DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 12, Numero Especial 5 (2024) 27-32

Desempeño tribológico del acero AISI 52100 tratado térmicamente en pruebas de deslizamiento reciprocante bajo condiciones secas
Tribological performance of heat-treated AISI 52100 steels in reciprocating sliding test under dry conditions

B. A. Mateos-Luqueño[1]*, A. I. Martínez-Pérez[1], E. E. Vera-Cárdenas[1], J. L. Bernal-Ponce[2], M. Hernández-Chávez[3]

[1]*DEPI, Tecnológico Nacional de México/ITPachuca, C.P. 42080, Pachuca de Soto, Hgo., México*
[2]*Departamento de Ingeniería Mecánica, Tecnológico Nacional de México/ITVeracruz, C.P. 94320, Orizaba, Ver., México*
[3]*UPIIH, Instituto Politécnico Nacional/Campus Hidalgo. DESCTI, C.P. 41262, San Agustín Tlaxiaca, Hgo., México*

Resumen

La falta de información sobre el comportamiento tribológico del acero AISI 52100 bajo pruebas de deslizamiento reciprocante, es la principal necesidad por la cual surgió el presente estudio. Se describen investigaciones sobre el acero AISI 52100, destacando su alto contenido de carbono y cromo, lo que le confiere propiedades mecánicas y tribológicas deseables. Se ha utilizado ampliamente en la industria debido a su resistencia y capacidad de respuesta a tratamientos térmicos y químicos. En este trabajo se reporta el comportamiento tribológico de este acero a partir de pruebas de deslizamiento reciprocante en condiciones secas. Los resultados muestran que el acero AISI 52100 presenta una rugosidad promedio de 0.026 µm, una dureza promedio de 59.9 HRC y su composición química, los cuales son parámetros cercanos a los reportados en trabajos previos. Se observó una profundidad de desgaste de 17.01 µm en las muestras revenidas y una tasa de desgaste de 7.1E-6 mm^3/Nm en el tratamiento de austenizado, que es un valor mayor en comparación con las muestras austenizadas. Con base a esto el acero AISI 52100 presenta un mejor desempeño con el tratamiento de austenizado, con un coeficiente de fricción estable y un menor desgaste.

Palabras Clave: Comportamiento tribológico, Propiedades, Desgaste, Fricción.

Abstract

The lack of information regarding the tribological behavior of AISI 52100 steel under reciprocating sliding tests is the main need that prompted the present study. Research on AISI 52100 steel is described, highlighting its high carbon and chromium content, which impart desirable mechanical and tribological properties. It has been widely used in industry due to its strength and responsiveness to heat and chemical treatments. This study reports on the tribological behavior of AISI 52100 steel based on reciprocating sliding tests under dry conditions. The results show that AISI 52100 steel has an average roughness of 0.026 µm, an average hardness of 59.9 HRC, and its chemical composition, which are parameters close to those reported in previous works. A wear depth of 17.01 µm was observed in the tempered samples and a wear rate of 7.1E-6 mm^3/Nm in the austenitizing treatment, which is a higher value compared to the austenitized samples. Based on this, AISI 52100 steel shows better performance with the austenitizing treatment, with a stable friction coefficient and lower wear.

Keywords: Tribological behavior, Properties, Wear, Friction.

1. Introducción

En la actualidad, se han llevado a cabo investigaciones en materiales metálicos a fin de mejorar su rendimiento bajo diversas condiciones de trabajo u operación, asimismo, estos se destacan por tener buenas propiedades mecánicas y tribológicas (Dumitrescu *et al*., 2010). El acero AISI 52100, conocido por su alto contenido en carbono que le proporciona buenas propiedades químicas y una alta resistencia mecánica, adicionalmente tiene un alto contenido de cromo (1.30 – 1.60 %), el cual estimula la formación de carburos, estos componentes aportan un aumento en la dureza, resistencia al desgaste, disminuye la ductilidad y mejora su rendimiento mecánico a altas temperaturas (Fan *et al*., 2018). Este acero se ha posicionado como uno de los más usados en la industria de los rodamientos, debido a sus propiedades mecánicas, rápida

*Autor para la correspondencia: m23201302@pachuca.tecnm.mx
Correo electrónico: m23201302@pachuca.tecnm.mx (Brenda A. Mateos-Luqueño), armando.mp@pachuca.tecnm.mx (Armando I. Martínez-Pérez), edgar.vc@pachuca.tecnm.mx (Edgar E. Vera-Cárdenas), jose.bp@orizaba.tecnm.mx (José L. Bernal-Ponce), mhernandezch@ipn.mx (Macaria Hernández-Chávez)

