

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISCOS DE ARADO

María N. Delpupo¹, Graciela A. Mansilla¹

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

RESUMEN

El boro es un elemento químico, accesible, económico que se incorpora en los aceros ya que provoca una mejora en la templabilidad, brindándole mejores propiedades mecánicas. Su efecto varía según diversos factores como la microestructura inicial y los procesos de obtención primarios, que posteriormente se transformará en productos finales como los discos de arados.

El estudio de estos aceros ha sido relevante para su aplicación en la industria agropecuaria argentina donde se requieren aleaciones con resistencia al desgaste e impacto. Estas propiedades, a su vez, están relacionadas con la templabilidad de estos grados de acero que varía sustancialmente con pequeñas cantidades de boro incorporadas en la fabricación primaria. El objetivo de este trabajo es analizar la microestructura y la dureza de muestras de discos de arado de acero AISI 15B30X, conformados a partir de palanquillas y de chapa laminada. De esta manera, se podrá sentar las bases del estudio primario que permita optimizar el proceso de obtención de productos finales empleados en la industria agropecuaria para seleccionar cuál material será más conveniente para el uso final.

Palabras Clave: Acero, Boro, Desgaste, Microestructura

1. INTRODUCCIÓN

El boro es un metaloide con propiedades mecánicas útiles, que se utiliza como elemento de aleación en el acero [1]. En los aceros, es un elemento intersticial que tiene baja solubilidad en solución sólida α ($<0.003\%$) [2-4] y cuya función principal en aceros al carbono, es aumentar la dureza a partir de los tratamientos térmicos, permitiendo sustituir ciertos elementos como el níquel y el molibdeno [5]. Este incremento en la dureza se debe a que el boro retarda la nucleación de la ferrita, la cual es asociada con la facilidad de segregar a los límites del grano austenítico. La presencia de boro también incrementa el valor de otras propiedades en relación con el esfuerzo y la ductilidad [6]. Además del beneficio económico, estos aceros presentan ventajas significativas en la maquinabilidad en comparación con los aceros libres de boro, en la susceptibilidad al agrietamiento por enfriamiento rápido durante el tratamiento térmico [7-9] y en la resistencia al desgaste del material ya que permite la formación de bainita. Es por estos motivos que la adición de este elemento produce aceros con mejores características mecánicas para su uso en la industria agropecuaria [10-11].

En línea con lo expresado, en los aceros, el boro mejora su templabilidad, propiedad que se define como la facilidad con la que los aceros se pueden enfriar para formar martensita; específicamente, la velocidad crítica de enfriamiento que se necesita para formar una microestructura completamente martensítica [12]. Resultados de otros autores obtenidos sobre acero al carbono con microaleaciones de B, indican que la adición de hasta 0.00230% aumenta su rendimiento en tracción, y mejora la resistencia al impacto a 25°C. Sin embargo, deben evitarse las altas temperaturas de austenización, así como los rangos de temperatura donde pueden ocurrir ciertos precipitados de boro que fragilicen la estructura [4].

El efecto del boro en la dureza y templabilidad también depende de la cantidad de carbono en el acero, aumentando en proporción inversa al porcentaje de carbono presente, aunque es más efectivo en aceros con bajo contenido de carbono, hasta 0.25% C [13]. Elementos como manganeso y cromo producen una pérdida de su efecto de templabilidad; y la presencia de molibdeno y niobio producen una mejora por los efectos sinérgicos que presentan con el boro [14]. Por último, los límites de grano de la austenita también son importantes en la templabilidad de los aceros ya que influyen en la cinética de transformación y en la distribución del boro en los límites de grano.

