

EVALUACIÓN TRIBOLÓGICA DE UN ACERO FUNDIDO CARBO-AUSTEMPERADO SOMETIDO AL ENSAYO DISCO-DISCO.

Sebastián Rivera^{1*}, *Oscar Ríos*², *Claudia Serna*³, *Ricardo Aristizábal*⁴

1: Estudiante de Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Grupo GIPIMME, Medellín, Colombia

2: Estudiante PhD en Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Grupo GIPIMME, Medellín, Colombia

3,4: Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Universidad de Antioquia, Grupo GIPIMME, Medellín, Colombia

* E-Mail: sebastian.riverag@udea.edu.co

RESUMEN

Los aceros carbo-austemperados, con estructura CFB (*Carbide-Free Bainite*) en la capa, se establecen como una interesante alternativa para la sustitución de aceros convencionales tratados térmicamente mediante cementación, sobre todo en aplicaciones que demanden alta estabilidad y fiabilidad frente a fenómenos de desgaste. A partir de esto, en el presente trabajo se evaluaron los mecanismos de desgaste, que sufre el acero fundido, de composición química: 0.30C-1.87Si-0.55Mn-0.92Cr (% peso), sometido a tratamiento térmico de carbo-austemperado, la superficie carburada fue hasta 0.7%C y tratadas isotérmicamente 250 °C/480 min., y 300 °C/240 min. Los ensayos tribológicos se llevaron a cabo en una máquina disco-disco, en la cual se controlan variables como: número de ciclos, porcentaje de deslizamiento, lubricación, acabado superficial y velocidad lineal. Con el fin de analizar los mecanismos de falla, se llevó a cabo el cálculo de las tasas de desgaste (norma ASTM G98-17) y el análisis microestructural de las pistas de desgaste mediante microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX). Los resultados, muestran que las capas superficiales desgastadas están formadas por estructuras de carácter nanométrico, lo que resultó en una mayor resistencia al desgaste de estos materiales, en los cuales se identificaron mecanismos de abrasión y fatiga principalmente. Además, que las tasas de desgaste disminuyeron proporcionalmente con la temperatura del tratamiento isotérmico.

Palabras clave: Carbo-austemperado, desgaste, ensayo tribológico disco-disco.

TRIBOLOGICAL EVALUATION OF A CARBO-ALLOYED CAST STEEL SUBJECTED TO THE DISC-DISC TEST

ABSTRACT

The carbo-austempered steels, with CFB (*Carbide-Free Bainite*) structure in the layer, are established as an interesting alternative for the substitution of conventional steels thermally treated by cementation, especially in applications that demand high stability and reliability against wear phenomena. From this, in the present work we evaluated the mechanisms of wear suffered by cast

steel of chemical composition: 0.30C-1.87Si-0.55Mn-0.92Cr (wt. %), subjected to carbo-austempered heat treatment, the carburized surface was up to 0.7%C and then, it treated isothermally 250 °C and 300 °C with times of 480 and 240 minutes respectively. Were tests carried out in a twin-disc machine, in which variables such as: number of cycles, sliding percentage, lubrication, surface finish and linear speed are controlled. In order to analyze the failure mechanisms, the calculation of the wear rates (ASTMG98-17 standard) and the microstructural analysis of the wear tracks were carried out by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results show that the worn surface layers are formed by nanometric structures, which resulted in a greater resistance to wear of these materials, in which mechanisms of abrasion and fatigue were identified mainly. Furthermore, wear rates decreased proportionally to the temperature of the isothermal treatment.

Keywords: Carbo-austemperado, wear, twin disk test.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros carbo-austemperados exhiben durezas aproximadas de 59 HRC, resistencias a la tensión entre 1,1GPa y 2,2 GPa, resistencia a la compresión del orden de 3 GPa, límite de cedencia cercano a 1.2GPa, y ductilidades entre 5% y 20% con resistencias a la fractura (KIC) del orden de 45-90 MPa·m^{1/2} [1–6]. Esta combinación de propiedades excepcionales hace que los aceros carbo-austemperados sean superiores a los aceros cementados, con costos de producción equiparables y tendiendo a ser más bajos, con gran potencial de aplicación en las industrias del transporte, construcción, agrícola y militar, entre otras.

