

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE ACERO AL BORO EMPLEADO EN LA INDUSTRIA AGROPECUARIA

María N. Delpuppo¹, Graciela A. Mansilla¹

¹Departamento Metalurgia, Grupo Metalurgia Física, Facultad Regional San Nicolas, Universidad Tecnológica Nacional, Colon 332, 2900 San Nicolas de los Arroyos, Argentina, (e-mail: mdelpupo@frsn.utn.edu.ar)

Resumen

Los aceros hipoeutectoides que tienen al boro como uno de los principales constituyentes evidencian incremento en la templabilidad al retardar la nucleación de ferrita proeutectoide en los límites de grano austenítico. Sin embargo, la influencia en la templabilidad además varía sustancialmente con el contenido de carbono. Tal como sucede con el carbono, el boro es soluble sólo a escala atómica en la red del hierro y si bien, han requerido una evolución histórica en su conocimiento con el tiempo, éstos continúan siendo tema de estudio debido a su relativo bajo coste de fabricación, bajo precio en el mercado internacional y sus posibles aplicaciones industriales. Particularmente se emplean en herramientas que requieren alta resistencia al desgaste y corrosión como por ejemplo, en la industria agropecuaria argentina.

El objetivo de este trabajo es analizar la microestructura de muestras de aceros Aceros AISI 15B30I, su dureza y comportamiento mecánico sometido a tracción, utilizado en el proceso de conformado de discos de arados y sembradoras. Esto permitirá, posteriormente comparar los resultados de la resistencia al desgaste y corrosión de piezas en servicio.

Palabras Clave: aceros, boro, corrosión, desgaste

Introducción

Los aceros al boro, aunque presentan otros elementos de aleación, tienen al boro como uno de los principales constituyentes. Son aceros hipoeutectoides, de matriz ferrítica y con perlita en su constitución, con cerca de un 0,25% de carbono en masa. El boro es un elemento intersticial y tiene una solubilidad muy baja en la solución de α -sólido (Titiva, 2007). La presencia del boro en este tipo de aceros es muy importante para la templabilidad. El boro incrementa la templabilidad de los aceros hipoeutectoides al retardar la nucleación de ferrita proeutectoide en los límites de grano austenítico, y en menor extensión, la transformación de bainita superior, que es nucleada por ferrita, sin afectar apreciablemente la tasa de crecimiento de estos compuestos (Kapadia, 1997). Pequeñas trazas de boro tienen un poderoso efecto en la templabilidad y aumenta la capacidad de endurecimiento del acero (Yamanaka, 1977) (Werner, 1995). La influencia en la templabilidad varía sustancialmente con el contenido de carbono en el compuesto. Existen otros factores que influyen en la efectividad del boro, tales como la influencia del contenido de nitrógeno, la influencia de desoxidantes y el efecto negativo de la alta temperatura de austenización sobre el efecto del boro en la templabilidad (Siebert, 1977).

Los aceros al boro al igual que los otros tipos de acero, han requerido una evolución histórica en su conocimiento con el tiempo. Éstos han sido tema de estudio debido a su relativo bajo coste de fabricación, bajo precio en el mercado internacional y sus posibles aplicaciones industriales. En muchos países se han fabricado distintos aceros con estas microestructuras a los cuales se les ha cambiado el porcentaje de distintos aleantes, sin tener en cuenta los problemas medioambientales. Los primeros trabajos (Powers, 1954) (Sharma, 1979) han establecido los efectos del boro en la templabilidad y los resultados logrados siguen siendo válidos hoy en día en los desarrollos tecnológicos de los aceros al boro donde los científicos demostraron que el mecanismo actuante está asociado a una disminución de la energía interfacial. A su vez, este cambio de energía obedece a la precipitación de átomos de boro en los límites de grano (Masakatsu, 1991).

Sin lugar a duda, el boro es, a día de hoy, uno de los mejores elementos químicos templantes del acero. Se mostró, claramente, cómo el boro tiene un efecto más marcado en los aceros de bajo

contenido en carbono. Luego, se analizó la variación de las propiedades mecánicas de aceros aleados con boro respecto a dos medios de enfriamiento distintos, aire y agua (Mejía, 2011). Sobre la misma línea de trabajo, científicos han estudiado la influencia del boro en las propiedades mecánicas de aceros al carbono demostrando que una mejora de la calidad de acero AISI 1536, puede llevarse a cabo por adición de boro. Esto es, la adición de boro hasta 0,00230% aumenta bruscamente tanto el rendimiento como la resistencia a la tracción final. El alargamiento del acero también aumenta a medida que lo hace el contenido en boro, hasta llegar a un 0,0055%. Así mismo, la adición de boro mejora la resistencia al impacto, a 25°C, y la tenacidad del material en servicio (Saeed, 2012) (Mejía, 2011)).

