

EVALUACIÓN DEL DESGASTE ADHESIVO DE RECUBRIMIENTOS METÁLICOS DUROS DEPOSITADOS POR PROCESOS DE SOLDADURA, CON UN TRIBÓMETRO DE CILINDROS CRUZADOS

J. D. VAN-STRAHLEN; S. BÁEZ P.; D. Y. PEÑA BALLESTEROS*

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Universidad Industrial de Santander

Grupo de Tribología y Superficies

*Profesor Titular, Esc. Ing. Metalúrgica y Ciencias de los Materiales
icorros@uis.edu.co, dypena@uis.edu.co

Fecha Recepción: 17 de Octubre de 2008

Fecha Aceptación: 10 de Febrero de 2009

RESUMEN

Cuando dos materiales están en contacto bajo condiciones dinámicas, el desgaste es influenciado por las propiedades físicas y las fuerzas de interacción. Estas fuerzas son difícilmente controlables; sin embargo, las propiedades físicas pueden mejorarse seleccionando adecuadamente el material para lograr un buen funcionamiento y durabilidad del sistema. Esta investigación presenta la evaluación del desgaste adhesivo de cuatro recubrimientos metálicos duros depositados por procesos de soldadura: dos aceros de baja aleación de Cr y Cr-V-Mo; y dos fundiciones blancas de Cr-Mo-V y Cr-Mo-Nb-V-W. Los ensayos se realizaron en un tribómetro de cilindros cruzados. Se determinó el perfil de desgaste y los coeficientes de fricción de cada material. Se obtuvo un coeficiente de variación máximo del 10%, indicando una buena correlación de los datos. Los coeficientes de fricción calculados se consideran acertados y los perfiles presentan las tres etapas propias del proceso de desgaste adhesivo.

Palabras claves: *Fricción, Desgaste Adhesivo, Coeficiente de Desgaste, Tribosistema, Tribómetro de Cilindros Cruzados.*

ABSTRACT

When two materials are in contact under dynamic conditions, the wear is influenced by the physical properties and the forces of interaction. These forces are difficult to control; however, the physical properties can be improved by selecting appropriate materials to ensure a smooth functioning and durability of the system. This research presents the results of adhesive wear of four hard coatings deposited by metal welding processes: two low alloy steels Cr and Cr-Mo-V and two white foundries of Cr-Mo-V and Cr-Mo-Nb-V-W. The tests were carried out in a cylinder crossed tribometer. It was determined the profile of wear and friction of each material. We obtained a variation of the friction coefficient up to 10%, indicating a good correlation of data. The friction coefficient calculated was considered accurate and the profiles showed the three stages of the wear process, which is completely adhesive.

Keywords: *Tribology, Friction, Wear, Friction Coefficient, Tribosistem.*

INTRODUCCIÓN

En la industria existen equipos que cumplen funciones específicas, donde se requiere que una o más piezas, de las que los componen, sean sometidas a condiciones extremas de

temperatura, presión, fricción y medios agresivos entre otros. Cuando dos o más elementos son puestos en contacto directo para interactuar bajo condiciones dinámicas, forman un tribosistema influenciado por las propiedades físicas de ambos y las fuerzas con las que interactúan. El sistema

tribológico incluye los triboelementos y los medios mecánicos, químicos y térmicos [1]. La Figura 1 representa el tribosistema típico.

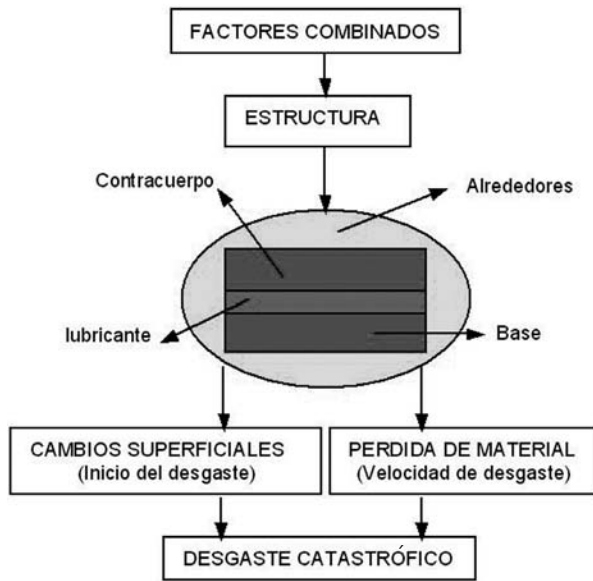


Figura 1. Tribosistema.