Historial del manuscrito: recibido el 19/09/2024, última versión-revisada recibida el 31/10/2024, aceptado el 05/11/2024, publicado el 12/12/2024. **DOI**: https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial5.13754

respuesta a los tratamientos térmicos, flexibilidad para aplicar tratamientos termoquímicos y/o recubrimientos, (Smith, 2007), (Guo and Liu, 2001). Por lo que, se han reportado trabajos sobre el comportamiento tribológico en condiciones secas y lubricadas de este material, tal es el caso de recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) depositados sobre el acero AISI 52100; en el cual los resultados demuestran una mejor resistencia al desgaste (Ajayi *et al*., 1992). También se han presentado estudios que evalúan el comportamiento del boro sobre este acero; reportando que disminuye la corrosión y el coeficiente de desgaste, y al mismo tiempo aumenta la dureza del material (Millard *et al*., 1992), (Güneş *et al*., 2012), (Colak *et al*., 2013). Por otro lado, hay trabajos que muestran que la adhesión de grafito y disulfuro de molibdeno (MoS_2) en capas permiten reducir el coeficiente de fricción y mejorar la lubricación de la superficie (Chen *et al*., 2019).

Existe muy poca información en la literatura disponible sobre el acero AISI 52100 rolado en caliente que reportan el comportamiento tribológico caracterizado a través de deslizamiento reciprocante, el cual, es un movimiento lineal de tipo vaivén. En este trabajo se presenta la aplicación de un tratamiento térmico de austenizado y revenido, así como su desempeño tribológico a partir de los resultados obtenidos de los ensayos de deslizamiento reciprocante, debido a que es 10 veces mayor comparado con el movimiento por rodadura, tiene una mayor precisión y el tiempo del ciclo de desgaste es menor (Castillo-Herrera and Toapanta-Cunalata, 2019).

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Se utilizaron muestras circulares del acero AISI 52100, con un diámetro de 25.4 mm y un espesor de 5 mm. Las muestras fueron rectificadas y desbastadas hasta un grano de lija 2000, posteriormente se pulieron con alúmina de 0.3 μm hasta obtener un acabado espejo. Para realizar las pruebas tribológicas, se utilizó un pin o contraparte esférica de alúmina (Al_2O_3) por su alta resistencia a la oxidación y al desgaste, con un diámetro de 6 mm y con una dureza de HRC 70 (Hua *et al*., 2008), (Dessarzin *et al*., 2015), (Cavaleiro and Polcar, 2011), (Cabibbo *et al*., 2019).

2.2. Tratamiento térmico

dureza y resistencia al desgaste, pero estás propiedades pueden ser afectadas dependiendo el método de conformación del material. El acero AISI 52100 rolado en caliente presenta baja dureza (HRC 11), por ello, diversas alternativas pueden ser aplicadas para modificar su microestructura e incrementar su dureza, y por lo tanto reducir su desgaste.

En el presente estudio se propone la aplicación de un tratamiento térmico de austenizado al acero AISI 52100 rolado en caliente, el cual es considerado un método sencillo que permite mejorar la dureza a través de la formación de bainita o martensita. Basado en el diagrama hierro-carbono, fueron establecidas las condiciones del tratamiento térmico. Todas las muestras fueron tratadas a 950°C durante 1 hora, posteriormente se enfriaron con agua para precipitar y lograr nódulos irregulares (Senol *et al*., 2017). A la mitad del total del número de muestras se les aplicó un tratamiento posterior de revenido a 200°C durante 30 minutos, con la finalidad de eliminar las irregulares producidas y unificar la microestructura obtenida. Este tratamiento se aplicó en muestras pequeñas (25.4 mm de diámetro) para evaluar las propiedades tribológicas, la microestructura de interés y evitar los efectos de tensiones residuales como distorsiones y grietas que ocurren en áreas más grandes.

2.3. Dureza y rugosidad

Para la determinación de la dureza de los aceros AISI 52100 tratadas térmicamente, se utilizó un durómetro Rockwell Phase II HR-150a, se realizaron 20 mediciones en diferentes zonas.

