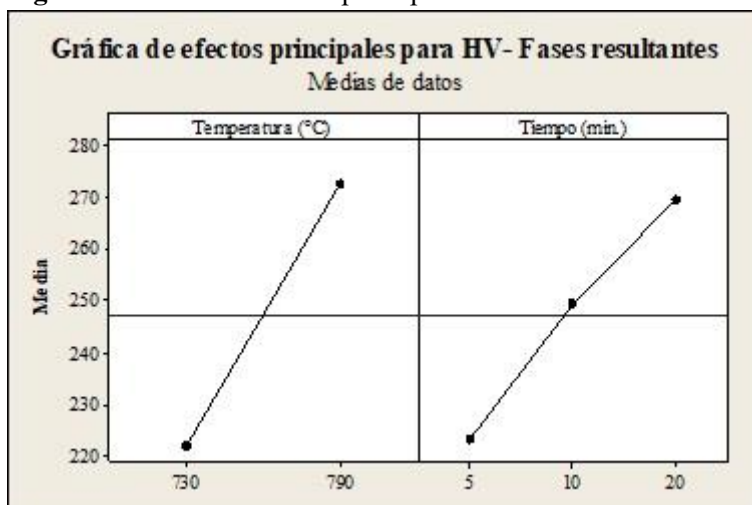
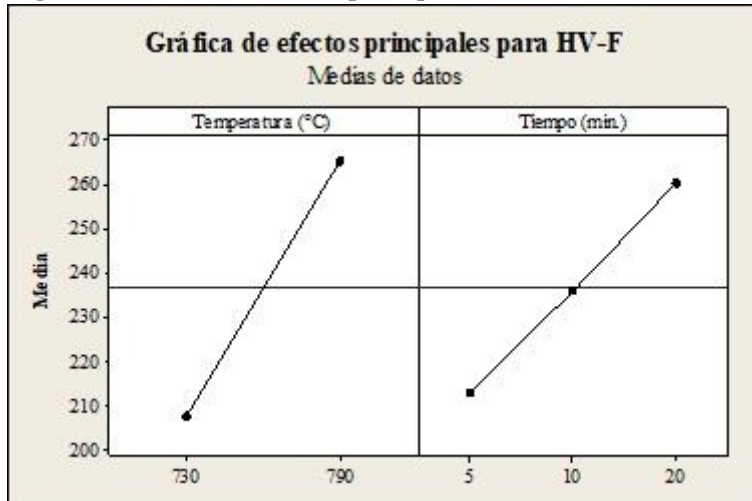


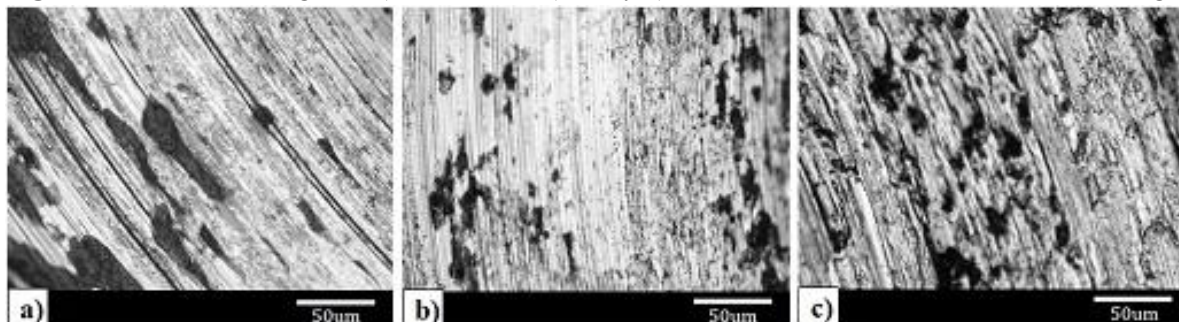
Figura 8. Grafica de efectos principales HRV- Ferrita.