El interés científico en el uso de aceros CFB en aplicaciones de desgaste ha sido limitado hasta hace muy poco. Shah et al [7] investigaron la resistencia a la erosión de dos aceros diferentes con alto contenido de silicio tratados isotérmicamente a dos tiempos de sostenimiento diferentes. Encontraron que una microestructura totalmente CFB resultó en una buena resistencia al desgaste erosivo. Las últimas investigaciones sobre la resistencia al desgaste de los aceros bainíticos libres de carburos han mostrado resultados interesantes en comparación con otros aceros templados y revenidos. En una publicación reciente de Leiro et al [2]. Se investigó el comportamiento al desgaste de un acero austemperado, aleado con Si bajo condiciones de deslizamiento en seco.

En este trabajo se evaluó la influencia de las distintas variables asociadas al rendimiento en desgaste, que sufre el acero fundido carbo-austemperado, de composición química en el núcleo: 0.30C-1.87Si-0.55Mn-0.92Cr (%P/P), desarrollado dentro de investigaciones lideradas por el grupo Gipimme de la Universidad de Antioquia, en el área de materiales metálicos, con énfasis en transformaciones de fase en estado sólido.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizó un acero fundido fabricado en un horno de inducción 50 kW, ubicado en las instalaciones del laboratorio de fundición de la Universidad de Antioquia. La composición química de la aleación se determinó mediante espectrometría de emisión óptica (EEO) en un espectrómetro Bruker Q8 Magellan. La composición química obtenida fue: Fe-0.30C-1.87Si-0.55Mn-0.92Cr (%P/P). Para minimizar la segregación química del proceso de solidificación y eliminar la microestructura as-cast, el acero fue homogeneizado a 1.150°C durante 48h en atmósfera de vacío.

Después del proceso de homogenización, el acero se cortó y mecanizó con las dimensiones estándar para un ensayo de tribológico disco-disco, en la Figura 1 se muestran las dimensiones de la probeta. Paso seguido, los especímenes se carburizaron en medio gaseoso. El proceso de carburización se realizó a una temperatura de 920 °C/240 min. Con posterior enfriamiento dentro del horno hasta temperatura ambiente. La superficie carburizada presentó 0.75% de C y la profundidad de capa fue de 1.1mm. A continuación, las muestras carburizadas se austenizaron a 830 °C durante 15 minutos, para luego proceder con el tratamiento isotérmico a 250 °C/480 min, y 300 °C/240 min. Las temperaturas de transformación isotérmica fueron seleccionadas a partir de información reportada en la literatura [6].

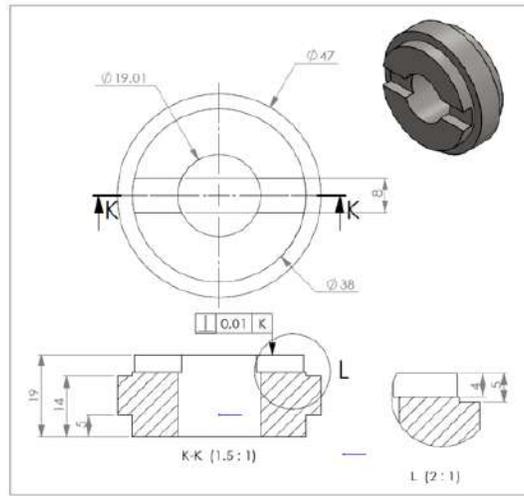


Figura 1. Dimensiones de las probetas para someterlas a ensayos en la maquina disco-disco. Medidas en milímetros.

Las pruebas tribológicas se llevaron a cabo en la máquina disco-disco instalada en el Laboratorio de Tribología y Superficies de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Las probetas se limpiaron en alcohol en un equipo de ultrasonido durante cinco minutos y luego fueron secadas. Posteriormente, se obtuvo el peso inicial de cada probeta, la rugosidad y dureza superficial. Las condiciones del ensayo tribológico se reportan en la Tabla 1, dichas condiciones se establecieron a partir de datos reportados en la literatura y ensayos de puesta a punto ejecutados previamente.