Actualmente, los estudios van dirigidos al estudio de la mejoría de las propiedades mecánicas de los aceros al boro, teniendo en cuenta la preservación del medioambiente. La necesidad de traer resultados más fieles y aplicables del uso de los aceros al boro sigue siendo la prioridad de los científicos en la actualidad.

Aplicaciones

Como elemento de aleación, el boro brinda propiedades interesantes en una amplia gama de aplicaciones en la industria automotriz, industria de tubería, en la construcción, entre otras. (El-Shennawy, 2016) (Parra, 2021). Así, en los aceros de boro, podemos ver su gran utilidad en diversas aplicaciones, como material de desgaste y como acero estructural de alta resistencia. Algunos ejemplos incluyen a las herramientas como cuchillos, espadas, hojas de sierra, vigas de seguridad en vehículos, etc. En el lado de la ingeniería se ha usado el acero al boro en componentes estructurales que realizan cargas cíclicas (Ali, 2019).

En cuanto al uso en la industria automotriz, existen diferentes tipos de acero comúnmente utilizados que cubren una amplia gama de propiedades mecánicas que requiere el fabricante. Se puede elegir un grado particular de acero por su resistencia o ductilidad, dependiendo de la aplicación. Los aceros suaves y de baja resistencia pueden deformarse a niveles bastante altos de deformación antes del fallo, lo que es beneficioso tanto para la absorción de energía como para la formación de geometrías complicadas.

Las aplicaciones de estos aceros, resistentes al desgaste, son variadas entre las que se encuentran (Fig. 1) (Greens, 2015) (Madías, 2012):

- Las obras públicas, donde se empleará para la fabricación de piezas que requieran una mayor aptitud al conformado, para elevadas durezas finales.
- En la industria minera, aplicado a la fabricación de piezas resistentes al desgaste como hormigoneras, plataformas y estructuras, tolvas, alimentadores y volquetes, etc.
- En la industria pesada, para la fabricación de remolques y contenedores, palas para excavadoras y máquinas de movimiento de tierras.
- En la industria agrícola, para la fabricación de discos, rejas de arado, moldeadoras.
- En la industria del automóvil, en fabricación de tornillería.



Fig. 1. Aplicaciones de aceros al boro

El objetivo de este trabajo es caracterizar el acero al boro, AISI 15B30, a partir de muestras de planchuelas empleadas como materias primas en el conformado de discos de arado de la industria agropecuaria. A través de análisis microestructural, medición de dureza y tamaño de grano, y análisis del comportamiento mecánico en ensayo de tracción, se pretende sentar las bases de estudio primario que permitan, en instancias posteriores, evaluar y optimiza los tratamientos térmicos y conformado óptimo de este tipo de acero.

Materiales y métodos

A partir de planchuelas de sección de 25,4 mm por 127 mm de acero AISI 15B30, se cortaron muestras cúbicas de 15 mm de lado, en máquina LECO. La composición química del acero se detalla debajo (Tabla 1).

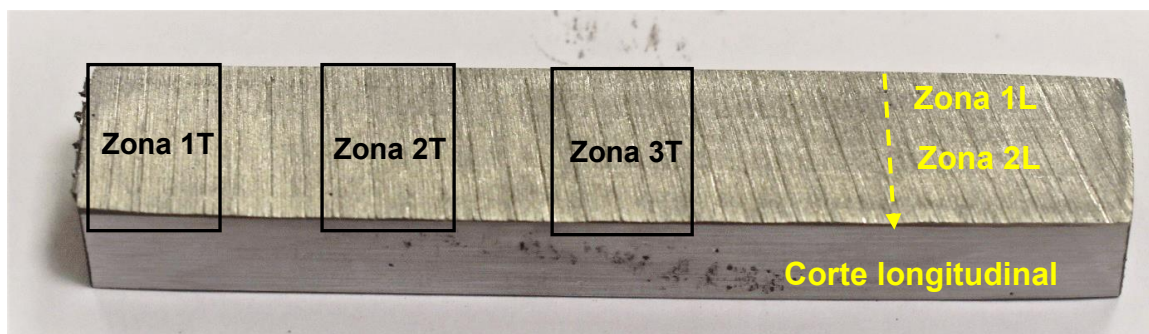
Tabla 1. Composición química del acero [%].