Efecto del tratamiento térmico en la resistencia al desgaste

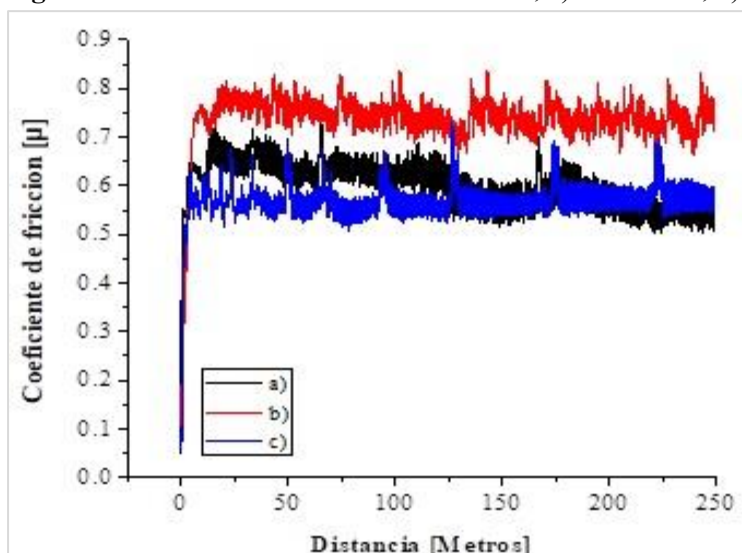
La Figura 7 muestra las imágenes de las huellas de desgaste del acero base y tratado térmicamente a 730 y 790 °C a 5, 10 y 20 minutos, empleando una carga de 10 N, en condiciones de desgaste en seco. Se observa en estas micrografías, que ocurre una pérdida de la estructura superficial al estar la superficie del acero API en contacto mecánico constante con la esfera de alúmina que fue el material de contraparte. Se puede apreciar una superficie rayada, con formación de surcos debidos a la abrasión, no lográndose observar grietas alrededor de la superficie, lo que indica que no se sobrepasa el límite elástico del material durante el deslizamiento sobre el acero doble fase. Dicho comportamiento es una combinación compleja en donde cada fase participa de manera individual de acuerdo con sus propiedades microscópicas. Al parecer, no se observan grietas continuas alrededor de la superficie, sin embargo, claramente se observa que la pérdida de material sigue el mecanismo de delaminación, lo que conlleva a obtener partículas de desecho en forma de escamas, lo que implica la nucleación de grietas y su propagación a la superficie (Tsukatani, I. et al., 1991).

Figura 9. Huellas de desgaste, a) acero base, b) 730 y c) 790 °C durante 20 minutos enfriado en agua.



El análisis del estado de la superficie de las muestras de acero con y sin tratamiento térmico a 730 y 790 °C durante 20 minutos se llevó a cabo mediante la evaluación del coeficiente de fricción, la Figura 10 muestra la gráfica correspondiente, donde se observa el periodo inicial constante, asegurando su comportamiento a lo largo de la evaluación con valores máximos de 0.80 (μ) después de haber estabilizado y homogenizando la superficie. El valor de 0.70 se mantiene hasta por distancias de deslizamiento de 250 m. Las variaciones abruptas que se presentan (0.6-0.7) son un indicativo de pérdida de material por fractura frágil antes de alcanzar los 250 m. Este efecto es más representativo en los gráficos correspondientes a la carga de 10 N aplicada tanto en las muestras del acero base (menor dureza) como en las probetas de las muestras tratadas térmicamente (mayor dureza).

Figura 10. Gráfica de coeficiente de fricción, a) acero base, b) 730 y c) 790 °C.



La Figura 11 muestra el volumen de la masa pérdida en la superficie del acero base y la probeta de acero tratada térmicamente con mayor dureza, demostrando que se obtiene menor pérdida de masa cuando se aplica el tratamiento térmico a temperatura más cercana a la línea A_3 en comparación con los valores de referencia que corresponden al acero base en condiciones iniciales o a temperatura cercana a la línea A_1 , lo cual coincide con los valores reportados en la gráfica del COF, Figura 10. Este comportamiento obedece a la tendencia propuesta por Archard, en donde menciona que, a mayor dureza, existe menor pérdida de material y, por lo tanto, menor coeficiente de desgaste. En este caso, la disminución de pérdida de masa se atribuyó a la distribución intergranular de precipitados en toda la microestructura (Romero, J., & Cabello, S. 2020).

