

RESISTENCIA A LA ABRASIÓN vs. RESISTENCIA AL IMPACTO DEL ACERO AISI 15B30, TEMPLADO + REVENIDO

WEAR RESISTANCE vs. IMPACT RESISTANCE OF STEEL AISI 15B30, QUENCHED AND TEMPERED

HORACIO SIERRA RESTREPO

Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

DIANA MARCELA TOBÓN

Ingeniera Mecánica, Bonem S.A

Recibido para revisar 17 de Mayo de 2006, aceptado 26 de Septiembre de 2006, versión final 06 de junio de 2006

RESUMEN: Debido al bajo carbono de los aceros al boro, algunos fabricantes recomiendan el revenido como tratamiento opcional y otros sugieren que no es necesario. Puesto que los aceros al boro son muy utilizados en aplicaciones agrícolas donde tienen exigencias de desgaste e impacto, (p.ej. discos de arados), es, entonces, conveniente evaluar dichas propiedades del acero AISI 15B30 con temple y temple más revenido a diferentes temperaturas y contrastarlo con características del AISI 1030, obtenidas en condiciones similares. De los resultados obtenidos, se desprende que el revenido a 200°C después del temple es beneficioso ya que la energía absorbida en el ensayo de impacto es el doble de la obtenida en probetas con solo temple, conservando las propiedades de dureza y resistencia a la abrasión.

PLABRAS CLAVE: Aceros al boro, resistencia a la abrasión, energía absorbida en impacto.

ABSTRACT: Due to the low carbon of boron steels, some factories recommend the tempering as optional and others suggest that it is unnecessary. Because boron steels are widely used in agricultural applications where they are exposed to wear and impact, as in plowing discs, it is then convenient to evaluate the properties of AISI 15B30 steel quenched and tempered at different temperatures and to contrast them with those obtained on steel AISI 1030 under similar conditions. From the obtained results, it can be seen that tempering at 200°C produced twice the impact energy of the quenched sample without a decrease on resistance and hardness and a light decrease on abrasion resistance.

KEY WORDS: Boron steels, abrasion resistance, impact energy.

1. INTRODUCCION

En los años 30, el boro fue reconocido como un elemento que incrementa sustancialmente la templabilidad.

Para 1952, luego de los trabajos de Grange y Garvey y de Crafts y Lamont y otros, Grossman¹ logra establecer los siguientes efectos del boro en la templabilidad:

- a) Muy pequeñas cantidades de boro tienen un poderoso efecto en la templabilidad.
- b) La influencia en la templabilidad varía sustancialmente con el contenido de carbono.
- c) Existen otros actores que influyen en la efectividad del boro, tales como: la influencia del contenido de nitrógeno y de desoxidantes y el efecto negativo de la alta temperatura de austenización sobre el efecto del boro en la templabilidad.

Trabajos de Grossman y algunos de otros investigadores fueron esclareciendo el efecto del boro sobre la templabilidad. Así por ejemplo, Grossman estableció que 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. El boro no retarda la formación de la perlita. Más adelante, algunos mecanismos fueron propuestos para explicar el efecto del boro en la templabilidad. Uno de ellos basado en la solución del boro en la austenita y su segregación a los límites de grano durante el enfriamiento, propone que se presenta una disminución de la energía libre, lo cual que inhibe la formación de la ferrita.²

Posteriormente, en la década del 70, Maitrepierre³ 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 $\{Fe_{23} (CB)_6\}$. De igual forma, estableció que 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. Luego Sharma y Purdy⁴ demuestran que el mecanismo actuante está asociado a una disminución de la energía interfacial en dicha intercara en vez de la disminución de energía libre volumétrica propuesta por Grossman. Masakatsu⁵ afirma que este cambio de energía obedece a la precipitación de átomos de boro a los límites de grano, puestos en evidencia mediante la técnica de rastreo alfa. En consecuencia, descarta el efecto de compuestos de boro con oxígeno, nitrógeno y carbono. Sorprendentemente, no referencia los trabajos de Maitrepierre^{3, 7}, quien presenta evidencia del efecto de estos borocarburos en la transformación de la austenita, obtenida mediante microscopía electrónica de transmisión en película delgada. Esta misma observación fue hecha por Coldren⁶, quien utilizó espectroscopia electrónica Auger para identificar

los borocarburos y quien, también, encontró boro atómico, ambos en los límites de grano.