C	P	S	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	B	Ti
0,33	0,020	0,020	1,40	0,30	0,20	0,09	0,17	0,06	0,040	0,0030	0,045

En primer lugar, se cortaron muestras longitudinales (paralela a la dirección de laminación) y transversales (perpendicular a la dirección de laminación), en cortadora a disco refrigerado LECO MC-80 (Fig. 2). Se realizó desbaste grueso sobre una pulidora de banda con el objeto de eliminar rebabas, imperfecciones de corte, aplanado de pastillas o muestras. Luego, en el desbaste fino se realizó remoción de los efectos del desbaste grueso y remoción de los efectos del grano de papel empleado en cada etapa anterior. Por último, el pulido se realizó con pasta de diamante de 4 a 8 micrones en pulidora Buehler ECOMET 4 y se atacaron las muestras con Nital al 2%. Las muestras longitudinales y transversales se observaron mediante microscopía óptica en microscopio OLYMPUS GX51.



a)



b)

Fig. 2. a) Muestra en estado de recepción, b) Cortes realizados en material as-received

Posteriormente, se realizó medición de tamaño de grano y de dureza en Zonas 1, 2 y 3, correspondientes a la zona externa, media y central de la planchuela a partir de corte transversal

de la misma como se indica en la figura (Fig. 2). Por último, se analiza el comportamiento mecánico de las planchuelas sometidas a tracción, ensayo empleado en el control de calidad de procesos previos al conformado de discos de arados y sembradoras. El ensayo de tracción se realiza bajo Norma ASTM A-370 en máquina de Ensayos Universal de Ensayos Shimadzu Modelo UH 50A, sobre muestras normalizadas obtenidas de corte longitudinal en la zona media de las planchuelas (Anual Book ASTM, 1981).

Resultados y discusiones

Se analizaron las muestras bajo las condiciones ensayadas, Zona 1, Zona 2 y Zona 3 correspondientes a zona externa, media y central de la planchuela. A partir del análisis de las micrografías ópticas obtenidas, en el corte transversal (Fig. 3) se observa matriz ferrítico-perlítica con leve decarburación en zona superficial de la planchuela.