Interacción entre superficies

En los procesos tribológicos es esencial considerar no sólo la interacción entre sólidos, sino también la de éstos con el medio ambiente, lo cual puede variar totalmente las propiedades de las superficies. Los dos principales procesos (desgaste y fricción) que tienen lugar en la superficie de fricción ocurren bajo grandes presiones locales. Estas presiones son suficientemente grandes aún cuando la carga total en el par deslizante sea pequeña, ya que el área total de los puntos de contacto es muy pequeña; esto produce la formación de puntos de contacto que surgen de la penetración mutua de las asperezas y la formación de pequeñas soldaduras. Como la rugosidad superficial presenta diferentes niveles, al elevarse la carga, las asperezas entran en contacto sucesivo; incrementando el área real de contacto debido al aumento del número de puntos de unión [2].

Esto causa el denominado desgaste adhesivo que ocasiona directamente la formación de productos de desgaste, luego de generarse la ruptura en la base de las asperezas, producto del empalme repetitivo de las irregularidades en los cuerpos.

El proceso de desgaste puede ser descrito gráficamente, para ello se establece una

relación de la masa perdida con respecto al tiempo o de la masa perdida con respecto a la distancia deslizada [3]; para cualquiera de las dos relaciones que se establezcan, la proyección gráfica bajo condiciones normales describe tres etapas como se observa en la Figura 2.

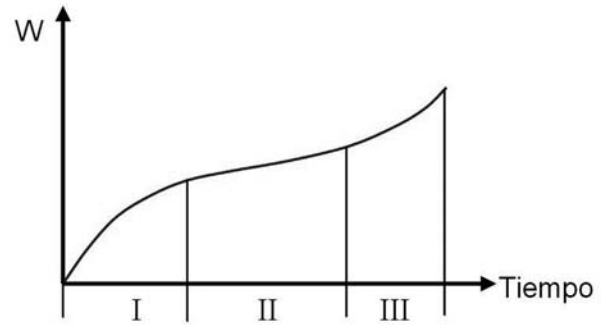


Figura 2. Masa perdida, W, en función del tiempo de operación t: I, asentamiento; II etapa de condiciones estables; III desgaste catastrófico.

Norma ASTM G 83-96

Es un método de laboratorio para medir la resistencia al desgaste de los materiales, usando un mecanismo de cilindros cruzados. Durante la prueba se produce un contacto entre un cilindro que rota y un cilindro estático. Cuando los cilindros son del mismo material, los resultados de la prueba de desgaste son reportados como una pérdida de volumen total en milímetros cúbicos y se obtiene por la adición del volumen perdido de los dos cilindros. Cuando los dos materiales son diferentes, se recomienda que cada uno sea ensayado en ambas posiciones. El método de prueba describe tres procedimientos de acuerdo a la resistencia y dureza del material. La cantidad de desgaste de cualquier sistema en general, depende de un número de factores; tales como la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el medio ambiente y las propiedades del material.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó un tribómetro de cilindros cruzados, el cual consiste de una probeta móvil y una estática, dispuestas perpendicularmente, como se observa en la Figura 3 [4].

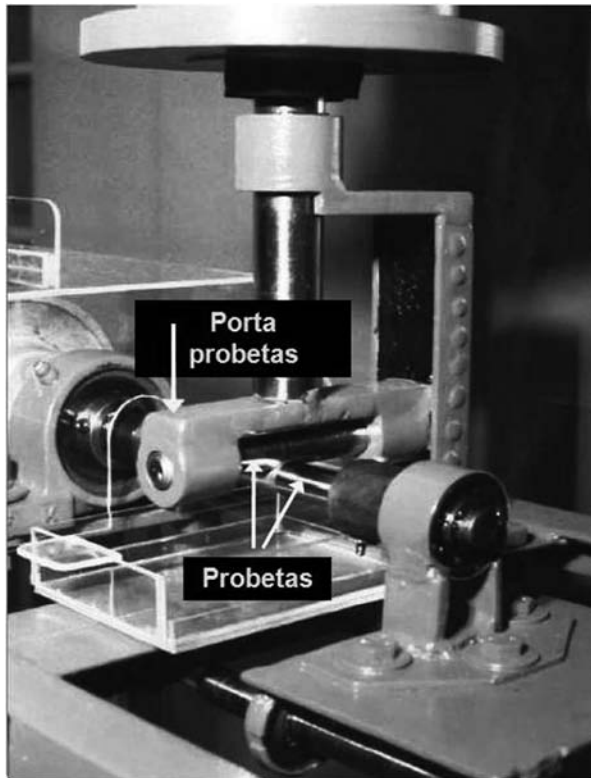


Figura 3. Tribómetro de cilindros cruzados del Grupo de Tribología.