La rugosidad superficial promedio (Ra), para los materiales iniciales que presentaron acabado espejo y para los tratados térmicamente se determinó utilizando un rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-410, a una velocidad de 0.5 mm/s y un desplazamiento de 4.8 mm, se realizaron 10 mediciones en diferentes direcciones.

2.4. Prueba tribológica

Las pruebas tribológicas en condiciones secas se realizaron en una máquina deslizante lineal alternativa casera basada en la norma ASTM G133-22 (ASTM, 2022). Se llevaron a cabo con un pin de alúmina para deslizarse contra la superficie de las muestras del acero AISI 52100 tratadas térmicamente. Se realizaron 3 repeticiones por cada muestra. Las condiciones de las pruebas tribológicas se muestran en la Tabla 1. Para las pruebas, la carga normal se aplica directamente en el pin como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 1.

Tabla 1. Condiciones del análisis tribológico.

Presión Hertziana (MPa)	Carga (N)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (mm)	Ciclos	Tiempo (seg)
1752	11.7	4	6	7200	1800

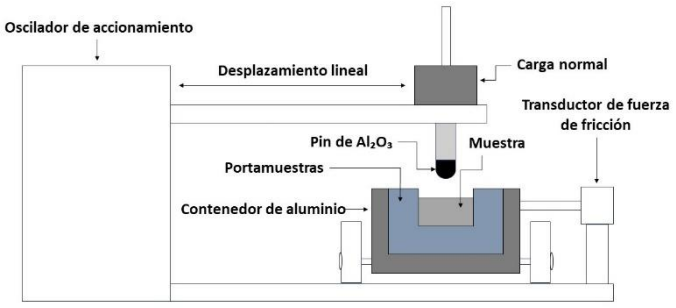

Figura 1. Diagrama esquemático de la máquina de movimiento reciprocante.

2.5. Composición química

A partir de la técnica de espectroscopía de emisión atómica de chispa se determinó la composición del acero AISI 52100.

2.6. Caracterización de la huella de desgaste

Se realizó el análisis del perfil de la huella de desgaste a través del rugosímetro/perfilometro de la marca Mitutoyo modelo SJ-410 realizando 10 mediciones en diferentes regiones. Se analizó la huella por un estereoscopio y un microscopio óptico, para determinar la longitud total de la huella y los mecanismos de desgaste.

Resultados

2.7. Rugosidad y dureza

El valor de la rugosidad (Ra) se obtuvo dentro del intervalo considerado para el acabado espejo propuesto bajo la norma ISO 1302 (ISO, 2002); éste realiza los ensayos sobre la superficie de la aleación evaluada en un proceso controlado. La magnitud de la dureza 11 HRC es cercana a la reportada dentro de las especificaciones del proveedor, que corresponde a un AISI 52100 rolado en caliente. Los valores promedio de rugosidad y dureza de los aceros AISI 52100 tratados térmicamente con su respectiva desviación estándar (DE) se presentan en la Tabla 2 y la Figura 2a y b. Se puede observar que la dureza mayor se presenta en las muestras austenizadas, debido a que, el endurecimiento producido a través del tratamiento térmico permite la formación de austenita y martensita, la cual se caracteriza por ser dura pero frágil. Mientras que la dureza en las muestras revenidas es menor por una unidad, este decremento mínimo se debe a la formación de bainita y la disminución de perlita, como se podrá validar en el estudio de la microestructura, debido a que el proceso de revenido busca disminuir la dureza y aumentar de manera gradual la ductilidad del material (Bhosle and Motagi, 2012), (Akinlabi and Sanusi, 2018). Ahora bien, es posible analizar que en ambas muestras mantienen una rugosidad similar, sin embargo, las muestras revenidas presentan mayor rugosidad superficial, por décimas, esto provocado por los cambios en la microestructura, pues la rugosidad superficial de un material está influenciada por diversos factores como el tamaño de grano, el tipo de microestructura y la distribución de las fases (Thelning, 1984). Como ya se mencionó, las estructuras presentadas en ambas muestras dan lugar a un acomodo distinto de fases que generan cambios en las propiedades del material.

Tabla 2. Resultados de rugosidad y dureza del acero AISI 52100.