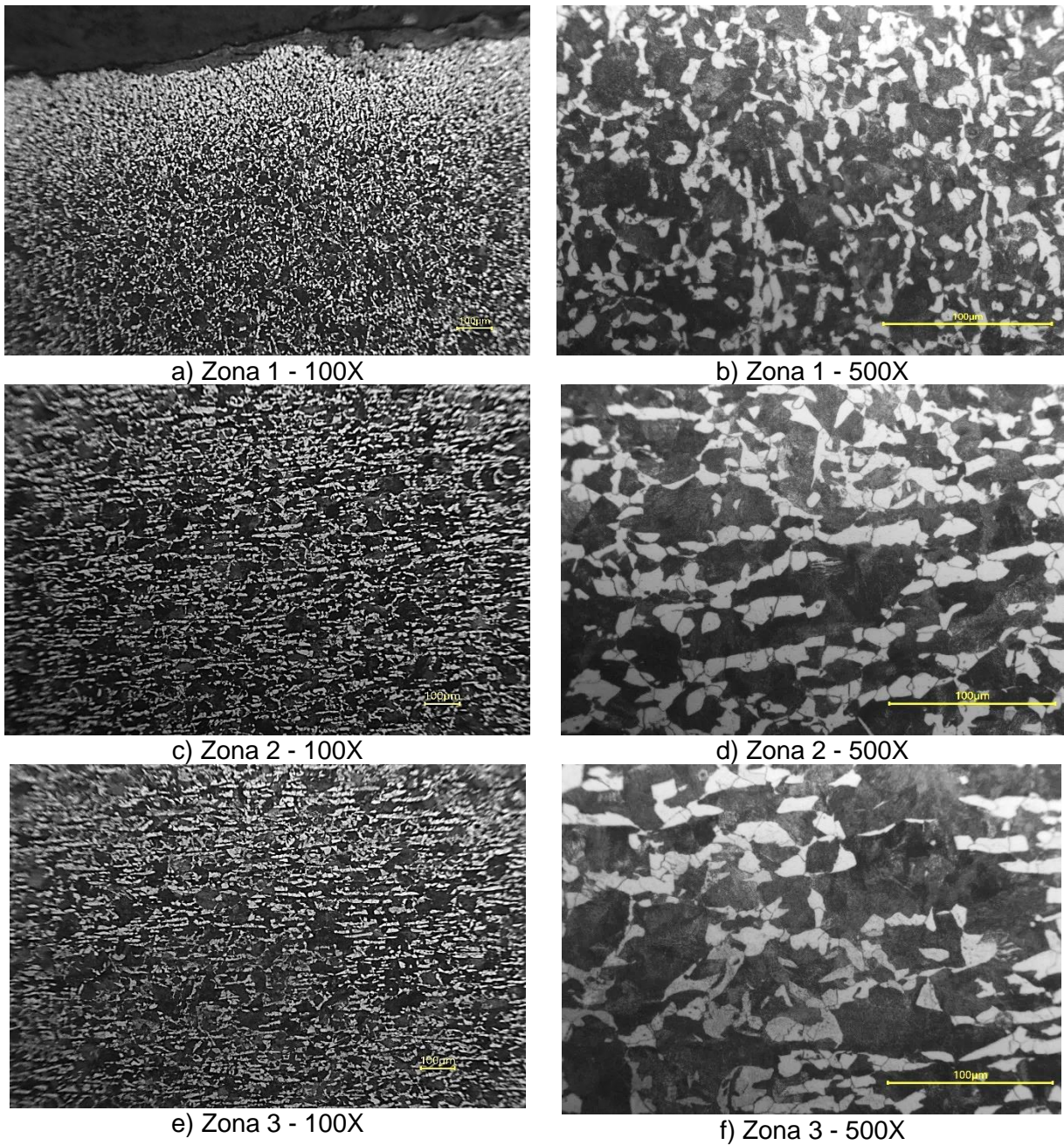


Fig. 3. Microscopía óptica de muestras obtenidas en corte transversal

Por su parte, de las imágenes obtenidas de la microscopía óptica en el corte longitudinal (Fig. 4), se observan granos levemente alargados en el sentido de laminación. Se infiere que los puntos negros en borde de grano serían de carburos de boro precipitados durante la solidificación debido a que, como elemento químico, el boro incrementa la templabilidad de los aceros hipoeutectoides al retardar la nucleación de ferrita proeutectoide en los límites de grano austenítico, y en menor extensión, la transformación de bainita superior (que es nucleada por ferrita) sin afectar apreciablemente la velocidad de crecimiento de estos compuestos. El boro no retarda la formación de la perlita.

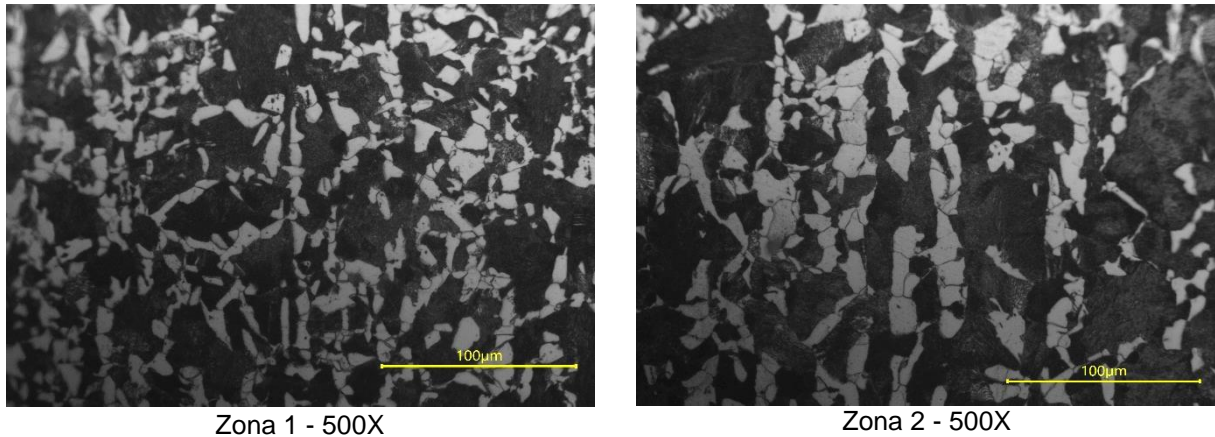


Fig. 4. Microscopia óptica de muestras obtenidas en corte longitudinal

Como elemento químico, el boro incrementa la templabilidad de los aceros hipoeutectoides al retardar la nucleación de ferrita proeutectoide en los límites de grano austenítico, y en menor extensión, la transformación de bainita superior (que es nucleada por ferrita) sin afectar apreciablemente la rata de crecimiento de estos compuestos. El boro no retarda la formación de la perlita.