Tabla 1. Parámetros del ensayo de desgaste disco-disco

Parámetros	Valor
Numero de ciclos	50000
Velocidad Contra cuerpo	400 RPM
Velocidad de la muestra	392 RPM
Porcentaje de deslizamiento	2,0%
Max presión de contacto	1,1GPa

El número de ciclos totales fueron 50000 para cada condición de tratamiento térmico, teniendo en cuenta que a 40000 ciclos se adicionó agua por 2 minutos esto para generar una presurización de las pre-grietas. Una vez finalizado cada ensayo, las probetas se lavaron en ultrasonido, con el fin

de remover material adherido a las pistas de desgaste, luego se pesaron para cuantificar la pérdida de masa y proceder con la caracterización de las pistas de desgaste mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización microestructural

En la Figura 2 se muestran las microestructuras obtenidas para cada una de las condiciones de tratamiento térmico, estas concuerdan con microestructuras reportadas en la literatura [5]. Se determinó que la ferrita bainítica (α_b) es la fase en mayor proporción con fracciones volumétricas, V_{α_b} , que superan 0,60 y espesores de placa, t_{α_b} , que van desde 65 nm hasta 80 nm. La austenita (γ) enriquecida con carbono es la segunda fase dispersa, con sus dos morfologías distinguibles, como láminas entre las placas de α_b y bloques que separan las plumas bainíticas. De otro lado, cuando la temperatura de transformación se incrementó de 250 °C a 300 °C, la tendencia general es que tanto la fracción volumétrica como el espesor de placa austenítico, se incrementaron.

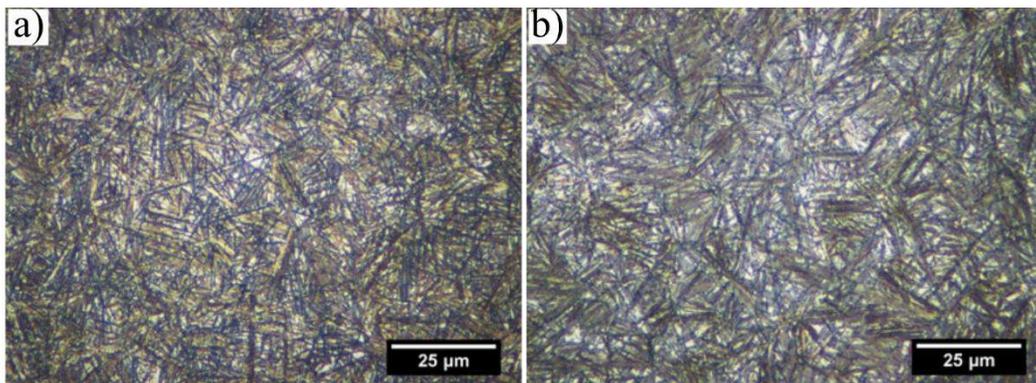


Figura 2. Carbo-austemperado, a) 250 °C por 480 min y b) 300 °C por 240 min.

3.2 Masa perdida

Para la condición 250 °C/480 min, la dureza es la más alta de los tratamientos realizados, 54 HRC. Mientras que para la condición 300 °C/240 min, se obtuvo una dureza de 48 HRC. Esta diferencia radica principalmente en el hecho de que a 250 °C se logra un mayor refinamiento de la estructura, cuando se comparan los espesores bainíticos y austeníticos. En la Figura 3 se comparan los resultados de la masa perdida para los tratamientos de 250 °C y 300 °C. La cantidad de pérdida de masa está relacionada con los ciclos y la dureza principalmente, ya que la presión de contacto y el deslizamiento siempre son fijos. Es importante tener en cuenta que la dureza inicial está estrechamente relacionada con la microestructura y con el porcentaje de austenita retenida.

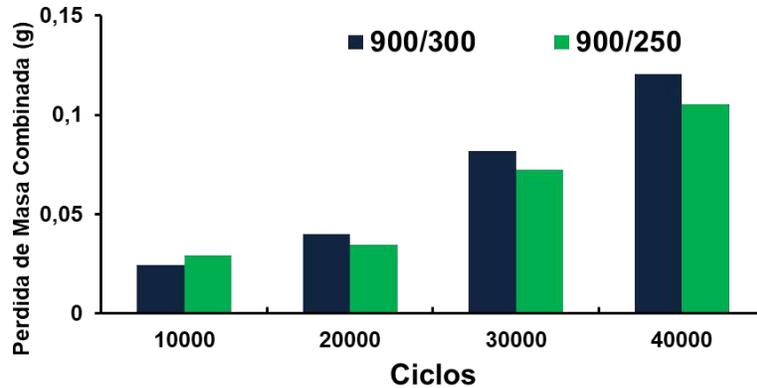


Figura 3. Masa perdida en diferentes ciclos.

