

Desgaste de aceros resistentes a la abrasión

Wear of abrasion resistant steels (review)

Jessica Gabriela Chávez Jiménez¹, Ma. de Jesús Soria Aguilar², Lázaro A. Falcón Franco²

1. UA de C, Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales, Blvd. V. Carranza e Ing. José Cárdenas s/n Col. República C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.
2. Facultad de metalurgia UA de C, Carretera 57 Km 5, Los Bosques, C.P. 25710, Monclova, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia:

jessicachavezjimene@uadec.edu.mx

Resumen

El estudio del desgaste en los aceros, un material muy comercial y empleado en diversos sectores como metalúrgicos, minería, construcción, entre muchos más, es indispensable para determinar los factores que inciden en el deterioro durante su uso. En este trabajo se presenta una revisión de diversos estudios sobre aceros resistentes a la abrasión, y su comportamiento ante el desgaste bajo distintas condiciones de uso.

Palabras Clave: desgaste, aceros resistentes a la abrasión, tratamientos térmicos.

Abstract

The study of wear in steels, a very commercial material and used in various sectors such as metallurgy, mining, construction, among many others, is essential to determine the factors involved that affect deterioration during their use. This paper presents a review of various studies on abrasion resistant steels, and their behavior against wear under different use conditions.

Keywords: wear, abrasion resistant steels, heat treatments.

Introducción

El desgaste es el fenómeno en el cual ocurre una pérdida de material, debido al contacto de al menos dos superficies. En las industrias minera, refinamiento, de cemento, existen muchos componentes de maquinarias que están siempre expuestos a la abrasión constante, como los son tolvas, palas mezcladoras, cribas vibratorias, entre otras partes mecánicas. Se reportó en el 2017 que se gastan alrededor de 210,000M€ al año debido a los fenómenos de desgaste de fricción y desgaste en las industrias mineras, además de emisiones de CO₂, que constituyen un 2.7% a nivel global, como causa del desgaste y fricción (Holmberg y col., 2017).

Existen distintos tipos de aceros resistentes al desgaste, tales como aceros con alto contenido de manganeso, aceros resistentes al desgaste de baja y media aleación, acero al cromo molibdeno, acero resistente a la cavitación y acero especial resistente al desgaste. El acero de baja aleación tiene buena resistencia a la abrasión y buena tenacidad al impacto (Kuzmikova, 2013; Yadav y col., 2016).

La resistencia de un material al desgaste o a la abrasión, es una propiedad que se relaciona con todo un sistema. Se involucran dos tipos de factores, uno externo, que involucra las características abrasivas, la velocidad, las variables involucradas en el proceso. Otro tipo de factores son los internos, los cuales abarcan desde la composición química, procesos de fabricación, que dan como resultado distintas microestructuras, y en consecuencia propician propiedades diversas (Xue y col., 2020).

Es por eso por lo que el estudio del fenómeno de desgaste es tan importante, ya que tiene la finalidad de mejorar el rendimiento y la vida de los materiales tras un correcto estudio y elección de propiedades y características.

1. Desgaste

El desgaste es un proceso en el que hay un daño continuo en las superficies que están en contacto y en movimiento, este es el resultado de la fricción. Se estudia el desgaste con el objetivo de encontrar los factores y leyes de los fenómenos con la finalidad de buscar métodos de control y mejoras esa propiedad en los materiales. Los principales puntos de estudio sobre el desgaste son:

- a) Condiciones, características y leyes de variación del desgaste.
- b) Factores dentro del desgaste, los materiales a analizar, condiciones de lubricación, temperatura, velocidad de deslizamiento, cargas, parámetros de trabajo.
- c) Cálculo del desgaste.

d) Medidas para la mejora de la resistencia al desgaste.

e) Tecnología de la prueba y análisis experimental.

Dentro del fenómeno de desgaste existen mecanismos establecidos: abrasivo, adhesivo, por fatiga y corrosivo (Wen y Huang, 2018).