De acuerdo con investigaciones realizadas, (Maitrepierre, 1975), se estableció con precisión que el efecto del boro en la templabilidad está asociado a la precipitación al límite de grano de partículas muy finas de un constituyente identificado como borocarburo de hierro $\{Fe_2(CB)_6\}$. De igual forma, cuando el precipitado es muy fino, éste presenta una intercara semicoherente con la austenita y en esta intercara se inhibe la formación de ferrita al bajar considerablemente la movilidad atómica y, en consecuencia, se propicia la transformación martensítica. Se demostró, a su vez (Sharma, 1973) que el mecanismo actuante en la precipitación está asociado a una disminución de la energía interfacial en dicha intercara en vez de la disminución de energía libre volumétrica. En consecuencia, se descarta el efecto de compuestos de boro con oxígeno, nitrógeno y carbono.

De la medición de dureza superficial en las Zonas 1, 2 y 3, resulta en un promedio de 184,4 HV siendo similar en la zona central y media, y levemente mayor en la zona 1, correspondiente a la muestra extraída de la superficie de la pieza muestreada. Por su parte, la medición de tamaño de grano promedio resultó de 8 micrones (Tabla 2).

Tabla 2. Mediciones de durezas superficiales HV.

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Promedio HV
187,6	183,3	183,3	184,4

De acuerdo con los estudios realizados (Sierra, 2007) para los aceros AISI 1030 y AISI 15B30, resulta relevante el estudio de la variación de la dureza logrado antes y luego de tratar térmicamente

al acero, resultando similar en el rango de temperaturas de revenido entre 25 y 350°C, obteniéndose ambas durezas de 392 HV aproximadamente.

La importancia de estudiar el contenido de boro y su influencia en la templabilidad, radica en que el boro tiene un efecto más marcado en los aceros de bajo carbono, como el estudiado en esta investigación (Kapadia, 1977). Por otra parte, debido al bajo carbono de los aceros al boro, algunos fabricantes recomiendan el revenido como tratamiento opcional y otros sugieren que no es necesario.

Del ensayo de tracción realizado sobre dos muestras longitudinales extraídas en la zona media de las planchuelas PLA-5"x1", se obtuvieron los siguientes resultados como promedio de ambas mediciones (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados del ensayo de tracción.

Tensión de Fluencia [Mpa]	Tensión de Rotura [MPa]	Rel. Tr/Tf	% Alarg
352	632	1,79	0,211

Las probetas traccionadas presentaron rotura mixta frágil-dúctil a los 632 MPa, evidenciando un material resistente y frágil para el empleo en aplicaciones en servicio donde deberá presentar resistencia no solo a esfuerzos de tracción sino de impacto y abrasión.

En concordancia con los estudios realizados por otros investigadores (Sierra, 2001), para el empleo de este tipo de acero en servicio se hace fundamental presentar resistencia a esfuerzos de tracción de 140 a 160 MPa. Para ello, a partir del material as-received se realizan tratamientos térmicos determinados que obtengan no sólo estos valores de resistencia de tracción sino rangos de valores permisibles de resistencia al impacto.

Puesto que los aceros al boro son muy utilizados en aplicaciones agrícolas donde tienen exigencias de desgaste e impacto, (discos de arados), se vuelve, entonces, conveniente evaluar las propiedades mecánicas del acero 15B30 tratado térmicamente. Estos estudios serán objeto de análisis en próximas investigaciones.

Conclusiones

Los resultados de mediciones de durezas y tamaño de grano no presentan variación significativa a lo largo de la pieza empleada como materia prima de los discos de arados infiriendo que estos parámetros no podrían influir en la variación de propiedades obtenidas para los procesos posteriores de conformado y tratamiento térmico.

Las mediciones de dureza y resistencia a la tracción arrojaron valores donde se infiere que las piezas se fracturarían en servicio, aunque es fundamental establecer este conocimiento base que permita sentar las bases para analizar los posibles tratamientos futuros requeridos en el empleo de discos de arados en sembradoras.