Se observa de la Figura 3 que el material con tratamiento térmico de 250 °C obtuvo una menor pérdida de masa en la mayoría de ciclajes, esto debido a su alta dureza y a su menor contenido de austenita retenida. Debe resaltarse que la austenita retenida absorbe con mayor facilidad los esfuerzos generados en el ensayo. Estos resultados muestran que las probetas tienen comportamiento típico para este material, siendo la dureza y la austenita retenida los parámetros de mayor relevancia en la pérdida de masa.

3.3 Coeficiente de fricción

Los resultados de tribología muestran que la curva de coeficiente de fricción tiene dos zonas típicas para la mayoría de los ensayos en seco, la primera región es la zona de acople entre probetas y la segunda zona es el estado estable del ensayo. En la Figura 4 se observan estas dos zonas: la primera zona para 250 °C es de 0 a 10.000 ciclos mientras que para 300 °C es de 0 a 8.000 ciclos y la segunda zona para 250 °C es de 10.000 a 40.000 ciclos, mientras que para 300 °C es de 8.000 a 40.000 ciclos. Se observa también una tercera zona, la cual es común para los dos tratamientos térmicos, es de 40.000 a 43.000 ciclos que es la caída de fricción producida por la adición de agua. La duración del ensayo está muy determinada por la rugosidad inicial de la superficie de los materiales de acoplamiento, esto porque a mayor rugosidad generalmente se tardarán más tiempo en desaparecer la rugosidad generada por el mecanizado.

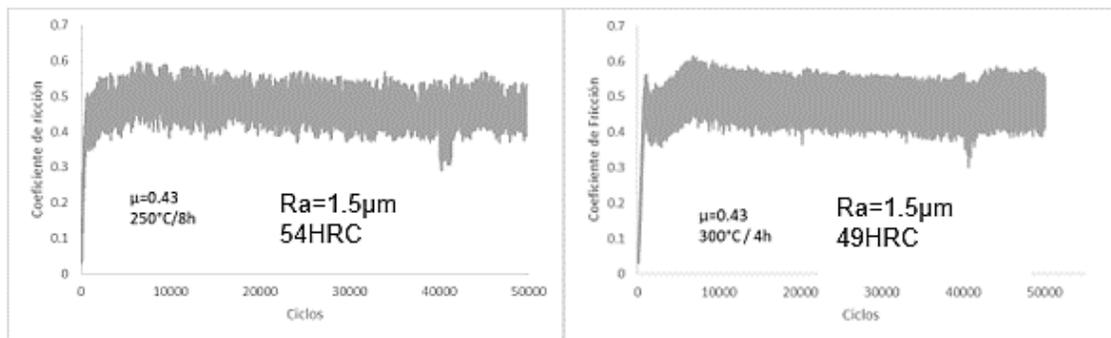


Figura 4. Coeficiente de fricción en función del ciclaje.

La diferencia en el número de ciclos en la primera zona, en la cual ocurre el acoplamiento para las dos muestras, se puede explicar a partir de la diferencia de durezas para cada condición. Así, la probeta que tiene una dureza de 54 HRC necesita un mayor número de ciclos para que se genere

un buen acomodamiento con el contra cuerpo, comparado con la probeta de 49 HRC. La zona de estabilidad es igual para las dos probetas esto debido a que la rugosidad inicial de las probetas no cambia, por lo tanto, se estabilizan a un coeficiente de fricción igual como se muestra en la Figura 4. Ya por último se puede observar la caída del coeficiente de fricción en el rango entre 40.000 - 43.000 ciclos, lo cual se da por la adición de agua, que actúa como lubricante y también ayuda a presurizar las pre-grietas formadas por la deformación plástica inducida, estas pre-grietas se pueden observar en la Figura 5.

3.4 Mecanismo de desgaste

Después de completar las pruebas de disco-disco, las superficies desgastadas fueron analizadas por SEM, y un corte transversal de la pista de desgaste se muestra en la Figura 5. Debido al contacto rodadura/deslizamiento se observa desgaste adhesivo y agrietamiento de la superficie. Los posibles daños por los cuales el material falló serían de un lado, delaminación generada por el efecto de fatiga por contacto rodante, la otra posibilidad es que el *debris* se acumula en la zona de mayor presión de contacto y como este *debris* es muy duro, genera hendiduras en el material o trabaja como un tercer cuerpo abrasivo en la superficie.