En línea con lo expuesto, los aceros al carbono-boro se utilizan ampliamente como componentes en herramientas de corte y componentes agrícolas (p.ej. discos de arados), por presentar resistencia a diferentes formas de desgaste tribológico e impacto [15-16]. Estos daños son el resultado de estar sometidos a diversas condiciones variables, como la humedad y densidad de las plantas, los tipos de suelo y las condiciones ambientales en el campo; por lo tanto, conducen

a un aumento en el consumo de energía, pérdidas de producción y una disminución en la vida útil de servicio de las máquinas herramientas empleadas en los campos [17]. Por tanto, la sostenibilidad de estas máquinas es uno de los temas más importantes en la industria agropecuaria nacional [4]. El proceso de desgaste mencionado está directamente relacionado con la dureza de las piezas metálicas. Estudios realizados por otros autores evidencian que cuanto mayor es la dureza de la pieza metálica en contacto con el suelo, mayor es la cantidad de desgaste [18-19]. Por todo lo expresado, el boro se emplea en la producción de piezas de máquinas agrícolas, como los discos de arados, Figura 1a, cuyos problemas específicos se asocian a desgaste y fractura prematura en servicio en zonas agrícolas, Figura 1b. Estas fracturas se inician en la zona periférica del disco, donde está en contacto directo con el suelo y se propagan intergranularmente hacia el centro del disco. Actualmente, hay una gran cantidad de trabajos que proporcionan datos sobre el uso de boro en varios campos de la metalurgia, pero aún se encuentran escasas investigaciones en cuanto a este grado de acero, su estudio integral de aplicación en suelos y su relación con la abrasividad del suelo [20]. De esta manera, se vuelve relevante analizar estos materiales puestos en la industria agropecuaria por diversos fabricantes y en condiciones de servicio en el campo argentino.

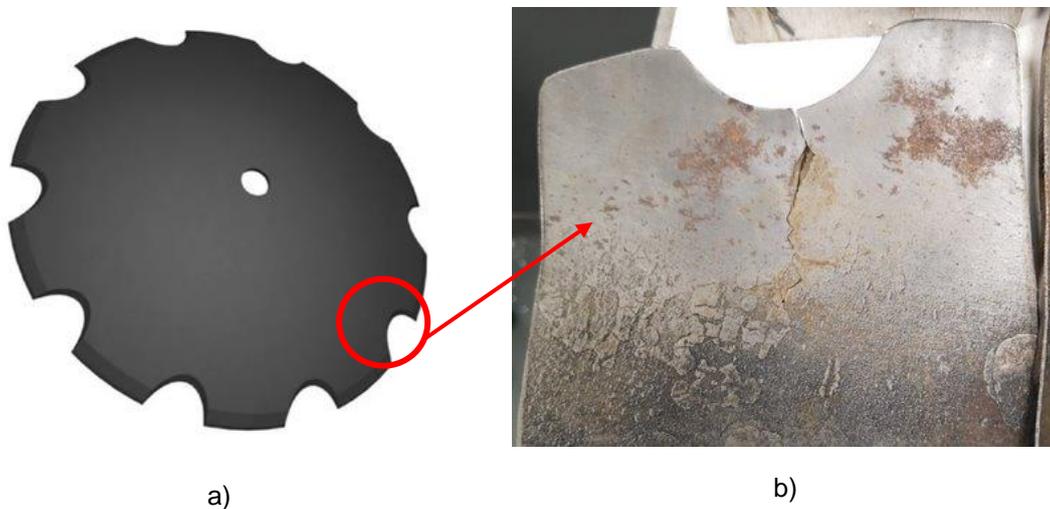


Figura 1: a) Disco de arado producido por industria argentina de 76,2 cm de diámetro, b) Parte estructural que presentó desgaste y fractura en servicio.

