

Comportamiento frente al desgaste y fricción de aceros empleados en líneas de manutención aérea ensayados con y sin lubricación^(*)

G. Castro-Regal*, A. Fernández-Vicente* y M.A. Martínez**

Resumen Se ha evaluado el comportamiento frente a fricción y el desgaste de distintas calidades de acero ensayadas bajo condiciones de lubricación y sin lubricación. Las calidades de acero seleccionadas son las que normalmente se emplean en los sistemas de manutención aérea de numerosos procesos de producción, como la fabricación de automóviles. Se han realizado ensayos de desgaste tipo punzón-disco mediante un punzón de acero de calidad 100Cr6, empleado en los carros que circulan por las líneas de manutención aérea. Se ha observado que el valor del coeficiente de fricción obtenido bajo condiciones de lubricación es, aproximadamente, tres veces menor que el obtenido sin lubricación. Por otro lado, el mecanismo que controla el proceso de desgaste de los aceros ensayados con lubricación es un mecanismo de desgaste abrasivo y los valores de desgaste obtenidos son prácticamente despreciables. El desgaste de los aceros ensayados sin lubricación se produjo por combinación de dos mecanismos de desgaste: abrasión y adhesión.

Palabras clave Coeficiente de fricción. Lubricación. Tribómetro punzón-disco. Abrasión. Adhesión.

Comparison of sliding friction and wear behaviour of overhead conveyor steels tested under dry and lubrication conditions

Abstract The sliding friction and wear behaviour of different steel qualities were investigated with and without lubrication conditions. Steel qualities tested are normally used in the overhead conveyor system of many industrial fields, like the automotive sector. Sliding wear tests have been conducted by means of a pin-on-disk machine. A 100Cr6 steel similar to that used within the overhead conveyor trolleys has been employed as a pin. Friction coefficient values obtained under lubrication conditions were three times smaller than those obtained without lubrication. The mechanism that controls wear behaviour under lubrication conditions is an abrasive one and the wear values obtained are almost worthless. On the other hand, mechanism controlling wear during non lubrication tests, was a combination of abrasion and adhesion.

Keywords Friction coefficient. Lubrication. Pin-on-disk tribometer. Abrasion. Adhesion.

1. INTRODUCCIÓN

El desgaste de componentes o piezas de equipos es un fenómeno que afecta a todos los sectores de la industria desde hace mucho tiempo^[1 y 2]. La reposición de los componentes sujetos a desgaste ha sido un remedio aplicable en tiempos pasados. Sin embargo, las exigencias de la industria moderna requieren el desarrollo de técnicas y condiciones de

trabajo que disminuyan el desgaste de los materiales empleados, aumentando así su vida útil y reduciendo los elevados costes de reparación y mantenimiento^[3]. Un claro ejemplo, lo representan los sistemas de manutención aérea utilizados en las líneas de producción de automóviles (Fig. 1), donde la incorporación de sistemas electrónicos y nuevos elementos de seguridad en los vehículos ha generado un sensible incremento del peso de los mismos y ha

(*) Trabajo recibido el día 14 de febrero de 2005 y aceptado en su forma final el día 5 de mayo de 2005.

(*) Materials and Manufacturing Processes AIMEN, Relva 27 A- Torneiros, 36410 Porriño, Pontevedra, Spain.

(**) Materials Science and Metallurgical Engineering Department, Universidad Carlos III de Madrid, Avenida de la Universidad 30, E-28911 Leganés, Madrid, Spain.

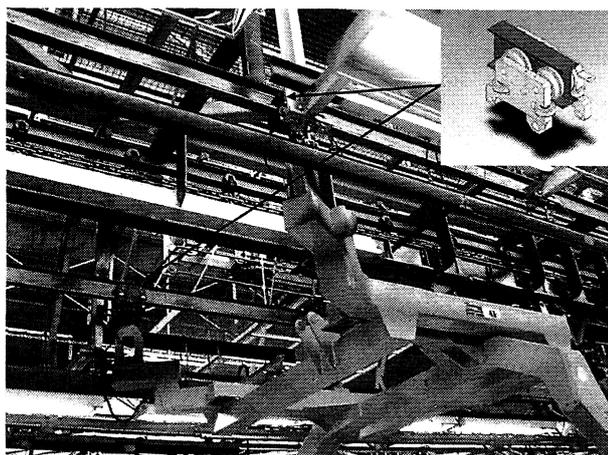


Figura 1. Imagen del sistema de mantenimiento aérea de una línea de montaje de automóviles.