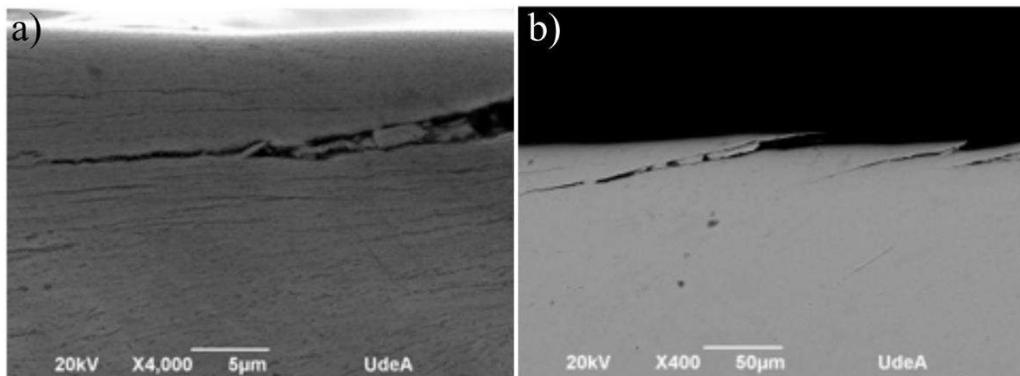


Figura 5. Micrografía SEM, a) muestra a 250 °C y b) muestra de 300 °C

En la muestra se determinó principalmente desgaste abrasivo y fatiga. La principal evidencia es el agrietamiento superficial ya que durante el ciclaje se genera una deformación plástica por la dureza de las muestras produciendo adhesión y generando sitios de concentradores de esfuerzos que más adelante serían grietas superficiales. Estos se observaron con el corte transversal de las probetas. De la Figura 5 también puede verse que las grietas se originaron en la superficie por los sitios de nucleación generados por la concentración de esfuerzos o por la aglomeración de *debris* en la superficie, la cual origina un crecimiento en la grieta al interior del material.

4. CONCLUSIONES

El trabajo realizado permitió comprender cómo la temperatura de austemperado, influye en el comportamiento tribológico de un acero carbo-austemperado. Mientras que el coeficiente de fricción de las muestras se ha encontrado que es similar, las propiedades de desgaste han mostrado diferencias para las condiciones evaluadas.

Se ha determinado para ambas condiciones de tratamiento isotérmico, 250 °C y 300 °C, diferencias en los periodos de acople y en los mecanismos de desgaste actuantes: fatiga de contacto, desgaste adhesivo y desgaste abrasivo. Los mecanismos de desgaste caracterizados en cada condición

dependen en gran medida de las características microestructurales, en especial del porcentaje de austenita retenida y el espesor de placa bainítica y austenítica, los cuales favorecen distintas respuestas mecánicas, a las condiciones del ensayo tribológico.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia por la financiación de la presente investigación a través del proyecto PRG2017-15869 y PR19-2-06. A la facultad de ingeniería por la financiación del viaje. Al laboratorio de fundición de la facultad de ingeniería por prestarnos sus instalaciones para este proyecto y por último al Grupo de Tribología y Superficies (GTS) de la Universidad Nacional sede Medellín por el préstamo del equipo de tribología disco-disco.

6. REFERENCIAS

- [1] K. Hayrynen, K. Brandenburg, and J. R. Keough, “Carbo-AustemperingTM - A new wrinkle?,” *SAE Tech. Pap.*, pp. 1–10, 2002.
- [2] A. Leiro, A. Kankanala, E. Vuorinen, and B. Prakash, “Tribological behaviour of carbide-free bainitic steel under dry rolling/sliding conditions,” *Wear*, vol. 273, no. 1, pp. 2–8, Nov. 2011.
- [3] J. Lefevre and K. Hayrynen, “Austempered materials for powertrain applications,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 22, no. 7, pp. 1914–1922, 2013.
- [4] K. Brandenburg, K. L. Hayrynen, and J. R. Keough, “Austempered Gears and Shafts: Tough Solutions,” pp. 1–14, 2001.
- [5] Y. Wang, F. Zhang, Z. Yang, B. Lv, and C. Zheng, “Rolling contact fatigue performances of carburized and high-C nanostructured bainitic steels,” *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 12, pp. 1–12, 2016.
- [6] F. C. Zhang *et al.*, “A novel method for the development of a low-temperature bainitic microstructure in the surface layer of low-carbon steel,” *Scr. Mater.*, vol. 59, no. 3, pp. 294–296, Aug. 2008.
- [7] M. Shah and S. Das Bakshi, “Three-body abrasive wear of carbide-free bainite, martensite and bainite-martensite structure of similar hardness,” *Wear*, vol. 402–403, pp. 207–215, May 2018.