Figura 11. Volumen de Desgaste.

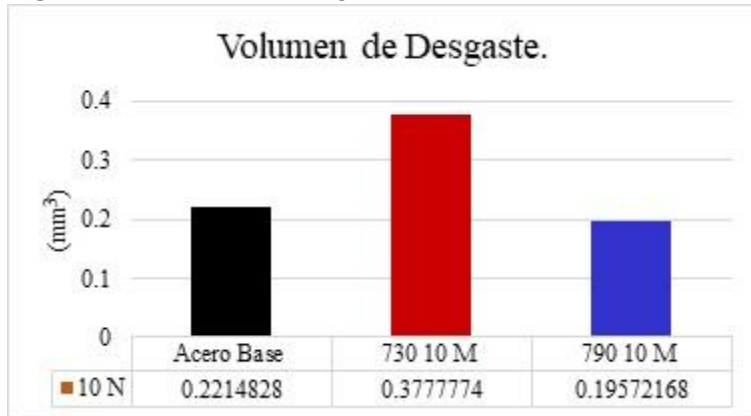
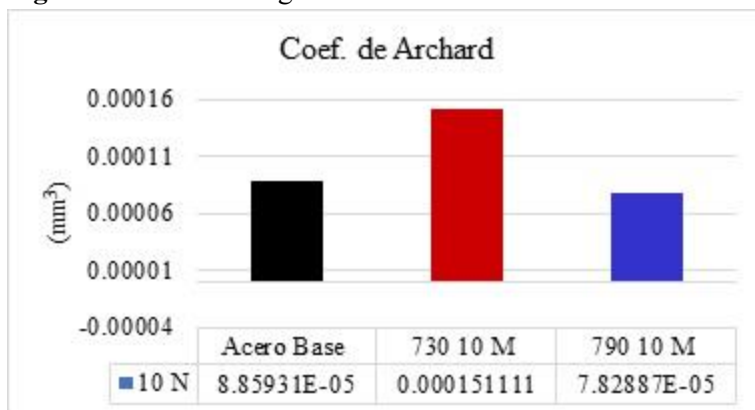


Figura 12. Tasa de desgaste.



CONCLUSIONES

Se correlacionaron las propiedades mecánicas (dureza HRB y HV) con el tiempo de retención en temperatura de tratamiento de recocido intercrítico y la fracción de martensita. Se confirmó que la dureza depende de la fracción de martensita y del tiempo de tratamiento térmico. La dureza aumenta proporcionalmente con la temperatura y también con el tiempo de mantenimiento. Por ejemplo, las probetas enfriadas en agua a temperatura ambiente alcanzan una dureza de 36.5 Rockwell B, debido a un enfriamiento rápido que induce la formación de martensita al 50.61%, con una microdureza de 305.27 Vickers. La dureza es crucial para controlar la fricción y la resistencia al desgaste. Según las pruebas de desgaste en seco Pin on Disk, el material tratado a 790 °C durante 20 minutos y enfriado en agua muestra una reducción de 0.14 mm³ en volumen de desgaste y una tasa de desgaste de 0.00158 mg/m, en comparación con el material base tratado a 730 °C. Esto se atribuye a las fases presentes en