El objetivo de este trabajo es caracterizar muestras de discos de arado de acero al boro sin uso, (AISI 15B30X), obtenidos de dos orígenes diferentes; por un lado, discos de arado producidos a partir del conformado de palanquilla de sección cuadrada y por otro, discos obtenidos a partir de chapa laminada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las probetas se obtuvieron a partir de discos de arado de acero al boro, procedentes de dos procesos de conformado diferentes. Ambas muestras se extrajeron del borde externo de discos de arados sin uso, es decir, de la zona que está sometida a los mayores esfuerzos mecánicos y de desgaste con el suelo. Por un lado, la *Muestra P* corresponde a disco de arado fabricado a partir de una palanquilla de sección cuadrada sometidas a laminación cruzada y forja hasta obtener espesores de 45 mm, corte, estampado y finalmente tratamiento térmico de temple en aceite a 890°C y revenido a 200°C. Por otro lado, la *Muestra C* corresponde a disco de arado fabricado a partir de chapa laminada en caliente. La chapa laminada, posteriormente, es cortada, estampada y tratada térmicamente bajo las mismas condiciones que las empleadas para las palanquillas. En resumen, ambas muestras presentan los mismos tratamientos térmicos finales, diferenciándose en los procesos de conformado de cada una.

En primer lugar, se obtuvieron muestras de ambos discos de acero AISI 15B30X mediante máquina cortadora LECO. Para el análisis de microscopía óptica, se cortaron muestras longitudinales al disco de arado en cortadora a disco refrigerado LECO MC-80. Se realizó desbaste grueso sobre una pulidora de banda con el objeto de eliminar rebabas, imperfecciones de corte. 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 8 a 4 micrones en pulidora Buehler ECOMET 4 y se atacaron las muestras con Nital al 2%.

La composición química de cada disco fue medida en espectrómetro ARL 3460, según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero [%].

Muestra	C	P	S	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	V	Nb	Sn	B (ppm)	Ti
P	0,29	0,009	0,004	1,24	0,28	0,15	0,02	0,03	0,01	0,022	0,002	0,001	0,002	20	0,0043
C	0,29	0,016	0,002	1,36	0,16	0,02	0,02	0,02	0,01	0,031	0,005	0,001	0,002	25	0,027

En una segunda instancia, se analizaron las microscopías ópticas de cada muestra con microscopio OLYMPUS GX51.

Finalmente, se determinó la dureza de las muestras, realizando cuatro mediciones sobre la zona perimetral del disco de arado, zona que está mayormente expuesta al desgaste tribológico, en un equipo Rockwell Hardness Tester THRP-1500.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Analizando las composiciones químicas de ambas muestras, resultó que ambas contienen niobio y molibdeno en la misma proporción, indicando que presentarían efecto similar sobre la templabilidad en productos finales. A su vez, el cromo disminuye la templabilidad de estos aceros, y con ello la resistencia al impacto y desgaste [21].

La Muestra P correspondiente a disco de arado conformado a partir de palanquillas presenta un tamaño de grano uniforme de tipo equiaxial, con una microestructura bainítico-perlítica, Figura 2.

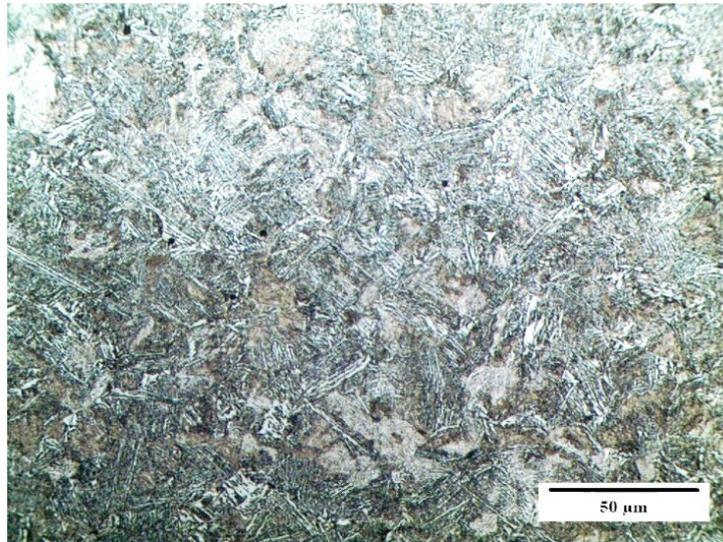


Figura 2: Microscopía óptica de Muestra P (500X)

Por su parte, la Muestra C presenta matriz ferrítico-perlítica con granos equiaxiales orientados en el sentido de la laminación, Figura 3.