Afirma Kapadia² que en la década del 70, Grange aclaró la influencia del contenido de carbono en el efecto del boro sobre la templabilidad. Se mostró claramente como el boro tiene un efecto más marcado en los aceros de bajo carbono <0.4%. Para porcentajes superiores, el efecto del boro decrece, llegando a ser nulo entre 0.8% y 1.2% de carbono. Para porcentajes superiores a 1.2%, se presenta un decremento en la templabilidad y propuso la relación:

$F_B = 1 + 1.5 (0.9 - \%C)$ para establecer el factor de templabilidad del boro. Factor que revisó Masakatsu⁵ y que propone en términos del diámetro ideal (DI):

$F_B = 1 + 1.6/DI$, donde DI es para acero libre de boro.

De acuerdo a este autor, el contenido de carbono, al menos, hasta 0.4% tiene poco efecto en la relación propuesta. Se requiere trabajo adicional para esclarecer el efecto del carbono en contenidos mayores.

También, otros factores influyen en el efecto del boro, a saber:

a) Temperatura de austenización. Kapadia² reporta que la utilización de temperaturas de austenización entre 900 - 1095°C, produce una marcada disminución de la templabilidad de los aceros al boro, debido a una excesiva precipitación de compuestos de boro a los límites de grano y al crecimiento de los mismos. Al crecer éstos, la semicoherencia de los precipitados con la austenita desaparece y en consecuencia, favorece la formación de la ferrita. Este rasgo puede ser importante en la formación de estructuras bainíticas. El efecto es reversible y se logra calentando a una temperatura inferior a 900°C.

Repetidos calentamientos por encima de 1075°C producen el efecto conocido como “desaparición del boro”, el cual es irreversible, disminuyéndose la templabilidad.

b) Tamaño de grano austenítico. Debido a que los límites de grano de la austenita juegan el

papel más importante en la templabilidad de los aceros al boro, el tamaño de grano tiene una doble influencia en la templabilidad de aceros al boro, tanto a través de la cinética de transformación así como de la distribución del boro en los límites de grano austenítico.

El desgaste abrasivo, como fenómeno, ha sido abordado por diferentes autores^{8,9 y 10} al igual que su clasificación. Asimismo, presentan alguna información referente al desgaste abrasivo para aceros con diferentes contenidos de carbono sin reseñar el tipo de microestructura, sólo resaltando su dureza. En un estudio realizado por Arboleda et al¹¹ en aceros simples al carbono, se puso en evidencia el efecto del contenido de carbono para microestructuras de temple y revenido con diferentes durezas. De dicho estudio se desprende que para una misma dureza pero diferente contenido de carbono, la mayor resistencia a la abrasión la presenta el acero con mayor contenido de carbono debido básicamente a un mayor contenido de carburos.

En las fuentes consultadas no fue posible encontrar datos sobre el comportamiento ante la abrasión de aceros al boro con bajo contenido de carbono ni se encontró información de cómo los borocarburos pueden afectar dicha propiedad.

De otro lado, algunos autores¹² presentan alguna información sobre el comportamiento al impacto de aceros simples al carbono pero sin asociarse a la resistencia a la abrasión.

En el presente trabajo, no sólo se compara la resistencia al desgaste de un acero simple al carbono frente a uno de igual cantidad de carbono pero con boro sino que también se evaluará el comportamiento ante el impacto de ambos aceros a iguales niveles de dureza.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

En el procedimiento experimental se realizó una comparación entre el acero AISI 1030 y el AISI 15B30, en estado de temple y revenido a diferentes temperaturas. Los parámetros de comparación fueron: dureza, resistencia al impacto y resistencia al desgaste abrasivo.

2.1 Material de Ensayo y Probetas

2.1.1 Materiales de trabajo

Los materiales utilizados para la elaboración de las probetas fueron:

AISI 1030: barra de diámetro 19.05 mm (3/4") y AISI 15B30: placas de 250 x 250 mm de espesor 7 mm.