Las probetas se fabricaron con cuatro segmentos de alambrión de $\frac{1}{4}$ " de diámetro x $4\frac{1}{2}$ " de longitud. Sobre cada uno de los tramos se depositó un recubrimiento diferente, los cuales corresponden a dos aceros de baja aleación, uno al Cr y otro al Cr-V-Mo, y dos fundiciones blancas, una al Cr-Mo-V y otra al Cr-Mo-Nb-V-W. Estos fueron aplicados por el proceso de soldadura de arco eléctrico por la compañía Electromanufacturas Muñoz. Posteriormente se maquinaron a las dimensiones establecidas y finalmente se pulieron hasta lija 1200 (SiO_2) para obtener rugosidades menores a $1.2\mu\text{m}$, como lo exige la norma ASTM G-83-96.

Para la realización de los ensayos se utilizó la máquina de cilindros cruzados construida en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS [4]; registrándose el volumen de material perdido en mm^3 . Las muestras fueron desmagnetizadas antes de pesarlás en una balanza Mettler con cuatro dígitos de precisión.

Se construyeron los perfiles de desgaste y se determinó el coeficiente de fricción, partiendo de

los procedimientos de prueba de acuerdo al tipo de material a ensayar, los cuales se recopilan en la Tabla 1. Para el acero de baja aleación en cromo se utilizó el procedimiento C, y para las otras muestras, el procedimiento A.

Tabla 1. Procedimientos de prueba obtenidos en la máquina de cilindros cruzados [6].

Procedimiento	A	B	C
Carga (kgf)	7.119	7.119	7.119
Velocidad (RPM)	442	442	110
Distancia deslizada (mm)	3191865.6	1595932.8	398983.2
Tiempo (min)	181	90.5	91

Confiabilidad de los Resultados

Según la norma, se establecen parámetros para determinar la confiabilidad de los resultados en el equipo de cilindros cruzados. En los ensayos realizados para cada material, el coeficiente de variación no deberá exceder el 15%. Si este valor es excedido, la máquina será catalogada como fuera de norma y se deberán tomar medidas correctivas para evitar los resultados erráticos. Además el coeficiente de variación no debe exceder el 30%, cuando se compara con otros laboratorios.

RESULTADOS

La Tabla 2 presenta la composición química aproximada de los recubrimientos duros utilizados en el estudio y su respectiva dureza, la cuál es útil para el cálculo del volumen de material perdido, velocidad de desgaste y coeficientes de desgaste.

Las ecuaciones empleadas para los cálculos son las siguientes:

Volumen de material perdido [5]

$$Vd = \frac{\text{Volumen perdido}}{\text{Tiempo}}$$

Velocidad de desgaste [7].

$$v = \frac{(\text{Peso inicial} - \text{Peso final})gr}{\text{Densidad (g/cm}^3\text{)}} * 100$$

Coefficiente de desgaste [5]

$$K = \frac{V * Hm}{P * S}$$

En donde:

V = Volumen de material perdido en mm³.

S = Distancia de deslizamiento en mm.

P = Carga en kilogramos.

Hm = Dureza del material en Knoop.

K = Coeficiente de desgaste.

Tabla 2. Composición química, densidad y dureza de los recubrimientos duros. Suministrada por Electromanufactura Muñoz.

Material	Composición nominal	Densidad (g/cm ³)	Dureza (Rc)
Probeta A, acero de baja aleación	0.2%C, 2%Cr	6.85	27.20 ± 1
Probeta B acero de baja aleación	0.75%C, 8%Cr, 0.5%Mo, 0.5%V	6.65	56.0 ± 0.9
Probeta C Fundición blanca aleada	4.5%C, 29%Cr, 0.7%Mo, 1.3%V	6.35	54.0 ± 1
Probeta D, Fundición blanca aleada	5%C, 23%Cr, 8.5%Mo, 1.3%V, 6%Nb, 6%w	6.55	60.2 ± 0.9

En las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos referentes al volumen de material perdido, la velocidad de desgaste y el coeficiente de fricción de las cuatro muestras. Las Figuras de la 4 a la 8 presentan los perfiles de desgaste obtenidos en los ensayos con la máquina de cilindros cruzados de los recubrimientos expuesto a la prueba.