2. Desgaste en aceros resistentes a la abrasión

El acero, uno de los principales metales usados a nivel mundial, es empleado en diversas industrias, como la minera, siderúrgica, de construcción, entre muchas otras. Por tal motivo, este material en muchas de sus aplicaciones está expuesto al desgaste constante. Existen diversos tipos de aleaciones en los aceros, y su resistencia a la abrasión es variable a causa de diversos factores, principalmente de su composición y procesamiento. Se exponen a continuación trabajos de investigación enfocados en el estudio del desgaste en diferentes tipos de aceros.

2.1 Aceros microaleados

Deng y col. (2014) realizaron un estudio en un acero martensítico medio carbono y de baja aleación, donde analizaron el efecto de los parámetros del procesamiento del acero, como laminado y tratamientos térmicos, sobre las propiedades mecánicas de un acero martensítico 0.27%C y Ni, y libre de Mo. Reportaron como a través de un templeado (880°C), y un revenido (170°C) mejoran la dureza, la cual fue posterior al temple de 510HV. Los mecanismos principales de desgaste que reportan fueron deformación plástica por fatiga y desgaste abrasivo.

Liu y col. (2018) reportaron un estudio acerca del efecto del forjado y recocido multidireccional en el desgaste abrasivo de un acero medio carbono de baja aleación. Sometieron las piezas a 760°C durante 150 min y posteriormente las templaron en agua. Después las calentaron a 600°C, y finalmente las forjaron alternadas a 90° en 3 ciclos. Por último, les realizaron un recocido a 450°C por 150 min. Midieron la microdureza HV (9.8 N, 10 s) y realizaron pruebas de tensión. El

desgaste lo calcularon en un sistema de 3 cuerpos, con arena como abrasivo. Las microestructuras que obtuvieron fueron ferrita y martensita finas. En general aumentaron la resistencia a la tracción y dureza, además del desgaste a la abrasión (en un 97%), como consecuencia del proceso de forjado multidireccional.

Xue y col. (2020) reportaron en su trabajo el análisis de un acero resistente a la abrasión de baja aleación, observaron como la templeabilidad es uno de los factores que afecta la vida útil de este tipo de acero. Por lo que estudiaron el efecto de esta en la microestructura y las propiedades mecánicas en el acero. Realizaron pruebas como la de impacto, Charpy, desgaste pin-on-disk, y el análisis de microestructuras lo realizaron por medio de microscopía óptica, microscopio electrónico de barrido (MEB) y microscopio electrónico de transmisión (MET). En sus resultados presentaron al acero con mayor contenido de Cr y Mo, con mayores durezas (390.4 HB), los cuales exhiben también las microestructuras presentes en los aceros, siendo las más significativas martensita y bainita, coincidiendo con que estos aceros presentaron menor desgaste.

2.2 Aceros al manganeso

Ge y col. (2017) realizaron su estudio con el objetivo de encontrar un mecanismo que mejore la resistencia al desgaste por impacto de un acero al medio manganeso utilizado en máquinas mineras. Las pruebas de desgaste las analizaron en un equipo de desgaste por impacto MLD-10. Analizaron los mecanismos de desgaste por medio de microscopio electrónico de barrido, microscopio electrónico de transmisión y difracción de rayos X. En los resultados reportaron que en el acero al manganeso hay un 30% menos pérdida de masa en comparación con el acero martensítico, es decir que tiene mayor resistencia al desgaste por abrasión e impacto. También este acero presentó una microestructura austenítica metaestable y presentó dureza de 512 HRC. Analizaron los mecanismos de refuerzo para energías de alto y bajo impacto, en la Figura 1 se puede observar la comparación

del acero al manganeso (MMAS) y el acero martensítico (MWRS), y es evidente la menor pérdida del acero al manganeso, el autor se lo atribuye a su propiedad específica de alta tenacidad al impacto y efecto de endurecimiento por trabajo.