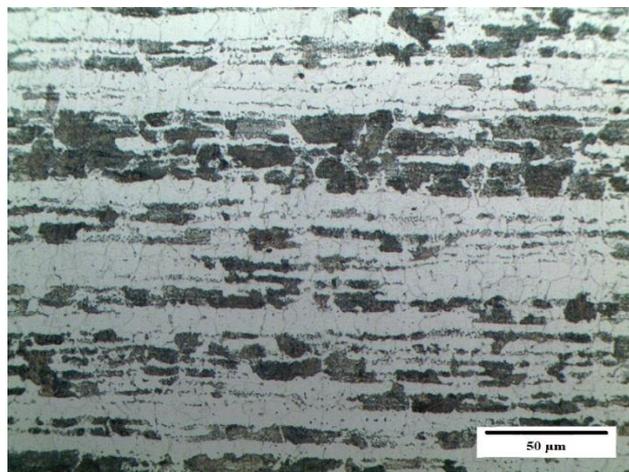


Figura 3: Microscopía óptica de Muestra C (500X)

De acuerdo con la composición química y la microestructura observada, se calculó la temperatura de inicio de transformación bainítica para cada muestra. En los aceros bainíticos las transformaciones incompletas se presentan por no seleccionar una temperatura apropiada, dado que algunos elementos de aleación retardan la formación de la bainita. Muchos autores han establecido distintas expresiones para la determinación de la temperatura a la cual inicia la transformación bainítica (B_s) dependiendo del porcentaje en peso de los elementos de aleación, así Bornat [22] estableció esta temperatura para aceros sin limitante del porcentaje en peso de carbono de acuerdo con la Ecuación (1).

$$B_s (^{\circ}C) = 844 - 597(\% C) - 63(\% Mn) - 16(\% Ni) - 78(\% Cr) \quad (1)$$

Para la Muestra P, la temperatura de comienzo de formación bainítica resultó de 580°C, mientras que para la muestra C, la temperatura es de 584°C. Considerando que el tratamiento de temple se realizó a 890° C en ambos materiales, Muestra C y Muestra P, la composición química en este caso no sería una variable de la formación bainítica de estos aceros. Ahora bien, el contenido de B es otra variable importante en la estructura final alcanzada. De acuerdo con algunos estudios realizados [23] que demuestran un retardo en la cinética de la transformación bainítica en el acero con adición de boro, para la muestra C con 25 ppm de B habría una cinética de transformación menor que la muestra P con 20 ppm de B, lo que se corresponde con la microestructura observada en cada caso. Por último, los granos equiaxiales observados en la muestra P, como producto de la laminación cruzada previa al tratamiento térmico, presentarían mejores propiedades mecánicas en servicio, en correspondencia con Lan et al [24].

La uniformidad en la microestructura de la Muestra P observada en la Figura 1, se traslada a su vez en los ensayos de dureza que arrojaron valores superiores para esta muestra respecto del disco de arado fabricado a partir de chapa laminada, Muestra C. Las mediciones de dureza en zona periférica del disco de arado, área en contacto con el suelo, los valores promedios se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Dureza de las muestras