Tabla 3. Volumen de material perdido y velocidad de desgaste.

Material	Procedimiento	Volumen perdido (mm ³)	Velocidad de desgaste (mm ³ /min)
Acero de baja aleación "A" (Cr)	C	403	4.43
Acero de baja aleación "B" (Cr, Mo y V)	A	1.65	9.11 x 10 ⁻³
Fundición Blanca "C" (Cr, Mo, V)	A	1.60	8.84 x 10 ⁻³
Fundición Blanca "D" (Cr, Mo, Nb, V, W)	A	1.74	9.61 x 10 ⁻³

Tabla 4. Coeficiente de fricción hallado para cada muestra.

Material	K	Porcentaje de variación
Acero de baja aleación "A" (Cr)	4.86 x 10 ⁻⁴	5.45%
Acero de baja aleación "B" (Cr, Mo y V)	3.28 x 10 ⁻⁵	4.45%
Fundición Blanca "C" (Cr, Mo, V)	3.06 x 10 ⁻⁵	5.12%
Fundición Blanca "D" (Cr, Mo, Nb, V, W)	3.71 x 10 ⁻⁵	10.15%

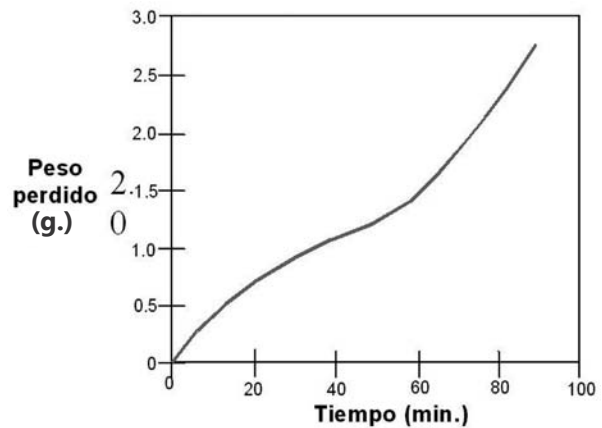


Figura 4. Perfil de desgaste del acero de baja aleación "A" al cromo, utilizando el procedimiento C.

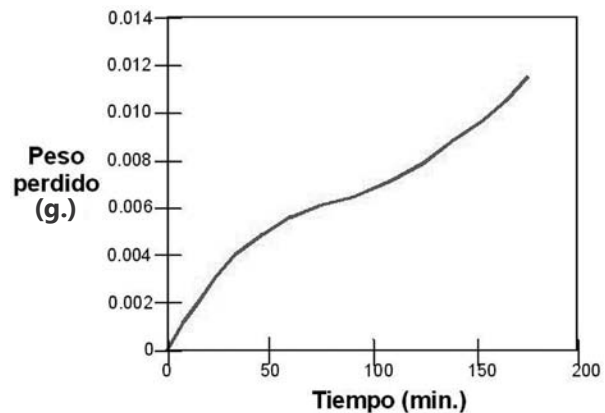


Figura 5. Perfil de desgaste del acero de baja aleación "B" al cromo, utilizando el procedimiento A.

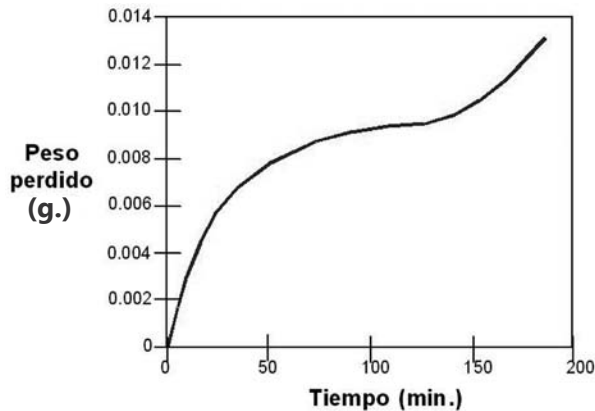


Figura 6. Perfil de desgaste de la fundición blanca "C" al cromo, utilizando el procedimiento A.