El balance de características mecánicas obtenido en los aceros al boro es fundamental para evaluar su aplicación en servicio que requiera exigencias de tenacidad y resistencia al desgaste, evidenciado en esta primera etapa que el material base estaría en estas condiciones a partir de los resultados de los ensayos de tracción realizados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás. Por su parte, los ensayos de microscopía óptica y mecánicos se han realizado en las

instalaciones de una empresa siderúrgica de la región. Las autoras desean expresar su agradecimiento a Silvina Bertozzi, Andres Mansilla y Fabian Aguirre por su participación y contribución en el trabajo.

Referencias

Ali, S., Abdul, A.M., Ahmad, R., Hastuty, S., Hussain, M., Shehzad, N., Baig, Z. & Azeez, A.A. (2019). An Efficient Approach for Nitrogen Diffusion and Surface Nitriding of Boron Titanium Modified Stainless Steel Alloy for Biomedical Application. MDPI Journal

Anual Book of ASTM Standards. (1981). Parts 5 and 10.

El-Shennawy, M., Farahat, A., Masoud, M. & Abdel-Aziz, A. (2016). Effect of Boron Content on Metallurgical and Mechanical Characteristics of low Carbon Steel. International Journal of Mechanical Engineering (IJME).

Greens: The circular economy package. A transformation for all! (2015), <http://www.greens-efa.eu/the-circular-economy-package-14913.html>

Kapadia, Behram M. (1977). Prediction of the Boron Hardenability, Effect in Steel – A Comprehensive Review, Proceeding of Symposium. Hardenability Concepts with Applications to Steel, pp. 448-480.

Madías, J. (2012). Avances en la producción y aplicación de aceros bifásicos”. Acero Latinoamericano N° 532, pp. 46-54.

Maitrepierre D, Thivellier y Tricot R. (1975). Influence of Boron on the Decomposition of Austenite in Low Carbon Alloyed Steel. Metallurgical Transactions. Vol. 6^a. pp. 287-300.

Masakatsu, U. y Ashahi, H. (1991). Necessary Conditions for the Maximum Hardenability Effect of Boron and an Experimental Formula for Estimating the Hardenability of Boron Added Steels. Proceedings of the International Conference on Processing, Microstructure and Properties of Microalloyed and Other Modern High Strength Low Alloy Steels. Pittsburg U.S. pp. 257-270.

Mejía, I., Bedolla, J. A., Maldonado, C. y Cabrera, J.M. (2011). Hot ductility behavior of a low carbon advanced high strength steel (AHSS) microalloyed with boron. Materials Science and Engineering: A 528, pp. 4468-4474.

Parra E. C. y Martínez Luévanos A. (2021). Aceros con Boro y aplicaciones, CienciAcierta No. 67, ISSN: 2683-1848

Powers, A.E y Carlson, R.G. (1954). The Effect of Boron on Notch Toughness and Temperature Embrittlement of Steels. Transactions ASM, Vol. 46, pp 483-493.

Saeed, N., Ghali, H., Faramawy, S. y Eissa, M.M. (2012). Influence of Boron Additions on Mechanical Properties of Carbon Steel. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 11, pp.995-999.

Sharma R.C. & Purdy, G.R. (1973). Nucleation Limitation and Hardenability.. Metallurgical Transactions. Vol. 4. pp. 2303- 2311.

Sharma, R.C.; Purdy, G.R. y Kirkaldy, J.S. (1979). Thermodynamics and phase equilibria for the Fe-C-Cr system in the vicinity of the eutectoid temperature. American Society for metals, Vol.10A.

Siebert, C.A., Doane, D.V. y Breen, D.H. (1977). The Hardenability of Steels Concepts, Metallurgical Influences and Industrial Applications. American Society for Metals. Ohio, Metals Park, p. 218.

Sierra H. (2001). Propiedades mecánicas del Acero 15B30. Revista Universidad EAFIT N° 124, pp. 67-75.

Sierra Restrepo H. & Tobón D. M. (2007). Wear resistance vs. impact resistance of steel AISI15B30, quenched And tempered. Dyna, Año 74, Nro. 153, pp. 125-133. Medellín, ISSN 0012-7353.

Titiva, T.I., Shulgan, N.A. y Yu Malykhina, I. (2007). Effect of boron microalloying on the structure and hardnability of building Steel. Metal Science and Heat Treatment. Vol.49, No.1-2, pp.39-44.

Werner, D.H. (1995). Boron and Boron Containing Steels. Verlag Stahl Eisen, Germany.

Yamanaka, K. y Ohmori, Y. (1977). Effect of Boron on Transformation of Low Carbon Low Alloy Steels. Trans, ISIJ, 17, p. 92.