Las composiciones químicas se determinaron por análisis espectrométrico efectuado en la empresa GRUPO SIDERÚRGICO DIACO, Medellín. Éstas se encuentran resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de los aceros. (% en peso).

Table 1. Chemical composition of steel

| | Acero 1030 | Acero 15B30 |
|-----|------------|-------------|
| %C | 0.32 | 0.35 |
| %Si | 0.28 | 0.17 |
| %Mn | 0.70 | 1.46 |
| %P | 0.005 | 0.026 |
| %S | 0.005 | 0.013 |
| %Cr | 0.23 | |
| %B | | 30 ppm |

2.1.2 Probetas de ensayo

En los ensayos de desgaste abrasivo se utilizaron en ambos aceros probetas cilíndricas de 15 mm de longitud y diámetro de 6 mm.

En los ensayos de impacto se utilizaron probetas "subsize", norma ASTM E-23 con dimensiones de 55mm x 10 mm x 5mm y con entalla en U de 2 mm de profundidad penetrando sobre el ancho de 10 mm. Para la elaboración de estas probetas se tuvo en cuenta el sentido de laminación, realizando la entalla en sentido perpendicular a éste. Tanto en los ensayos de impacto como en los de desgaste se utilizaron tres probetas por punto de acuerdo a lo recomendado por Arboleda et al.¹¹ y Muñoz¹³, coincidiendo con recomendaciones de las normas ASTM E-23 y ASTM G-132, respectivamente.

2.2 Tratamientos Térmicos Realizados

2.2.1 Normalizado. Para conseguir una distribución más homogénea del carbono y aliviar en algo la segregación de los diferentes elementos aleantes del acero, todo el material de estudio se normalizó. Este normalizado se realizó para el acero 1030 a una temperatura de 970 °C por ser una barra laminada en frío y para el acero 15B30 a 925 °C por una hora de sostenimiento en todos, tal como se sugiere en la bibliografía disponible. Esto se llevó a cabo en la empresa TRATAR LTDA.

2.2.2 Austenización. Se llevó a cabo en mufla con controlador de temperatura electrónico (Tipo PID), con una temperatura máxima de 1200 °C y precisión de ± 5 °C. Para el acero 1030 la temperatura de austenización fue 925 °C y el tiempo de sostenimiento de 40 minutos, para el 15B30 la austenización fue a 900 °C con 40 minutos de sostenimiento; en atmósfera protectora para evitar la decarburación.

2.2.3 Temple. Al cumplir el tiempo de austenización, las probetas de acero 1030 fueron enfriadas en agua con agitación manual, mientras las de acero 15B30 fueron enfriadas en aceite, también con agitación manual.

2.2.4 Revenido. Después del temple las probetas fueron introducidas en el horno de revenido, una mufla similar a la usada en austenización, a temperaturas de 200, 250, 300, y 350 °C durante 1 hora, en atmósfera protectora. En la Tabla 2 se resumen todos los tratamientos térmicos.

Tabla 2. Tratamientos térmicos
Table 2. Thermal treatment

| Tratamiento térmico | Acero 1030 | Acero 15B30 |
|---------------------|--|---|
| Normalizado | T = 970 °C t = 1 hora | T = 925 °C t = 1 hora |
| Austenización | T = 925 °C t = 40 minutos | T = 900 °C t = 40 minutos |
| Temple | Agua agitada | Aceite agitado |
| Revenido | T = 25, 200, 250, 300, 350 °C. t = 1 hora agua agitada | T = 25, 200, 250, 300, 350 °C t = 1 hora aceite agitado |

2.3 Ensayo de Desgaste Abrasivo

Los ensayos de desgaste se realizaron en una máquina tipo “pin – lija” con las siguientes condiciones de trabajo, ajustándose cercanamente a lo establecido en la designación ASTM G 132 – 96¹⁴.