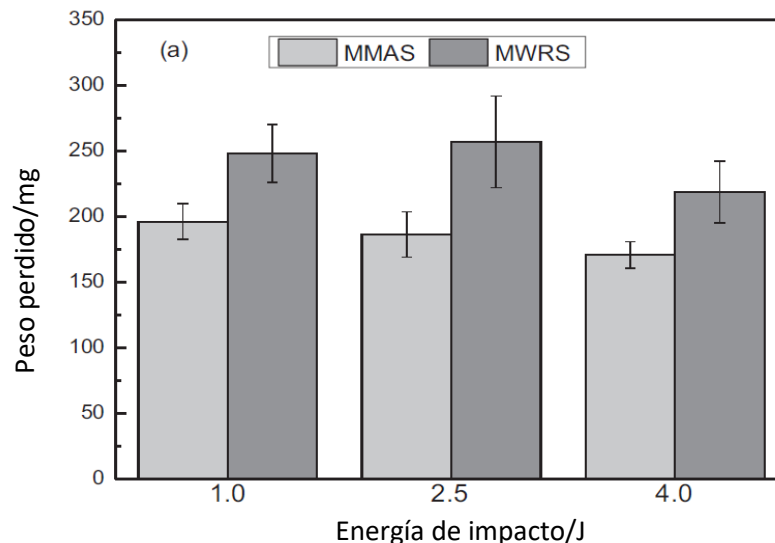


Figura 1 Variación de la pérdida de peso de un acero medio manganeso (MMAS) y un acero martensítico (MWRS) para diferentes niveles de energía (Ge,2017).

Dalai y col. (2018), en sus estudios sobre aceros austeníticos al alto manganeso, analizaron el efecto del procesado termomecánico sobre las propiedades de abrasión de bajo impacto y desgaste por deslizamiento de baja tensión de los aceros con alto contenido de manganeso (Fe17Mn y Fe17Mn3Al). Observaron que tras aplicar un tratamiento termomecánico se mejoran significativamente la abrasión y desgaste de ambos aceros. En los resultados reportaron que el acero Fe17Mn presentó mayor resistencia a la abrasión por impacto y al desgaste por deslizamiento comparado con el acero Fe17Mn3Al. El fenómeno principal de desgaste que ellos reportan es por corte, deformación plástica y oxidación.

Ayadi y col. (2020) desarrollaron un trabajo de investigación sobre la microestructura y el desgaste de un acero al manganeso aleado con Cr-Mo-Nb, y lo compararon con el acero al manganeso con bajo contenido en cromo. Emplearon

tratamientos térmicos a 1050 y 1100°C, y enfriamiento en agua. Emplearon las técnicas de MO, MEB, espectrómetro de dispersión de energía, dureza rockwell C y microdureza Vickers. La técnica que emplearon para evaluar el desgaste fue pin-on-disk bajo 300 N, a 200 rpm durante 200 m, emplearon como lubricante aceite. En los resultados reportaron la transformación microestructural a martensita y austenita retenida debido a la adición del Cr, Mo y Nb. Y al haber un cambio a esa microestructura reportaron mejoras en durezas y resistencia al desgaste. Los aceros que presentaron menor pérdida de masa son los tratados térmicamente a 1100°C con mayor contenido de Cr, Mo y Nb.

Yan, X. et al. (2021) investigaron acerca de los aceros al medio manganeso, y la influencia de la austenita retenida en el comportamiento al desgaste por deslizamiento. En este estudio estos investigadores emplearon la prueba ball-on-disk, a 50 N, 60 mm/s y 500 m de recorrido. En sus resultados muestran que la microestructura tras el recocido a <695°C cambia a austenita y ferrita. La mayor dureza la obtuvieron en la muestra recocida a 675°C, con una estructura martensítica, con una gran estabilidad térmica, lo que mencionan, mejoró la dureza y la resistencia al desgaste.