Material	Rugosidad, Ra (μm)	DE (μm)	Dureza HRC	DE
AISI 52100 austenizado	0.0238	0.0086	60.8	1.78
AISI 52100 revenido	0.0292	0.0173	59.1	1.08

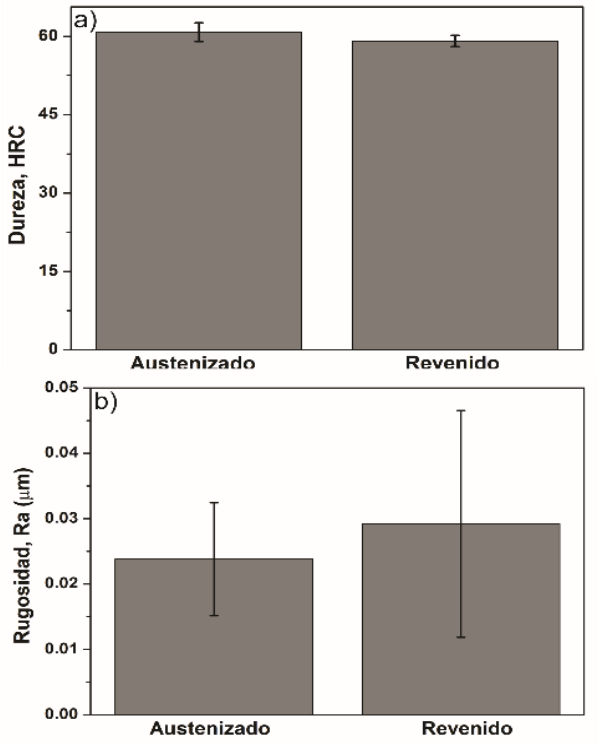

Figura 2. a) Dureza y b) rugosidad del acero tratado térmicamente.

2.8. Composición química

Los elementos presentes en las muestras fueron obtenidos a través de la espectroscopía de chispa y se reportan dentro de la Tabla 3, los cuales coinciden con trabajos ya reportados sobre este material (Machado, 2006).

Tabla 3. Composición química en porcentaje de masa.

C	Si	Mn	P	Cr	S	Mo	Ni	Fe
0.972	0.259	0.30	0.01	1.47	<0.002	<0.007	0.02	Balance

2.9. Microestructura

La Figura 3 muestra la micrografía del acero AISI 52100 antes y después de los tratamientos térmicos, la cual se realizó a un aumento de 100X, se observaron en la Figura 3a las formaciones de hierro α (Fe- α) y carburos esferoidizados de cromo, microestructura característica del acero AISI 52100, así como la formación de bainita, martensita y austenita retenida a partir de los tratamientos térmicos como se muestra en la Figura 3b y c (Schultz, 1981), (Barber *et al*., 2019), (Furuhara *et al*., 2008), (Fang and Yang, 2005), (Akinlabi and Sanusi, 2018). Se observa que en el AISI 52100 con revenido hay un incremento en la bainita y se obtuvo una microestructura con mayor definición de bordes de grano.

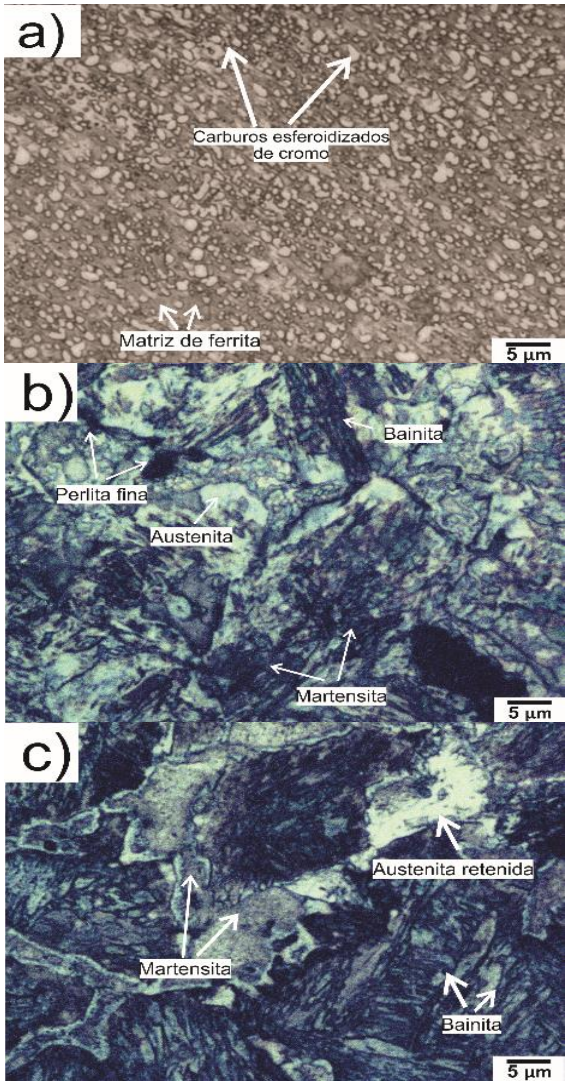

Figura 3. Micrografía a 100X de: a) AISI 52100, b) austenizado, c) revenido.