Muestra	Dureza [HRB]	Dureza [Brinell]
P	99 ± 0,4	235 ± 0,96
C	83 ± 0,5	157 ± 1,2

En particular, la Muestra P obtenida por forja y laminación cruzada supera en 16 puntos de dureza Rockwell B (equivalente a 78 puntos de dureza Brinell) a la muestra obtenida a partir de chapa, Muestra C. A partir del requerimiento de dureza mínimo para un implemento agrícola que oscila entre 38 y 48 HRC (equivalente a 352-460 Brinell), y para áreas desérticas en las cuales

se encuentran suelos duros, se entre 50 y 60 HRC [25] (equivalente a 480-653 Brinell), los discos obtenidos a partir de palanquilla, Muestra P, serían los más adecuados por presentar durezas más cercanas al valor de referencia y esto se traduce, en que presentarían mayores energías absorbidas en ensayos de impacto [26] que permita que las piezas no se fracturen en servicio.

4. CONCLUSIONES

Ambos tipos de materiales cumplen con el rango químico correspondiente al grado 15B30X, infiriéndose que la Muestra C, obtenida a partir de chapa laminada, al presentar mayor proporción de boro de 25 ppm presentaría una cinética de transformación bainítica menor que la muestra P con 20 ppm de B, que se traduce en una menor templabilidad en servicio y resistencia al desgaste. A partir de las mediciones de dureza superiores obtenidas en el disco de arado conformado a partir de palanquillas, junto con la estructura equiaxial revelada, se infiere que este material podría presentar mayor resistencia al desgaste en servicio, es decir, en el empleo en la industria agropecuaria. Se continuará con el estudio de este grado de acero, en cuanto a su comportamiento mecánico de manera de evaluar su aplicación en cuanto a resistencia al desgaste y a la corrosión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Ing. Mauro Martín y Silvina Bertozzi por el apoyo en la realización de los ensayos experimentales.

REFERENCIAS

- [1] Habashi, F. *Boron: Physical and Chemical Properties*. Encyclopedia of Metalloproteins, 2013.
- [2] T. I. Titova, N. A. Shulgan and I. Yu. Malykhina, *Effect of Boron Microalloying on the Structure and Hardenability of Building Steel*, Metal Science and Heat Treatment, Vol. 49, No. 1-2, pp. 39-44, 2007.
- [3] M. A. Bedolla-Jacuinde, C. Maldonado and J. M. Cabrera, *Hot Ductility Behavior of a Low Carbon Advanced High Strength Steel (AHSS) Microalloyed with Boron*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, No. 13-14, pp. 4468-4474, 2011.
- [4] Saeed N., Hoda S., Mamdouh M. *Influence of Boron Additions on Mechanical Properties of Carbon Steel*. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2019.