2.3 Aceros al boro

Pawlak y col. (2016) estudiaron la influencia de la temperatura de austenización en el tamaño de grano de la austenita y la resistencia al desgaste por abrasión de un acero al boro de baja aleación. El desgaste lo realizaron en un equipo de prueba de desgaste rueda-arena seca con la norma GOST std T-07, en el cual las muestras de acero fueron desgastadas con partículas de alúmina. Los mecanismos que reportaron en el desgaste abrasivo fueron por microcorte, microlaminado y microperforado. El acero empleado hardox 450, reportan presenta microestructura martensítica. Realizaron un tratamiento de austenizado (900-1100°C, 20 min) y templado en agua. El desgaste lo determinaron usando el método gravimétrico.

Determinaron que el grano de austenita crece a medida que aumenta el austenizado. La mejor resistencia al desgaste fue en el material austenizado a 900°C (coeficiente de desgaste K:1.049), analizaron como a mayor tamaño de grano de austenita, el desgaste es menor, pero un tamaño mayor a 40 mm reduce la resistencia al desgaste.

Vuorinen y col. (2018) realizaron un trabajo acerca del desgaste erosivo-abrasivo de aceros bainíticos sin carburos y al boro. Encontraron diversos mecanismos de desgaste, en los aceros al boro, microcorte y microarado. Los aceros bainíticos presentaron mejor resistencia al desgaste, por su microestructura de austenítica-ferrítica fina (austenita retenida), mientras que en los aceros al boro la microestructura fue martensítica. Trataron térmicamente el acero al boro con un austenizado a 900°C y templado en agua, seguido de un revenido. Y al acero bainítico lo sometieron a un austenizado a 950°C y austempering 270°C. La prueba de abrasión la hicieron en recipiente seco simulando desgaste erosivo de líquido a altas velocidades. La tasa de desgaste fue mejor en el acero bainítico que en el acero al boro (30% mayor).

Peruzzo y col. (2019) enfocaron su trabajo de investigación a evaluar el desgaste por deslizamiento alternativo de un acero inoxidable 316L sinterizado con boro (0.6, 0.8% en peso, mediante metalurgia de polvos). Emplearon como técnicas de caracterización el método de Arquímedes, microscopio electrónico de barrido de emisión de campo, microscopio óptico, dureza Vickers y microdureza para las fases. El desgaste lo realizaron en un tribómetro con bola de alúmina, carga de 3 N y distancia de 1728 m. En sus resultados de microestructura reportaron la presencia de austenita para la aleación libre de boro, y las que tienen adición de boro, presentan cambios de austenita irregular a esférica y precipitados irregulares. El coeficiente de fricción fue de 0.85 y no cambió significativamente con la adición de boro, el coeficiente específico de desgaste disminuyó al aumentar el contenido de

boro. Los mecanismos que presentaron fueron desgaste adhesivo (deformación plástica), y rayaduras por abrasión, además de oxidación.

3. Influencia de los tratamientos térmicos en la resistencia al desgaste

Dentro de los diferentes métodos o modificaciones dentro de los aceros para mejorar su microestructura y propiedades destaca el uso de tratamientos térmicos. En algunos estudios los tratamientos térmicos son empleados para mejorar el comportamiento tribológico de los aceros y su mejora en propiedades mecánicas.

El tratamiento térmico de temple es un proceso seleccionado para la transformación de austenita a martensita, la cual le proporciona a los aceros una muy buena resistencia ante el desgaste, este tratamiento junto con el tratamiento de revenido proporciona la martensita templada, microestructura que proporciona mejor ductilidad y dureza. Otro tratamiento es el austempering, el cual otorga un rendimiento mayor para los aceros (Han y col., 2020).

Han y col. (2020) analizaron el comportamiento tribológico de un acero AISI 6150 templado y revenido, y de uno con tratamiento térmico de austempering bajo la prueba de deslizamiento bola en disco. La superficie del acero se endureció después de la prueba tribológica, ya que hubo formación de martensita por el calentamiento por fricción y un templado durante las pruebas de desgaste, y a medida que aumentó la temperatura el desgaste en la superficie fue mayor que en los materiales resultantes del austempering, mayor número de huecos y grietas en la región de la martensita templada (delaminación).