- Carga normal: 2kg
- Velocidad de deslizamiento: 1.4 m/s
- Deslizamiento en seco, sin lubricantes.
- Ambiente: aire de laboratorio.
- Temperatura de bulbo seco: 24°C
- Humedad relativa: 68%
- Distancia de deslizamiento: 11.83m
- Banda de grano AFS 80

El ensayo se realiza después de los tratamientos térmicos utilizando tres probetas para cada tiempo de tratamiento y se deben seguir los siguientes pasos:

- Realización de un asentamiento, que consiste en pasar la probeta por una lija ya usada en la máquina, con esto se puede dar paralelismo a las probetas y eliminar óxidos.
- Limpieza de las probetas que consiste en un lavado con agua y jabón, para después ser llevadas al limpiador ultrasónico que contiene tetracloruro de carbono, con este procedimiento las probetas se limpian de grasas, óxidos y residuos y finalmente se secan con aire caliente o frío.
- Medición del peso inicial de la probeta en una balanza electrónica con un poder de resolución de 0.0001gr.
- Ensayo de desgaste, con una banda nueva se procede a realizar este ensayo, con las condiciones ya dadas.
- Finalizado el ensayo de desgaste se repite el procedimiento de limpieza y luego se realiza la medición del peso final.

2.4 Ensayo De Impacto

Los ensayos se llevaron a cabo en una máquina de impacto tipo péndulo marca AMSLER con martillo de 15 Kg, utilizando probetas “subsize” con entalla en U y dimensiones dadas por la norma ASTM E-23¹⁵ (55mm x 10 mm x 5 mm) y

siguiendo los procedimientos establecidos por la misma.

Condiciones del ensayo

Temperatura: 24°C
 Humedad relativa: 68%
 Carga: 15 Kg.

2.5 Ensayo De Dureza

La determinación de la dureza se realizó en un durómetro Wolpert y se utilizó la escala Rockwell C en concordancia con la norma ASTM E-18¹⁶. En el ensayo se utiliza un indentador cónico de diamante. La pieza se precarga con 10 Kg. y luego se aplica una carga de 150 Kg.

3. RESULTADOS

En este numeral se presentan los resultados de los ensayos de dureza, energía de impacto y desgaste abrasivo para los aceros 1030 y 15B30 respectivamente.

3.1 Dureza

En la Figura 1 se presenta la variación de la dureza Rockwell C con respecto a la temperatura de revenido para los aceros AISI 15B30 y AISI 1030.

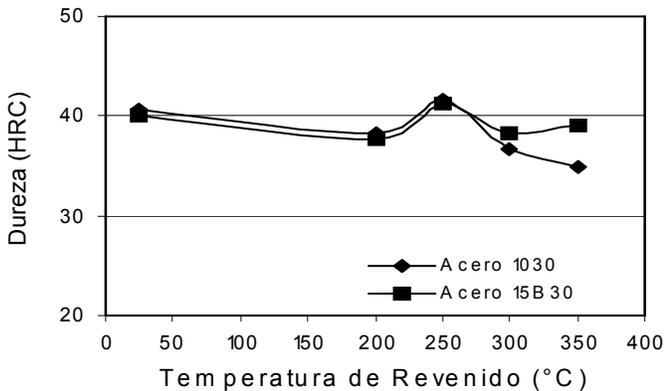


Figura 1. Dureza vs. Temperatura de revenido.
Figure 1. Hardness vs. tempering temperature

3.2 Tenacidad

Los ensayos de tenacidad, también se hicieron en forma ascendente según su temperatura de revenido. Los resultados de la tenacidad en las probetas Charpy con entalla en U, se dan en términos de la energía absorbida en Julios y son mostrados en la Figura 2.

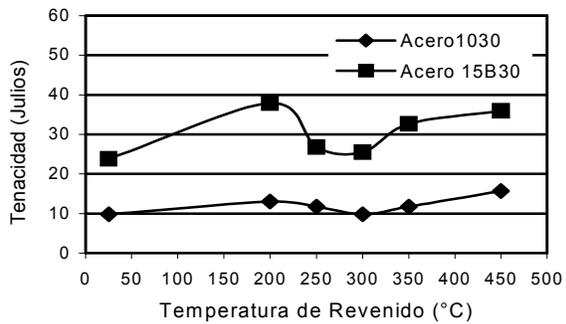


Figura 2. Tenacidad vs. Temperatura de revenido.
Figure 2. Toughness vs. tempering temperature

3.3 Desgaste Abrasivo

Los ensayos de desgaste abrasivo realizados a los aceros 1030 y 15B30, se llevaron a cabo según su temperatura de revenido, en orden ascendente. Los resultados de la resistencia al desgaste se dan en términos inversos de pérdida de peso por longitud y se muestran en la Figura 3.