el acero API 5CT modificado, apoyando la teoría de Archard sobre desgaste, que indica que, a mayor dureza, menor tasa de desgaste.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abedini, O., Behroozi, M., Marashi, P., Ranjbarnodeh, E., & Pouranvari, M. (2019). Intercritical heat treatment temperature dependence of mechanical properties and corrosion resistance of dual phase steel. *Materials Research*, 22(1), 1–10. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0969>
- Alvarez, E. (2023). *Diseño y construcción de un horno eléctrico de tratamientos térmicos para la carrera de mecánica industrial*. Tesis de Licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Cuenca, S., Cevallos, N., & Bravo, E. (2024). Desarrollo de procedimiento de fabricación de roscas según API 5B – API 5CT. *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando*, 5(1), 240–253. <https://doi.org/10.60100/rcmg.v5i1.191>
- Ennis, B., Bos, C., Aarnts, M., Lee, P., & Jimenez, E. (2018). Work hardening behaviour in banded dual phase steel structures with improved formability. *Materials Science and Engineering A*, 713, 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.078>
- Guzmán, D., Guzmán, A., González, D., & Sepúlveda, R. (2022). Análisis del desgaste de dos aceros comerciales de la serie 400HB sometidos a un régimen impacto-abrasivo. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 30(3), 528–537. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052022000300528>
- Krauss, G. (1999). Martensite in steel: strength and structure. *Materials Science and Engineering: A*, 273–275, 40–57. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00288-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00288-9)
- Monkova, K., Zetkova, I., Kučerová, L., Zetek, M., Monka, P., & Daňa, M. (2019). Study of 3D printing direction and effects of heat treatment on mechanical properties of MS1 maraging steel. *Archive of Applied Mechanics*, 89(5), 791–804. <https://doi.org/10.1007/s00419-018-1389-3>
- Pinzon, J. (2023). Revisión comparativa de las microestructuras de aceros que han sido sometidos a diferentes tratamientos térmicos. *Ingenio Magno*, 14(1), 78-90. <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2808/2246>
- Queirós, G. (2020). *Tratamiento Térmico de Recocido Intercrítico de Aceros Resistentes al Desgaste con Boro de Bajo Impacto Medioambiental*. Tesis de doctorado. Universidad Complutense de



Madrid, Madrid, España.

Quispe, D., Coque, A., & Morales, Y., Trujillo, D. (2020). Maquina de ensayo abrasivo Pin on Disk por la norma ASTM G 99. *Dateh*. Revista Multidisciplinaria. 2(2).

<https://dateh.es/index.php/main/article/view/44/605>

Romero, J., & Cabello, S. (2020). Comportamiento ante el desgaste por deslizamiento en seco del acero inoxidable súper dúplex en un tribómetro bola sobre anillo. *Rev. Colomb. Biotecnol.* Vol. XXII No. 1, 6 -17. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.60835>

Sánchez, B. (2018). Afectación térmica de la microestructura de los aceros de doble fase soldados con láser. Tesis de maestría. COMIMSA. Saltillo, Coahuila, México.

<http://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1022/411>

Schincariol, V. (2022). Comparação entre a microestrutura bainítica e martensítica em termos de resistência ao impacto charpy em mesmo nível de dureza para o aço aisi 1070. Tesis de Maestría. Universidade Presbiteriana Mackenzie, Sao Paulo, Brasil.

Shaanxi World Iron & Steel Co., L. (2018). Una breve introducción de API 5L, API 5B, API 5CT y API 5D. En *World Iron & Steel*. <http://es.worldironsteel.com/news/a-brief-introduction-of-api-5l-api-5b-api-5c-13080365.html>

Solana, Y., Pacheco, J., Hernández, J., Cruz, J., & Garnica, P. (2022). *Análisis de los cambios microestructurales por difracción de rayos x de un acero medio Mn*. XXVIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM VI Congreso Internacional de Energía y Desarrollo Sostenible VII Simposio Internacional de Ingeniería Industrial, 123–131.

Srinivas, R., Lipinska, M., & Mayer, J., Gault, B., Ponge, D. (2022). Mechanisms of austenite growth during intercritical annealing in medium manganese steels. *Scripta Materialia*, 206(114228). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114228>

Tsukatani, I., Hashimoto, S., & Inoue, T. (1991). Effects of Silicon and Manganese Addition on Mechanical Properties of High-strength Hot-rolled Sheet Steel Containing Retained Austenite. *ISIJ International*, 31(9), 992–1000. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.31.992>

Vasquez, A. (2018). *Influencia del tiempo de permanencia en el tamaño de grano de la martensita en un acero tratado a temperaturas intercríticas*. Tesis de Tecnóloga. Universidad Distrital Francisco



José de Caldas, Bogota, Colombia. <http://hdl.handle.net/11349/14260>

Xiao, X., Shi, G., Zhang, S., & Wang, Q. (2018). Effect of cooling path on microstructure features and tensile properties in a low carbon Mo-V-Ti-N steel. *Metals*, 8(9).

<https://doi.org/10.3390/met8090677>