- [5] A. Bardelcik, C. P. Salisbury, S. Winkler, M. A. Wells and M. J. Worswick, *Effect of Cooling Rate on the High Strain Rate Properties of Boron Steel*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, No. 6, pp. 694-702. doi:10.1016/j.ijimpeng.2009.05.009, 2010.
- [6] P. Lizarazo, R. Rodriguez-Baracaldo, J. Olaya, M. Sierra Cetina, I. Mejía and A. Bedolla-Jacuinde. *Evaluación del comportamiento al desgaste de los aceros bainíticos aleados con boro*. Revista Colombiana de Materiales (ISSN: 2256-1013). 5. Pp. 91-97. 2014.
- [7] V. C. Uvaraja and N. Natarajan, *Optimization of Friction and Wear Behaviour in Hybrid Metal Matrix Composites Using Taguchi Techniterials Characterization and Engineering*, Vol. 11, No. 8, pp. 757-768. 2012.
- [8] T. Senthilkumar and T. K. Ajiboye, *Effect of Heat Treatment Processes on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steel*, Journal of Minerals aals Characterization and Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 143-152, 2012.
- [9] D. A. Fa, *Heat Treatment on Mechanical Properties and Micro- structure of NST 37-2 Steel*, Journal of Minera Materials Characterization and Engineering, Vol. 10, No. 3, pp.299-308, 2011.
- [10] Manashev, I., Shatokhin, I., Ziatdinov, M., Bigeev, V. *Microalloying of Steel with Boron and the Development of Ferrotitanium Boride*. Stal, No. 10, pp. 34–38, 2009.
- [11] Parra E. C., Martínez Luévanos A. *Boron steels and applications*, CienciAcierta No. 67, ISSN: 2683-1848, 2021.
- [12] Rayan, G. *Hot Forming of Boron Steels with Tailored Mechanical Properties Experiments and Numerical Simulations*. (Tesis de posgrado). Universidad de Waterloo, Canada, 2011.
- [13] El-Shennawy, M., Farahat, A., Masoud, M., Abdel-Aziz, A. *Efect of Boron Content on Metallurgical and Mechanical Characteristic of low Carbon Steel*. International Journal of Mechanical Engineering (IJME), 2016.
- [14] Maitrepierre, Thivellier, D., Rofes-Vernis J., Rousseau, D., Tricot R. *Microstructure and Hardenability of Low Alloy Boron- Containing Steels*. Proceedings of a Symposium. Hardenability Concepts with Applications to Steel pp. 422-447, 1977.
- [15] Triani, R.M, Gomes, L.F.A, Neto, A.L et al. *Producción y Caracterización de Capas de Boruro y Carburo sobre Acero AISI 15B30*. J. de Materi Eng and Perform 29, 3534–3541, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04698-w>
- [16] Sierra H. *Propiedades mecánicas del Acero 15B30*. Revista Universidad EAFIT 124, pp 67-75, 2001.
- [17] Gamal E.M. Nasr, Z. Abdel Hamid, Mohamed Refai. *Agricultural Machinery Corrosion*, Chapter IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.108918, 2023.

- [18] Hamzaban, M.T & Rish Sefid Mohammadi, N. *Effects of the water content and grain size on soil-cutting tools interactions: implications of LCPC abrasion test*. International Journal of Mining and Geo-Engineering, 56-1, pp. 75-81. 2022.
- [19] Umit, ER. *The Abrasive Wear Behaviour of Boron Steels*, ng. & Arch. Fac.Osmangazi University, Vol. XVII, 2, 2004.
- [20] Mirmehrabi, Hossein; AU - Ghafoori, Mohammad; Lashkaripour, Gholam Reza. *Impact of some geological parameters on soil abrasiveness*. Bolletin of Engineering Geology and the Environment 75 (4), DOI: 10.1007/s10064-015-0837-3, 2015.
- [21] Maitrepierre D, Thivellier and Tricot R. *Influence of Boron on the Decomposition of Austenite in Low Carbon Alloyed Steel*. Metallurgical Transactions Vol 6^a, pp. 287-300, 1975.
- [22] R. L. Bodnar, T. Ohhashi, R. I. Jaffee. *Effects of Mn, Si, and Purity on the Design of 3.5NiCrMoV, 1CrMoV, and 2.25Cr-1Mo Bainitic Alloy Steels*, Metallurgical Transactions A, Vol 20A, pp. 1445-1460, 1989.
- [23] K. Zhu, C. Oberbillig, C. Musik, D. Loison, T. Lung. *Effect of B and B + Nb on the bainitic transformation in low carbon steels*. Materials Science and Engineering A 528, pp. 4222- 4231, 2011.
- [24] H. F. Lan, L. X. Du, R. D. K. Misra. *Effect of microstructural constituents on strength-toughness combination in a low carbon bainitic steel*. Materials Science & Engineering A 611, pp. 194–200, 2014.
- [25] Bhakat, A., Mishra, A., Mishra, N., Jha, S., *Metallurgical life cycle assessment through prediction of wear for agricultural grade steel*, Wear 257, 338 - 346, 2004.
- [26] Sierra Restrepo H. *Resistencia al desgaste vs resistencia al impacto del acero AISI 15B30, templado y revenido*. Dyna, Año 74, Nro. 153, pp. 125-133. Medellín, ISSN 0012-73, 2007.