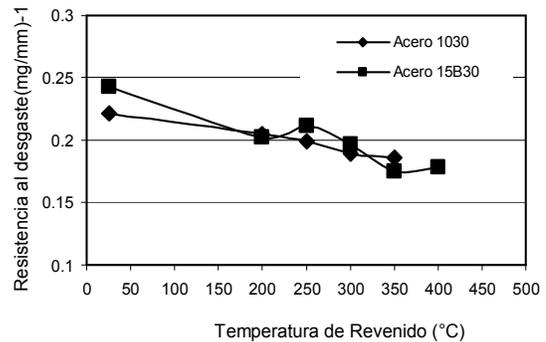


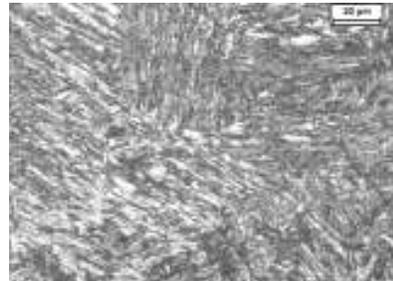
Figura 3. Resistencia al desgaste vs. temperatura de revenido.
Figure 3. Wear resistance vs. tempering temperature

3.4 Microestructuras

En la Figura 4 se presentan las microestructuras obtenidas en los aceros 1030 y 15B30 templados y templados más revenidos a 200 °C.

En la figura 5 se presentan micrografías obtenidas en un microscopio electrónico de

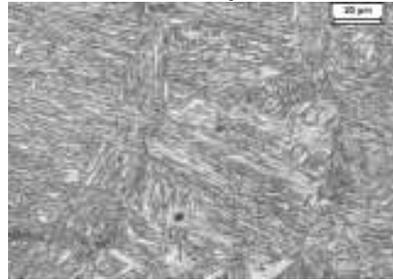
barrido, Jeol 5910LV, poniendo en evidencia las diferencias de los espesores de los listones martensíticos en los acero AISI 1030 y 15B30. Los valores que se dan entre paréntesis corresponden a la media de los espesores de los listones de martensita.



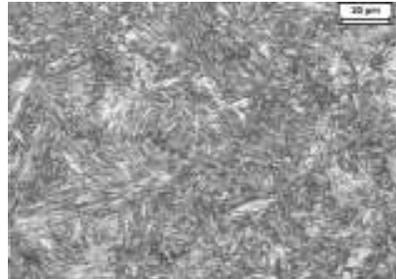
a) Acero 1030 Templado. Listones de martensita de bajo carbono.



b) Acero 1030 Templado + revenido a 200 °C.

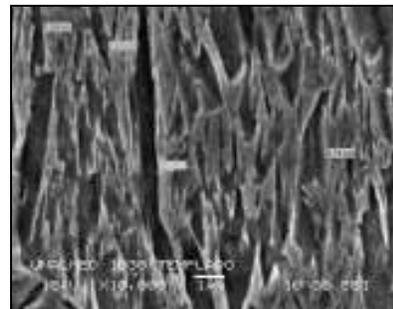


c) Acero 15B30 Templado. Listones de martensita de bajo carbono.

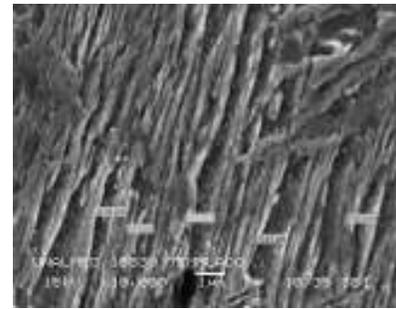


d) Acero 15B30 Templado + revenido a 200 °C.

Figura 4. Microestructuras de aceros 1030 y 15B30 templados y templados más revenidos a 200 °C
Figure 4. Microstructure of steel 1030 and 15B30 quenched and quenched and tempered at 200°C



a) Acero 1030 templado. Martensita masiva. (Espesor medio 1.1 μm).



b) Acero 15B30 templado. Martensita masiva. (Espesor medio 0.5 μm).