2.10. Caracterización tribológica

Se reportaron los resultados de los materiales de estudio, el pin no fue considerado para el análisis debido a que no presentó daños al final de las pruebas. Durante las pruebas realizadas se registró el coeficiente de fricción. En la Figura 4, se observaron fluctuaciones en el coeficiente de fricción en los ensayos para ambos casos; debido al incremento de dureza obtenido mediante el tratamiento térmico, así como también por los cambios en los mecanismos de desgaste.

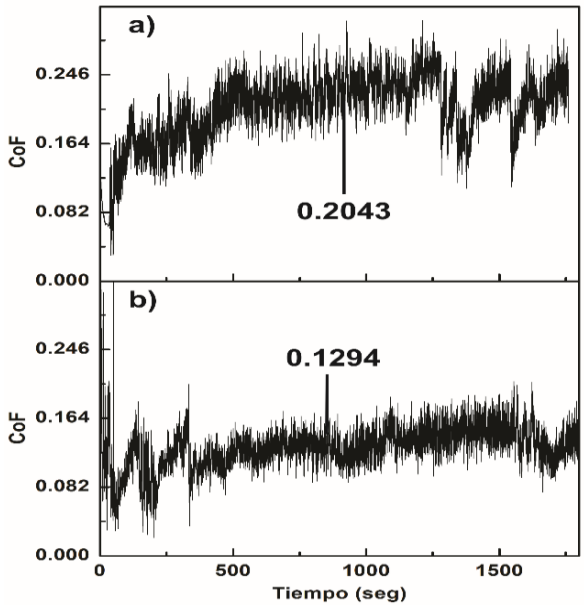

Figura 4. Coeficiente de fricción: a) acero revenido, b) acero austenizado.

De la misma manera, los resultados de las pruebas de muestras revenidas (figura 4a) mostraron un comportamiento con mayores fluctuaciones a lo largo de la distancia de deslizamiento por la evolución de los mecanismos de desgaste; atribuido al incremento en la dureza superficial del material y la disminución de nódulos irregulares o impurezas dentro de la microestructura y superficie del material, generando cambios abruptos en el coeficiente de fricción. Mientras que, los resultados de las pruebas con muestras austenizadas (figura 4b) mostraron un comportamiento consistente con menores fluctuaciones que en el otro caso, se consideró la formación de una capa autolubricante proporcionada por la presencia de molibdeno en la composición química de este acero y la tribocapa que se genera a través de la transferencia de material, puede incluir óxidos y sulfuros. Esta tiene varias funciones importantes en el desempeño del acero, ya que, actúa como una barrera que reduce la fricción y mejora la lubricación entre la superficie del material y el pasador, lo que permitió reducir su desgaste (Winer, 1967), (Brizmer *et al*., 2017), (Badisch *et al*., 2013).

Con base en las condiciones de prueba y la rugosidad superficial, se consideró la formación de ciertos mecanismos de desgaste entre las huellas obtenidas, como es el caso de partículas adheridas.

En la Figura 5a, se observó la profundidad de la huella provocada por el ensayo en muestras revenidas, la cual presenta mayor desgaste, pero la huella obtenida es menos profunda debido a que es más larga y ancha, de la misma manera, la microestructura obtenida en estas muestras demostró que la presencia de bainita ofrece al material una combinación equilibrada entre resistencia y ductilidad, generando así deformaciones plásticas en la huella.

En el caso de las pruebas de las muestras austenizadas, se observa en la Figura 5b, que se presentó mayor profundidad en la huella, pero menor desgaste por la interacción entre la muestra (de mayor dureza) y el pasador. Cabe resaltar que

dentro de estas muestras se tiene una microestructura con mayor presencia de martensita, la cual aporta dureza y fragilidad al material.