Figure 1. Image of an overhead conveyor system used in the automotive industry.

propiciado que el desgaste que sufren estas líneas también haya aumentado, llegando a ser constituir un importante problema. Se ha estimado que el gasto medio por reparaciones de los tramos desgastados en una línea de mantenimiento aérea puede llegar a suponer, aproximadamente, 120.000 € anuales, sin tener en cuenta la pérdida económica derivada de los tiempos de parada necesarios para llevar a cabo las modificaciones en dichas líneas.

Numerosos factores influyen en el comportamiento frente al desgaste de los distintos materiales. Algunos, como la carga aplicada, velocidad de deslizamiento, rugosidad superficial, dureza, etc, han sido evaluados y analizados ampliamente, para determinar su influencia en los procesos de desgaste^[3-6]. Sin embargo, el efecto de la lubricación, aunque es conocido que su utilización permite reducir el desgaste de forma considerable ya que impide el contacto directo entre los materiales, no ha sido analizado^[7 y 8] con tanta profundidad.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el comportamiento frente al desgaste de varios aceros al carbono, empleados para la fabricación de los carriles que forman las líneas de mantenimiento. Así mismo, se evaluará el efecto de la utilización de un lubricante consistente. Para ello, se pretende simular a escala de laboratorio el desgaste punzón-disco (*pin-on-disk*) en condiciones equivalentes a las de trabajo industrial, utilizando como punzón que realiza el desgaste, el material que se utiliza para la fabricación de las ruedas de los carros que transportan los vehículos, y que se encuentra en contacto con los carriles de la línea de montaje.

Por otro lado, los resultados obtenidos en estos ensayos se han comparado con los realizados previamente en aceros de composición similar mediante un equipo de punzón-placa oscilante, realizados en condiciones semejantes, para confirmar que la tendencia de los resultados no depende del tipo de ensayo.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la realización de los ensayos de desgaste se emplearon cinco aceros al carbono de diferentes composiciones para la obtención de las probetas (Tabla I) de dimensiones 60 mm × 60 mm × 5 mm y un punzón de acero 100Cr6 de 6 mm de diámetro, con una dureza de 64 HRC, sujeto con una mordaza que impide su rodadura. Previamente a la realización de los ensayos, se desbastaron las probetas de acero con un papel de grano 180 y, posteriormente, junto con las bolas utilizadas como punzón, se limpiaron cuidadosamente, mediante ultrasonidos, en acetona durante 15 min. Después, se mantuvieron en una atmósfera seca para evitar la corrosión superficial.

Los ensayos de desgaste se llevaron a cabo mediante un tribómetro tipo punzón-disco durante 1 hora. La velocidad de deslizamiento utilizada fue de 0,15 m/s y la carga aplicada en el contacto 10 N. El lubricante empleado para la realización de los ensayos de desgaste con lubricación fue grasa ATL 00 que contiene aditivos de extrema presión, los cuales proporcionan una película resistente a cargas elevadas. El lubricante se aplicó de forma manual antes del inicio del ensayo.

Todos los ensayos se realizaron al menos tres veces bajo las mismas condiciones para comprobar la repetitividad de los resultados obtenidos. La dispersión de dichos resultados se encuentra dentro del rango de variación típico de este tipo de ensayos (Tablas II y III).

Tabla I. Composición química de los materiales ensayados

Table I. Chemical composition of the test specimens

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Calidad 1	0,17	0,17	0,52	0,013	0,013	0,10	0,04	0,01
Calidad 2	0,12	0,19	0,86	0,010	0,040	0,43	0,14	0,09
Calidad 3	0,20	0,25	0,99	0,009	0,031	0,11	0,10	<0,01
Calidad 4	0,49	0,16	0,65	0,011	0,028	0,04	0,05	<0,01
Calidad 5	0,55	0,20	0,70	0,015	0,0102	0,02	<0,01	<0,01

Tabla II. Valores del coeficiente de rozamiento, desgaste, coeficiente de desgaste y dureza de los aceros ensayados sin lubricación

Table II. Values of the friction coefficient, wear, wear coefficient and hardness of steel specimens tested without lubrication

Material	Coeficiente de rozamiento (μ)	Desgaste (W) (m^3/Nm) $\times 10^{-11}$	Coeficiente de desgaste (k) $\times 10^{-8}$	Dureza (HB)
Calidad 1	0,6	15,87 \pm 2,42	2,52 \pm 0,39	159
Calidad 2	0,6	15,87 \pm 1,05	2,54 \pm 0,17	160
Calidad 3	0,6	16,11 \pm 1,83	2,61 \pm 0,30	162
Calidad 4	0,6	8,66 \pm 1,15	1,78 \pm 0,24	206
Calidad 5	0,6	3,85 \pm 0,63	0,84 \pm 0,14	219