Figura 5. Microestructuras de aceros 1030 y 15B30 templados
Figure 5. Microstructure of steel 1030 and 15B30 quenched

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Dureza contra Temperatura de Revenido

En la figura 1 se observa alguna similitud en la forma de las curvas, con un ligero aumento de la dureza a 250°C, de 2.4% para el acero 1030 y 3.3% para el 15B30, que podría presentarse debido a una formación de carburos intertiras y a la descomposición de la austenita retenida, si existe, en bainita.

Hasta 250°C, la dureza puede considerarse uniforme. A partir de esta temperatura comienza a descender levemente.

4.2 Tenacidad contra Temperatura de Revenido

El valor más bajo para la tenacidad de los dos aceros se encuentra a 25°C, en el estado de temple. Entre 25 y 200°C se presenta un incremento en el valor de tenacidad para ambos aceros siendo éste más notorio en el acero AISI 15B30, aproximadamente 46%, mientras que para el acero AISI 1030 es de tan sólo 5%. Esto debido a la precipitación en el 15B30 de carburos épsilon más finos y homogéneos y a la disminución de las tensiones al interior de la estructura martensítica.

Entre 200 y 350°C hay una depresión en la curva debido al crecimiento de carburos intertiras y a la transformación de la austenita retenida, si la hay, siendo éste más marcado en el acero al boro.

A través de todo el rango de temperaturas de revenido estudiadas, el acero 15B30, presentó mayores valores de tenacidad que el acero 1030.

4.3 Desgaste Abrasivo Contra Temperatura De Revenido

Para ambos aceros, la máxima resistencia al desgaste se presenta a 25°C, estado de temple. Los valores de resistencia al desgaste del acero 15B30 estuvieron por encima de los reportados para el acero AISI 1030 revenido en el rango entre 25 y 300°C. Los resultados obtenidos para

ambos aceros en estado de temple, en los que se reportan valores de dureza de 40.7 y 40 HRC y una resistencia al desgaste de $0.22 \text{ (mg/mm)}^{-1}$ y $0.243 \text{ (mg/mm)}^{-1}$ para los aceros 15B30, respectivamente, se ajustan a lo reportado por Arboleda et al¹¹.

El comportamiento al desgaste abrasivo para el acero AISI 1030 y el AISI 15B30, usando un mismo abrasivo, está regido por la cantidad de carburos presentes en la microestructura, los cuales son directamente proporcionales a la cantidad de carbono de la aleación, al ser esta cantidad aproximadamente igual en los dos aceros, 0.32% para el acero 1030 y 0.35% para el 15B30, la resistencia al desgaste abrasivo es muy semejante en los dos aceros. La posible presencia de boro en los borocarburos de hierro parece que no alcanza a marcar una diferencia apreciable en este comportamiento.

4.4 Microestructura

En la Figura 4 se observa que la microestructura martensítica obtenida en el acero AISI 1030 es más basta que en el acero 15B30.

El menor espesor de los listones martensíticos del acero AISI 15B30, reportado en la Figura 5, es responsable por la mejor tenacidad de este acero, tal como se reporta en la Figura 2.

Los borocarburos de hierro presumiblemente existentes en el 15B30 no sólo favorecen la transformación martensítica sino que también afinan los listones de martensita. Adicionalmente, por estar ubicados en los límites de grano pueden contribuir al mantenimiento del tamaño de éste al impedir la difusión atómica. Este rasgo, también, contribuye a mejorar la tenacidad en relación al acero 1030. Durante el revenido, al tener listones de martensita más finos, los carburos que precipiten son más pequeños y mejor distribuidos, lo cual redundará en mayor tenacidad.