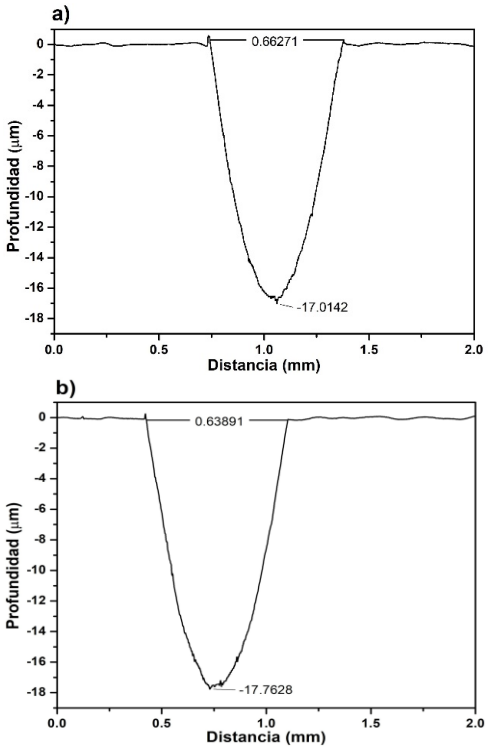

Figura 5. Profundidad de huella: a) acero revenido, b) acero austenizado.

El largo, ancho y profundidad de estas cicatrices fueron medidos a través de un perfilómetro.

A partir de la información anterior se obtuvo el volumen de desgaste. Se hizo uso de la ecuación (1) para calcular la tasa de desgaste específica:

$$Tasa\ de\ desgaste\ específica = \frac{V}{Fn * S} \quad (1)$$

Donde (V) es el volumen perdido, (Fn) es la carga normal y (S) es la distancia de deslizamiento (Dwyer-Joyce *et al*., 2006). En la Figura 6 se presenta el promedio de la tasa de desgaste específico a partir de las huellas obtenidas de las pruebas realizadas en condiciones secas.

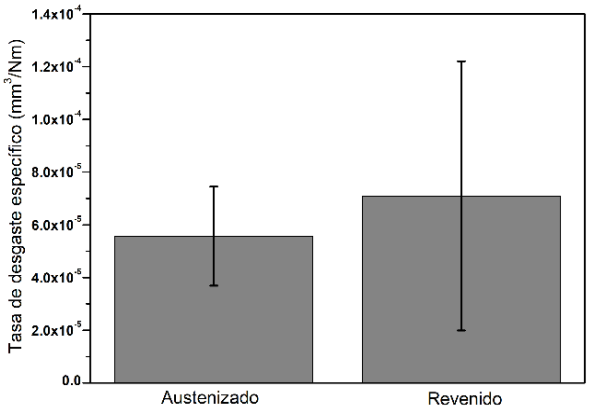

Figura 6. Tasas de desgaste específico.

La Figura 7 muestra la huella de desgaste contra el pasador de muestras austenizadas, tomada en un microscopio metalográfico de la marca Olympus, donde se observó una región bien definida por los mecanismos de desgaste, así como también la formación de una tribocapa que permitió mejorar el rendimiento del material bajo las pruebas tribológicas.

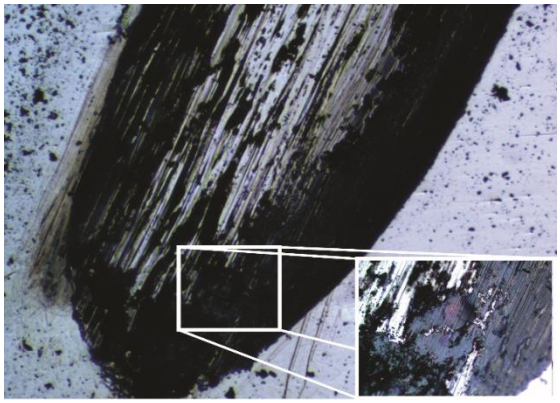

Figura 7. Huella de desgaste en muestra de acero austenizado.

Por otra parte, la Figura 8 muestra la huella producida en muestras revenidas, donde se observan deformaciones plásticas producidas por la presión de contacto y la fricción continua durante la prueba, en cuanto a la oxidación observada, comenzó con la formación de películas delgadas de óxidos que salieron a la superficie con la evolución de la prueba y la presencia de oxígeno en el ambiente.