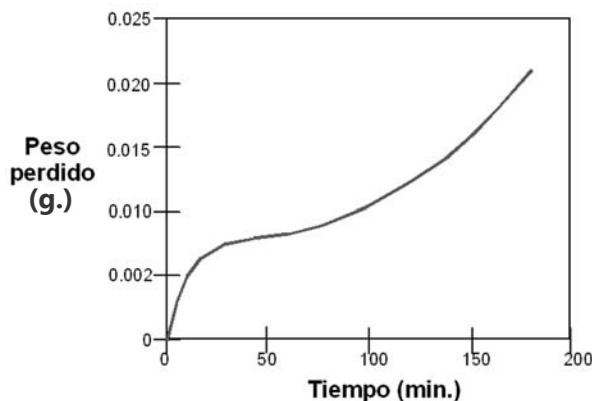


Figura 7. Perfil de desgaste de la fundición blanca "D" al cromo, utilizando el procedimiento A descrito en la Tabla 1.

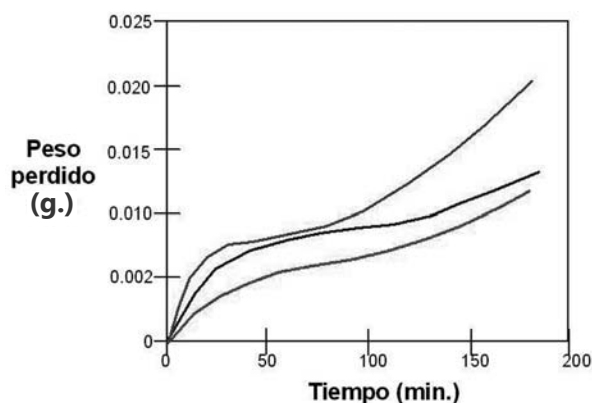


Figura 8. Perfil comparativo de los tres materiales expuestos al ensayo de desgaste: procedimiento A.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se puede observar en las figuras correspondientes a las gráficas de los perfiles de desgaste,

tanto para los dos aceros como para las dos fundiciones, que se presentan las tres etapas del proceso de desgaste.

La primera etapa de asentamiento para el acero A se extiende aproximadamente hasta el minuto treinta y cinco, como se observa en la Figura 4; sin embargo, este acero no tiene el límite de esta región muy marcado que diferencie el cambio a la segunda etapa, que podría considerarse muy corta, entre los 35 y 55 minutos. Entre estas dos etapas se produce una pérdida de peso prácticamente constante y relativamente alta. A partir del minuto 60 se logra observar el inicio de la tercera etapa, considerada catastrófica y en la cual se presenta un aumento de pérdida de peso en forma considerable con referencia a las etapas anteriores.

La cantidad de cromo que posee este acero (2%) es muy baja para formar los carburos suficientes que aporten la dureza y resistencia al desgaste, y así obtener una buena resistencia al desgaste. Esto se observa en su microestructura: Matriz ferrítica y pequeñas cantidades de carburo en proporción 98% ferrita y 2% de carburo con un tamaño de grano promedio: 6 μm .

En la Figura 5, para el acero B, se pueden distinguir claramente las tres etapas; la etapa de asentamiento se prolongó hasta el minuto 55, la segunda etapa se extiende entre los minutos 55 a 115 y la tercera etapa aparece a partir del minuto 115. Las tres etapas tienen una duración aproximadamente igual.

Este acero contiene elementos de aleación que son fuertes formadores de carburos (Cr-Mo-V) que le proporcionan una dureza relativa alta, buena resistencia al desgaste (15% Carburos, 60% Martensita y el resto ferrita), buena tenacidad, uniformidad, grano fino y buena resistencia al desgaste, cabe destacar que posee una etapa de condiciones estables relativamente corta, comparada con la de las fundiciones blancas C y D.

La Figura 6, muestra el perfil de desgaste de la fundición C; la primera etapa se prolongó hasta el minuto 50, la segunda etapa se extiende desde el minuto 50 al 130 y la etapa catastrófica se inicia a partir del minuto 130. La elevada presencia de cromo aporta gran resistencia a la corrosión y aumenta la posibilidad de formación de carburos

(Matriz de martensita y 20% carburos) también promovida por la presencia de Mo y V, es así como esta fundición posee una alta dureza, sin embargo la presencia de molibdeno no alcanza a ser lo suficientemente considerable como para prevenir la gran fragilidad de la aleación. Por este motivo la segunda etapa es más larga.

La Figura 7, muestra el perfil de desgaste de la fundición D; la etapa de asentamiento se puede observar hasta el minuto 25, la segunda etapa se extiende entre los minutos 25 a 110 y la etapa catastrófica se identifica a partir del minuto 110. La presencia de elementos tales como Cr, Mo, V, W le proporciona a la fundición una gran formación de carburos que aportan gran dureza y fragilidad (matriz con 30% de carburos), sin embargo es notorio el agrietamiento sufrido en esta fundición; No obstante es un material con buen comportamiento ante el desgaste.