Li y col. (2019) estudiaron un acero martensítico de baja aleación (HTP), sometido a un calentamiento de 300-500°C, y su comparación con un acero resistente al desgaste (NM400). Reportaron para el acero HTP que a medida que la temperatura del revenido aumentó a 500°C, la profundidad del desgaste disminuyó, le atribuyeron esto a un aumento en la dureza, 25%, y una resistencia al desgaste 1.7 mayor que la NM400. La transformación de martensita templada a sorbita templada

mejoró la resistencia en el acero martensítico. Los mecanismos de desgaste cambiaron de fatiga y desgaste abrasivo a desgaste oxidativo y deformación plástica (300-500°C). En este estudio analizaron como la adición de Mo mejoró la estabilidad de templado en la aleación HTP.

Gonzalez y Alvarez, (2019) mejoraron la resistencia al desgaste erosivo de un acero con 18% Cr y 2%Mo, las cuales sometieron a distintos tratamientos térmicos a 1000°C para desestabilizar la austenita, con tiempos de 4-24 h, y enfriamientos en agua y aceite. Obtuvieron la mayor resistencia al desgaste con las muestras con mayores porcentos de carburos secundarios, entre mayor fue el tiempo de permanencia a la temperatura, mayor es el número de carburos. Los aceros con mayor resistencia al desgaste fueron los que se sometieron a 1000°C durante 8 y 12 h. La dureza máxima de 961 HV, se obtuvo en las muestras templadas al aire, tras una disminución de austenita retenida.

Vdovin y col. (2017) analizaron el desgaste de un acero con alto contenido de manganeso y la influencia de varios materiales, tras un proceso de decarburación. El calentamiento fue de 1050-1000°C y enfriamiento en agua. Las aleaciones con adiciones de ferrocromo, ferrovanadio, con Ti-Ca-N, Ti-B, y boro, mostraron mejoras en la resistencia al desgaste. El acero con adición Ti-Ca-N tras el tratamiento térmico aumentó su resistencia al desgaste en un rango de 10-23%.

4. Aplicaciones de los aceros resistentes a la abrasión

El acero al ser un material muy comercial, y versátil que a la hora de modificar sus propiedades o emplear mejoras en su composición, propiedades mecánicas, resistencia al desgaste, es muy utilizado a nivel global. Los aceros resistentes a la abrasión, como su nombre lo dice, son aceros que son diseñados para aplicaciones en los que están en constante degradación del material. A continuación, se muestra recopilación de algunas investigaciones en las que se emplean distintos tipos de aceros con alta resistencia al desgaste.

En el caso de los aceros de alta resistencia y baja aleación se presentan en aplicaciones marinas, en piezas que están sometidas a una alta relación de resistencia-peso. Los aceros se emplean para fabricar las estructuras que están sumergidas en el mar, como cadenas, sistemas de las plataformas de petróleo, anclaje entre otros (López-Ortega y col., 2018).

La diversidad de aplicaciones de los aceros microaleados depende del elemento que se destaque en la aleación. En el caso de aceros microaleados al boro, se han empleado en la industria automotriz, con la finalidad de disminuir el peso de las estructuras, típicamente usados en columnas y refuerzos en condiciones de temple o revenido con aprox. 900MPa de resistencia a la tracción (Nadale y Svoboda, 2018).

Otros aceros que han desarrollado aplicaciones en el sector automovilístico son los aceros TWIP microaleados, los cuales son aceros austeníticos con alto contenido en Mn (15-30% en peso). Estos aceros también presentan menor peso que los aceros convencionales. Tras adiciones de elementos como Ti, V, Nb y Mo, la ductilidad de estos aceros se ve favorecida y esto se atribuye al fenómeno de la recristalización dinámica (Reyes Calderón y col., 2016).

El acero AISI 6150 ha sido objeto de estudio, ya que se ha buscado aplicar tratamientos térmicos con la finalidad de mejorar el comportamiento de este acero ante el desgaste. Este material presenta propiedades como alta resistencia a la fatiga y buena resistencia mecánica. Tiene diversas aplicaciones como bielas, engranajes y ejes, piñones, etc (Han y col., 2020).