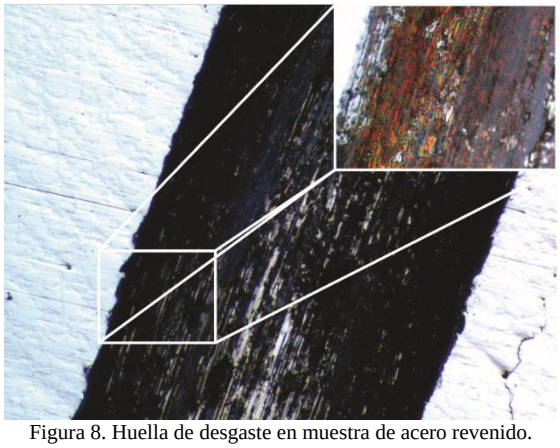

Figura 8. Huella de desgaste en muestra de acero revenido.

3. Conclusiones

Con base en los resultados del estudio tribológico, la aplicación del tratamiento térmico influye significativamente en el comportamiento de los materiales estudiados. Se observaron fluctuaciones en el coeficiente de fricción debido a cambios en la dureza superficial y los mecanismos de desgaste. Las muestras revenidas exhibieron mayores fluctuaciones, atribuidas al incremento en la dureza superficial y la formación de bainita, la cual, aunque aumenta la dureza del material también lo vuelve más dúctil, mientras que las muestras austenizadas mostraron un comportamiento más consistente, posiblemente debido a la formación de una capa autolubricante. Además, se notaron diferencias en la profundidad de desgaste y el ancho de las huellas entre las

muestras revenidas y austenizadas, con la primera mostrando mayor desgaste, pero huellas menos profundas.

Estos hallazgos resaltan la importancia del tratamiento térmico en el rendimiento y la durabilidad de los materiales en aplicaciones de constante contacto.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos de dureza, rugosidad, microestructura y tasa de desgaste, se confirma que las muestras austenizadas tienen un mejor rendimiento tribológico por la reducción en el desgaste, esto debido a la presencia de martensita y perlita fina por la aplicación del tratamiento térmico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por la beca otorgada para la realización de mis estudios de Maestría (CVU 1318838).

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

Ajayi, O. O., Erdemir, A., Fenske, G. R., Graham, M., Nichols, F. A., Rudnik, P. J., Sproul, W. D. (1992). Tribological behavior of oil-lubricated TiN-coated steel. Surface & Coatings Technology, 54-55, 496–501. DOI: 10.1016/s0257-8972(07)80072-7

Akinlabi, E. T., Sanusi, K. O. (2018). Experiment on Effect of heat treatment on mechanical and microstructure properties of AISI steel. Materials Today: Proceedings, 5(9), 17996–18001. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.132

ASTM International. (2022). Standard test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear: ASTM G133-22. Annual Book of ASTM Standards. DOI: 10.1520/g0133-22

Badisch, E., Mayer, H., Varga, M., Rojacz, H., Winkelmann, H. (2013). Wear reducing effects and temperature dependence of tribolayer formation in harsh environment. Tribology International, 65, 190–199. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.03.003

Barber, G. C., Pan, Y., Wang, B. (2019). Study of bainitic transformation kinetics in SAE 52100 steel. Journal of Materials Research and Technology, 8(5), 4569–4576. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.08.001

Brizmer, V., Matta, C., Morales-Espejel, G. E., Nedelcu, I. (2017). The influence of tribolayer formation on tribological performance of rolling/sliding contacts. Tribology Letters, 65(2). DOI: 10.1007/s11249-017-0839-3

Cabibbo, M., Hamouda, A. M. S., Musharavati, F., Popelka, A., Santecchia, E., Spigarelli, S. (2019). Investigation of the Temperature-Related Wear Performance of Hard Nanostructured Coatings Deposited on a S600 High Speed Steel. Metals, 9(3), 1-13. DOI: 10.3390/met9030332

Castillo-Herrera, W. P., Toapanta-Cunalata, O. G. (2019). Principios de tribología aplicados en la ingeniería mecánica. Editorial Científica 3Ciencias.

Cavaleiro, A., Polcar, T. (2011). High-temperature tribological properties of CrAlN, CrAlSiN and AlCrSiN coatings. Surface & Coatings Technology,206(6), 1244-1251. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.08.037

Chen, Y., Ju, D., Li, K., Ran, L., Zang, L., Zheng, Y. (2019). Comparative study on the friction property of bearing steel modified by graphite/MoS2 composite coating and manganese phosphate coating. Materials Science, 25(4), 383–393. DOI: 10.5755/j01.ms.25.4.19454

Colak, F., Gokce, B., Kara, R., Kayali, Y., Mertengenc, E. (2013). Analysis of wear behaviour of borided aisi 52100 steel with the taguchi method. Journal of the Balkan tribological association, 19(3), 365–373. ISSN 1310-4772.