La Figura 8 permite visualizar con gran facilidad que, aproximadamente, hasta el minuto 120 los recubrimientos B, C y D tienen una resistencia ante el desgaste adhesivo muy similar, debido a que la diferencia en la pérdida de peso entre ellos no es significativa. A partir de ese instante, la fundición D se aleja de este comportamiento. Esto se atribuye a la fragilidad del recubrimiento, que con el movimiento relativo hace que se desprenda material con mayor facilidad, y se produzca un fenómeno de desgaste mejorado por un tercer cuerpo.

También es posible observar que los recubrimientos C y D poseen una segunda etapa de condiciones estables; muy parecida, es decir con una pérdida de peso poco significativo, permitiéndoles una vida útil mucho más larga. El material B, aunque presenta una pérdida de peso casi constante durante todo el tiempo de prueba y sin diferenciarse claramente las tres etapas del proceso, tiene la mejor resistencia al desgaste. Esto es debido a que al aumentar el contenido de los elementos aleantes, en C y D, se aumenta la dureza y la fragilidad del recubrimiento, haciéndolo más susceptible al agrietamiento y posterior rompimiento de la capa depositada por el proceso de soldadura.

El recubrimiento A, es el material que tiene la menor resistencia al desgaste; porque, además de ser el menos duro, el contenido de elementos de aleación es mínima, y el contenido de cromo es insuficiente para la formación de una

cantidad apreciable de carburo, que le permita adquirir la dureza suficiente para disminuir la pérdida de material.

La disminución en la pérdida de material se debe a que los elementos de aleación ejercen diferentes efectos que permiten un aumento sustancial de su resistencia al desgaste. El cromo forma carburos que aumentan la resistencia de la aleación; el Niobio, en las fundiciones blancas, tiende a generar un efecto de refinación del grano; el Vanadio es un potente estabilizador de los carburos y el Molibdeno, en la fundición blanca, está distribuido entre los carburos eutécticos y la matriz, lo cual aumenta la resistencia al desgaste.

CONCLUSIONES

En los recubrimientos B, C y D se obtuvieron coeficientes de fricción muy similares, en comparación con el acero A del que se obtuvo el mayor coeficiente, esto debido a que la cantidad de material perdido fue mucho mayor en A, a causa del poco contenido de elementos de aleación que forman los carburos que aumentan su resistencia al desgaste.

Se determinó el coeficiente de fricción de los cuatro recubrimientos duros, con resultados óptimos; ya que el porcentaje de error no superó el 15%, que corresponde a lo establecido por la norma ASTM G83-96.

Se observa claramente que este método de prueba indica que para aumentar la resistencia al desgaste en una aleación, no basta con adicionar una gran cantidad de elementos aleantes, puesto que al aumentarse la dureza de manera excesiva, el material se fragiliza y pasa a ser susceptible al desgaste, como lo refleja el material D.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander, por su valioso aporte, al Ingeniero Herbert Rodríguez de Electromanufacturas Muñoz S.A., por su apoyo con el material y comentarios.

Al profesor Clemente Retamoso R. (q.e.p.d.), por su valioso aporte y colaboración al GIC y a quien siempre recordaremos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] HALLIDAY, J. S. (1957) Applications of the reflection electron microscopy to the study of wear dots. No 40.
- [2] MARTÍNEZ, F. (1997). La tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento México: Limusa, p.12-37.
- [3] CZICHOS, H. (1978) Tribology – A systems approach to the lubrication and wear, Elsevier, Amsterdam. p. 195-196.
- [4] BÁEZ, S. (2002) Evaluación del desgaste adhesivo de algunos materiales metálicos ferrosos y no ferrosos con una máquina de cilindros cruzados. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander
- [5] ASTM G-83-96, Standard test method for wear testing with a crossed -cylinder apparatus.
- [6] BÁEZ, S. Y PEÑA, D. (2004) Construcción y puesta en funcionamiento de una máquina de cilindros cruzados para la evaluación del desgaste adhesivo. En: I Conferencia Colombiana de tribología y fenómenos de superficie, DYNA, Universidad Nacional de Colombia. p. 12.
- [7] CARRILLO, J. N. Y TORRES, R. (1998) Máquina tribológica portátil para medir el desgaste adhesivo en especímenes metálicos. Universidad de Guadalajara, México. p. 83-123.