En algunos aceros, se han buscado mejorar las propiedades superficiales. El tratamiento superficial láser para un acero 44MnSiVS6 microaleado, es estudiado por Dewi, (2020). Reportaron como mejorar las propiedades del acero ante la fatiga, para su aplicación en componentes de automoción, como cigüeñales. Reportan que

estos aceros presentan una buena maquinabilidad y templabilidad (Dewi y col., 2020).

Los aceros microaleados, presentan buena combinación de resistencia y ductilidad. Mediante un control en tratamientos termomecánicos y enfriamiento, se pueden conseguir microestructuras complejas y mejorar así sus propiedades mecánicas. Los aceros microaleados tienen gran variedad de aplicaciones, tanto comerciales como industriales; algunas son en construcción, vehículos pesados, vagones de ferrocarril (Figura 2), tuberías para transportar hidrocarburos, entre otras (Villalobos y col., 2018).



Figura 2: Vagón de ferrocarril elaborado de acero. Fuente: <https://www.mammoet.com/equipment/transport/heavy-duty-rail-cars/heavy-duty-rail-cars/>

Los aceros martensíticos, con austenita residual, presentan buenas propiedades al desgaste, en comparación con los aceros estructurales. Estos materiales son empleados en máquinas de minería y transporte, y están en constante exposición a la abrasión (Wieczorek, 2018).

Conclusiones

El desgaste es un proceso de degradación de los materiales, que depende de factores como ambiente, dureza de los materiales, composiciones, velocidades, entre muchos otros.

En el caso de los aceros resistentes a la abrasión, destacan los aceros microaleados, los aceros aleados al manganeso, al boro y cromo, los cuales presentan buena resistencia al desgaste en condiciones específicas.

En la mayoría de los trabajos de investigación se analiza como a través de tratamientos térmicos, como temple y revenido, se modifica la microestructura y por lo tanto se modifican las propiedades, siendo destacable la propiedad de la dureza y resistencia al desgaste.

Dentro de las aplicaciones de los aceros resistentes a la abrasión, buscan la adición de elementos que les proporcione condiciones específicas a los aceros, además de tratamientos térmicos, esto dependiendo del uso que tenga ese material, y de las propiedades que se pretenden cambiar o modificar.

Agradecimientos

Le agradezco al CONACYT por el otorgamiento de la beca para realizar mi proyecto de investigación. Al programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales, al Dr. Felipe Ávalos Belmontes por sus enseñanzas y constante retroalimentación. A la Dra. Ma. de Jesús Soria Aguilar y al Dr. Lázaro Falcón Franco por la oportunidad de trabajar con ellos y su apoyo en la escritura y corrección de este trabajo.

Referencias

- Ayadi, S., Hadji, A., Hakan, K. y Selman, D. (2020). Microstructure and wear behavior of a Cr-Mo-Nb alloyed manganese steel. *Integrative Medicine Research*, 9(5), 11545–11562. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.048>
- Dalai, R., Das, S. y Das, K. (2018). Effect of thermo-mechanical processing on the low impact abrasion and low stress sliding wear resistance of austenitic high manganese steels. *Wear*. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.013>
- Deng, X. tao, Wang, Z. dong, Han, Y., Zhao, H. y Wang, G. dong. (2014). Microstructure and Abrasive Wear Behavior of Medium Carbon Low Alloy Martensitic Abrasion Resistant Steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 21(1), 98–103. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60015-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60015-7)
- Dewi, H. S., Fischer, A., Volpp, J., Niendorf, T. y Kaplan, A. F. H. (2020). Microstructure and mechanical properties of laser surface treated 44MnSiVS6 microalloyed steel. *Optics and Laser Technology*, 127(September 2019), 106139. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106139>
- Ge, S., Wang, Q. y Wang, J. (2017). The impact wear-resistance enhancement mechanism of medium manganese steel and its applications in mining machines. *Wear*, 376–377, 1097–1104. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.015>
- Gonzalez, A. y Alvarez, F. (2019). Erosive Wear Resistance Regarding Different Destabilization Heat Treatments of Austenite in High Chromium White Cast Iron , Alloyed with Mo. *Metals*, 522.
- Han, X., Zhang, Z., Hou, J., Thrush, S. J., Barber, G. C., Zou, Q., Yang, H., Qiu, F., Army, U. S., Capabilities, C., Command, D., Vehicle, G. y Rd, E. M. (2020). Tribological behavior of heat treated AISI 6150 steel. *Integrative Medicine Research*, 9(6), 12293–12307. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.089>