Tabla III. Valores del coeficiente de rozamiento, desgaste, coeficiente de desgaste y dureza de los aceros ensayados con lubricación

Table III. Values of the friction coefficient, wear, wear coefficient and hardness of steel specimens tested with lubrication

Material	Coeficiente de rozamiento (μ)	Desgaste (W) (m^3/Nm) $\times 10^{-11}$	Coeficiente de desgaste (k) $\times 10^{-8}$	Dureza (HB)
Calidad 1	0,2	0,72 \pm 0,20	0,11 \pm 0,03	159
Calidad 2	0,1	0,72 \pm 0,19	0,11 \pm 0,03	160
Calidad 3	0,1	0,24 \pm 0,08	0,04 \pm 0,01	162
Calidad 4	0,1	0,24 \pm 0,08	0,05 \pm 0,02	206
Calidad 5	0,1	(1)	(1)	219

(1) Pérdida de peso inferior al límite de sensibilidad de la balanza de precisión utilizada

La medida de desgaste se obtuvo, mediante una balanza de precisión, como diferencia de peso del disco antes y después del ensayo, a partir de la siguiente expresión [7 y 8]:

$$W = \Delta P / \rho F_N L$$

siendo W, el desgaste ($m^3/N.m$), ΔP , la pérdida de peso de la probeta, ρ la densidad del material ensayado (g/m^3), F_N , la fuerza normal aplicada en el contacto (N) y L, la distancia de deslizamiento total del ensayo (m).

También se determinó el coeficiente o factor de desgaste mediante la siguiente expresión [9 y 10]:

$$K = W \cdot HB$$

siendo K, el coeficiente de desgaste (adimensional) y HB, la dureza Brinell (N/m^2). Al menos, en teoría, el valor de K para cualquier material es constante y un aumento de su dureza se corresponde con una reducción del desgaste.

Por otro lado, tanto el material base como las pistas de desgaste y los punzones se analizaron mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB).

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Todos los aceros ensayados en este estudio presentaron una microestructura ferrítico-perlítica, en diferentes proporciones, similar a la que se muestra en las figuras 2a y 2b, correspondientes al estado normalizado de los aceros con 0,49 y 0,12% de carbono, respectivamente. Como era de esperar el porcentaje de perlita aumenta a medida que aumenta el contenido en carbono.

En las figuras 3a y 3b se muestran las gráficas del coeficiente de fricción frente al tiempo, correspondientes a los ensayos de desgaste realizados sin y con lubricación, respectivamente, en un acero con un contenido en carbono de 0,49%. El perfil obtenido en los ensayos realizados con el sistema punzón-disco fue similar al obtenido con el sistema punzón-placa oscilante.

En general, las curvas del coeficiente de fricción frente al tiempo de los ensayos realizados sin lubricación se puede dividir en cuatro zonas (Fig. 3a). En la zona A, se produce un aumento inicial del coeficiente de fricción hasta alcanzar un valor máximo, que, para el caso de los ensayos realizados en el presente estudio oscila entre 0,6 y 0,7.

En la zona B se produce una disminución del valor del coeficiente de fricción, hasta valores próximos a 0,4. Seguidamente, tiene lugar un nuevo aumento del coeficiente de fricción (Zona C), hasta alcanzar, en la parte final de la gráfica (Zona D), un valor prácticamente constante. En el presente trabajo, nos referiremos al valor medio del coeficiente de fricción obtenido en la zona D, de las curvas del coeficiente de fricción frente al tiempo.

La figura 3b muestra la variación del coeficiente de fricción frente al tiempo para el mismo acero que en la figura 3a, ensayado bajo condiciones de lubricación. El comportamiento del coeficiente de