Bhosle, R., Motagi, B. S. (2012). Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of medium carbon steel. International Journal of engineering research and development, 2(1), 7-13. ISSN: 2278-067X

Dessarzin, P., Karvankova, P., Morstein, M, Nohava, J. (2015). Characterization of tribological behavior and wear mechanisms of novel oxynitride PVD coatings designed for applications at high temperatures. Tribology International, 81, 231-239. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.08.016

Dumitrescu, L., Hernández, L., Pérez-Rodriguez, R., Quesada-Estrada, A. (2010). Una herramienta para la Selección Automatizada de aceros en el Contexto de la Ingeniería mecánica. Ingeniería Mecánica, 13(1) 1, 19-30. ISSN 1815-5944.

Dwyer-Joyce R. S., Green, D. A., Lewis R. (2006). The Wear Effects and Mechanisms of Soot Contaminated Automotive Lubricants. Journal of Engineering Tribology, 220(3), pp 159–169. DOI: 10.1243/13506501JET140

Fan, Z., Jiang, W., Zong, X. (2018). A study of the microstructures and performance of chromium boride coatings on AISI 52100 steel. Materials and Technology, 52(2), 225–229. DOI: 10.17222/mit.2017.151

Fang, H.-S., Yang, Z.-G. (2005). An overview on bainite formation in steels. Current Opinion in Solid State & Materials Science, 9(6), 277–286. DOI: 10.1016/j.cossms.2006.06.005

Furuhara, T., Kikumoto, K., Maki, T., Morito, S., Ogawa, T., Saito, H., Sekine, T. (2008). Phase transformation from fine-grained austenite. ISIJ International, 48(8), 1038–1045. DOI: 10.2355/isijinternational.48.1038

Güneş, İ., Kayali, Y., Ulu, S. (2012). Diffusion kinetics of borided AISI 52100 and AISI 440C steels. Vacuum, 86(10), 1428–1434. DOI: 10.1016/j.vacuum.2012.03.030

Guo, Y. B., Liu, C. R. (2001). Mechanical properties of hardened AISI 52100 steel in hard machining processes. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124(1), 1–9. DOI:10.1115/1.1413775

Hua, M., Li, J., Wei, X. (2008). Friction and wear behavior of SUS 304 austenitic stainless steel against Al2O3 ceramic ball under relative high load. Wear, 265(5-6), 799-810. DOI: 10.1016/j.wear.2008.01.017

International Organization for Standardization: ISO. (2002). Geometrical Product Specifications (GPS)- Indication of surface texture in technical product documentation. (ISO 1302:2002) https://www.iso.org/es/contents/data/standard/02/80/28089.html

Machado, I. F. (2006). Technological advances in steels heat treatment. Journal of Materials Processing Technology, 172(2), 169–173. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.007

Millard, N., Marest, G., Moncoffre, N., Tousset, J. (1992). Boron implantation into AISI 52100 steel. Surface & Coatings Technology, 51(1–3), 446–450. DOI: 10.1016/0257-8972(92)90279-j

Schultz, C. W. (1981). Effect of thermonechanical treatment on the microstructure and mechanical properties of AISI 52100 steel [Naval Postgraduate School]. https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA104125.pdf

Senol, V., Türedi, E., Yilmaz, M. (2017). Tribological response of heat treated AISI 52100 steels against steel and ceramic counterparts. Archives of Foundry Engineering, 17(3), 222–228. DOI: 10.1515/afe-2017-0119

Smith, S. (2007). Effect of surface integrity of hard turned AISI 52100 Steel on fatigue performance, Materials Science and Engineering: A, 459(1–2), 337–346. DOI:10.1016/j.msea.2007.01.011

Thelning, K.-E. (1984). Steel and its heat treatment: Bofors handbook (2a ed.). Butterworth-Heinemann.

Winer, W. O. (1967). Molybdenum disulfide as a lubricant: A review of the fundamental knowledge. Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear, 10(6), 422–452. DOI: 10.1016/0043-1648(67)90187-1