- Holmberg, K., Kivikytö-Reponen, P., Härkisaari, P., Valtonen, K. y Erdemir, A. (2017). Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 115, 116–139. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.010>
- Kuzmikova, L. (2013). *An Investigation of the Weldability of High Hardness Armour Steels*. Wollongong, Australia.
- Li, C., Deng, X., Huang, L., Jia, Y. y Wang, Z. (2019). Effect of temperature on microstructure , properties and sliding wear behavior of low alloy wear-resistant martensitic steel. *Wear*, November, 203125. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203125>
- Liu, X., Xiao, L., Wei, C., Xu, X., Luo, M. y Yan, W. (2018). Effect of multi-directional forging and annealing on abrasive wear behavior in a medium carbon low alloy steel. *Tribology International*, 119(December 2017), 608–613. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.043>
- López-Ortega, A., Bayón, R., Arana, J. L., Arredondo, A. y Igartua, A. (2018). Influence of temperature on the corrosion and tribocorrosion behaviour of High-Strength Low-Alloy steels used in offshore applications. *Tribology International*, 121, 341–352. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.049>
- Nadale, H. C. y Svoboda, H. G. (2018). Fatigue life of PAW welded joints of high strength microalloyed boron steels. *Revista Materia*, 23(2). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0333>
- Pawlak, K., Bia, B. y Konat, Ł. (2016). *ScienceDirect The influence of austenitizing temperature on prior austenite grain size and resistance to abrasion wear of selected low-alloy boron steel*. 6. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.003>
- Peruzzo, M., Sera, F. L., Ordoñez, M. F. C., Souza, R. M. y Farias, M. C. M. (2019). *Reciprocating sliding wear of the sintered 316L stainless steel with boron*

additions. 423(September 2018), 108–118.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.027>

Reyes Calderón, F., Slas Reyes, A. E., García Mora, E., Calvo, J., Cabrera, J. M. y Mejía, I. (2016). Desarrollo de aceros TWIP microaleados. *Congreso y Exposición de la Industria del Acero-CONAC, August 2020*, 1–13.

Vdovin, K. N., Feoktistov, N. A. y Gorlenko, D. A. (2017). *Influence of Heat Treatment on Wear Resistance of Alloyed Hadfield Steel and Phase Transformations in it*. 265, 640–645. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.640>

Villalobos, J. C., Del-Pozo, A., Campillo, B., Mayen, J. y Serna, S. (2018). Microalloyed steels through history until 2018: Review of chemical composition, processing and hydrogen service. *Metals*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/met8050351>

Vuorinen, E., Heino, V., Ojala, N., Haiko, O. y Hedayati, A. (2018). *Erosive-abrasive wear behavior of carbide-free bainitic and boron steels compared in simulated field conditions*. 232(1), 3–13. <https://doi.org/10.1177/1350650117739125>

Wen, S. y Huang, P. (2018). *Principles of Tribology* (J. Wiley (ed.); 2nd ed.).

Wieczorek, A. N. (2018). Experimental Studies on the Influence of Abrasive Materials on the Wear of Hard-Wearing Steels. *Tribologia*, 281(5), 133–141. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.7665>

Xue, H., Peng, W., Yu, L., Ge, R., Liu, D., Zhang, W. y Wang, Y. (2020). Effect of hardenability on microstructure and property of low alloy. *Materials Science & Engineering A*, 793(April). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139901>

Yadav, R., Naebe, M., Wanga, X. y Kandasubramanian, B. (2016). Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems. *RSC*, 6, 115145–115174.