5. CONCLUSIONES

- Para los aceros AISI 1030 y AISI 15B30, la variación de la dureza es similar en el rango de temperaturas de revenido entre 25 y

- 350°C, obteniéndose en ambos durezas de 40 HRc.
- La resistencia al desgaste abrasivo es similar para ambos aceros en la prueba realizada pin-lijada, lo que indica que dicha resistencia está regida por la cantidad de carburos de hierro, los cuales dependen del porcentaje de carbono y de la dureza que en este caso son iguales para ambos aceros. El boro presente en los carburos del 15B30 parece no tener efecto en este comportamiento.
 - Los aceros al boro con bajo contenido de carbono presentan mejor tenacidad con el tratamiento de temple y revenido, posiblemente debido al refinamiento del grano y de la microestructura.
 - Los aceros al boro mejoran ostensiblemente su tenacidad con un revenido a 200°C a diferencia de los aceros libres de boro donde el aumento en la tenacidad es muy leve; contradiciendo así la indicación de algunos fabricantes de no revenir los aceros al boro por considerarlo innecesario.
 - Los borocarburos de hierro contribuyen a mejorar la tenacidad de los aceros al boro templados y revenidos a través de diferentes mecanismos: i) a las temperaturas de temple usadas mantienen el tamaño de grano, ii) producen listones más finos de martensita y iii) durante el revenido los carburos que precipitan son más pequeños y mejor distribuidos.
 - El balance de características mecánicas obtenido en los aceros al boro, los hace aptos para aplicaciones donde haya exigencia de tenacidad y resistencia al desgaste abrasivo moderado.

REFERENCIAS

[1] SIEBERT, CLARENCE A., DOANE, DOUGLAS V. and BREEN, DALE H. The Hardenability of Steels- Concepts, Metallurgical Influences and Industrial Applications. American

Society for Metals. Metals Park, Ohio, 1977, p. 218.

[2] KAPADIA, BEHRAM M. Prediction of the Boron Hardenability, Effect in Steel – A Comprehensive Review, Proceeding of Symposium “ Hardenability Concepts with Applications to Steel, p. 448-480. October 24-26, 1977.

[3] 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. February 1975.

[4] SHARMA R.C. and PURDY, G.R., Nucleation Limitation and Hardenability.. Metallurgical Transactions. Vol. 4. Pp. 2303-2311. October. 1973.

[5] UENO, MASAKATSU AND ASHAHI, HITOSHI. 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. p.p 257 - 270. Junen 3 - 6. 1991.

[6] COLDREN, A.P, JOSHI, A and STEIN, D.F. Identification of Atomic Boron in Steel by Auger Electron Spectroscopy. Metallurgical Transactions. Vol. 6a. Pp. 2304-2305. December 1975.

[7] MAITREPIERRE, THIVELLIER, D., ROFES-VERNIS J., ROUSSEAU, D., and TRICOT R. Microstructure and Hardenability of Low Alloy Boron- Containing Steels. Proceedings of a Symposium “ Hardenability Concepts with Applications to Steel pp. 422-447. October 24-26, 1977.

[8] ASM HANDBOOK: FRICTION, LUBRICATION AND WEAR TECHNOLOGY. American Society for Metals Vol 18, 4th ed. Ohio: 2004, p. 942

[9] KHRUSCHOV, M.M. Principles of Abrasive Wear. p 69-88. En: Wear No. 28 1974, Elsevier Sequoia. Lausanne Netherlands. ISBN 0043-1648.

[10] HUTCHINGS I.M. Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials. London. 1st ed. 1992. p 271.

[11] GARCÍA A, CARLOS ALBERTO, MORALES C, JORGE ALONSO Y SIERRA R. HORACIO. Relación entre el desgaste y tenacidad para algunos aceros al carbono templados y revenidos a iguales niveles de dureza. En: Revista Universidad EAFIT. Medellín. N° 117; (enero – marzo 2000); p. 59 - 67.

[12] METALS HANDBOOK: ASM/ American Society for Metals Vol 1, 9 ed. Ohio: 1978, p. 689 - 709.

[13] MUÑOZ ARANGO, LINA MARÍA. Estudio Comparativo de la Resistencia al Desgaste Abrasivo de una Fundición Nodular con Microestructuras: Bainíticas, Perlíticas y Martensíticas en la Matriz. Medellín, 2000, Trabajo de Grado (Ingeniera Mecánica). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Departamento de Ingeniería Mecánica.

[14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test Method for Pin Abrasion Testing. USA : ASTM , 1996. 8p. (ASTM G 132-96)

[15] Standard Methods for notched bar impact testing of metallic materials. USA: ASTM, 1981. 23p. (ASTM E 23-81)

[16] Standard Methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallical materials. USA: ASTM, 1981. 21p. (ASTM E 18-81)