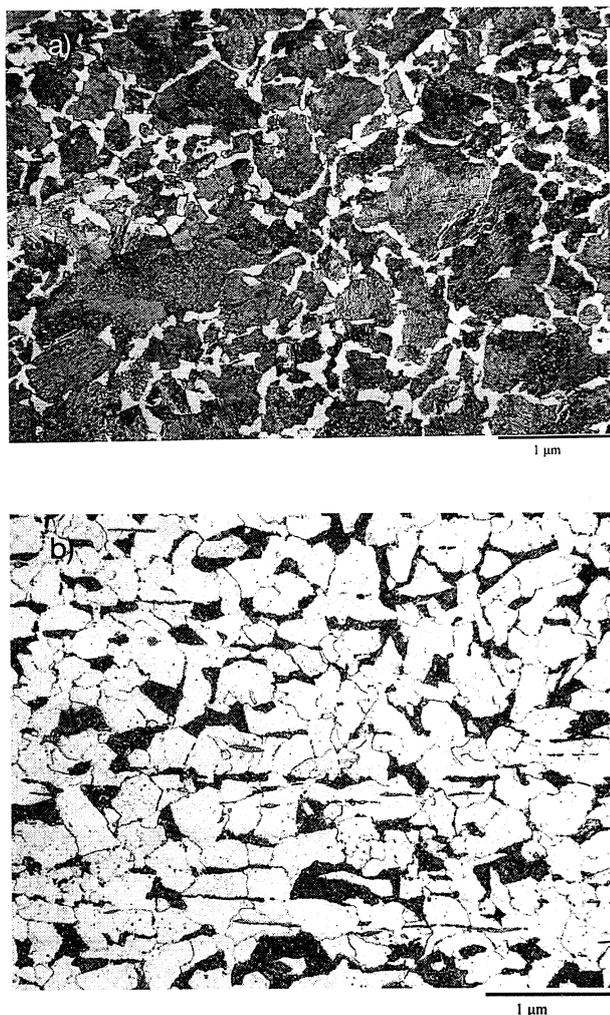


Figura 2. a) Acero con 0,49% de carbono (material 4) con estructura ferrítico-perlítica; b) Acero con 0,12% de carbono (material 2) con estructura de ferrita, algo de perlita y presencia de numerosos carburos.

Figure 2. a) 0,49% C steel (quality 4) with ferritic-perlitic microstructure; b) 0,12% C steel with ferritic structure, some perlitic regions and many carbides.

fricción fue similar en todos los ensayos realizados con lubricación. Se obtuvo una curva prácticamente constante a lo largo de todo el ensayo, con un valor medio situado entre 0,1 y 0,2.

En la tabla II se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados sin lubricación: valor medio del coeficiente de fricción, desgaste, coeficiente de desgaste y dureza. Además, se observó que la pérdida de peso del punzón es prácticamente despreciable.

En la tabla III se presentan los resultados de los ensayos realizados con lubricación. Se observa que los valores obtenidos del coeficiente de fricción medio y el desgaste son mucho menores que los obtenidos en los ensayos sin lubricación.

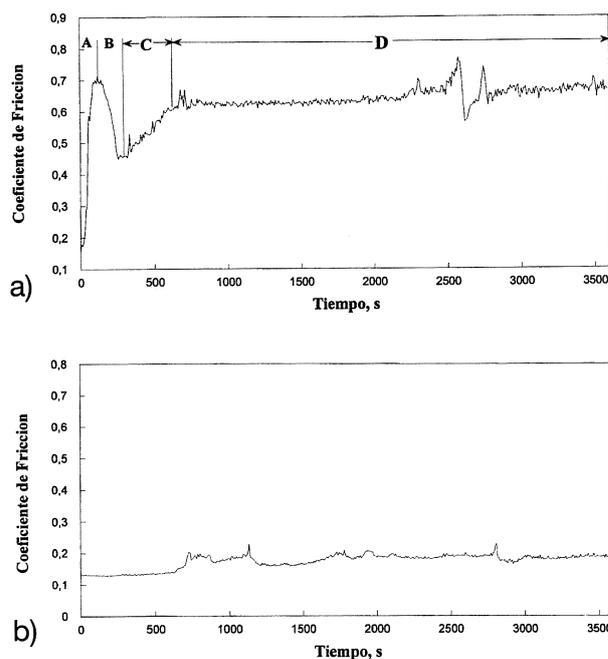


Figura 3. a) Gráfica del coeficiente de fricción frente al tiempo en un ensayo de desgaste sin lubricación sobre el acero con 0,49% de carbono; b) Gráfica del coeficiente de fricción frente al tiempo en un ensayo de desgaste con lubricación sobre el acero con 0,49% de carbono.

Figure 3. a) Plot of the friction coefficient versus time for the 0,49% C steel tested without lubrication; b) Plot of the friction coefficient versus time for the 0,49% C steel tested with lubrication.

El estudio de las morfologías superficiales generadas durante el desgaste sin lubricación, tomando como ejemplo el ensayo realizado sobre la probeta con 0,49 % de carbono, permite observar, en la superficie desgastada del punzón (Fig. 4), partículas

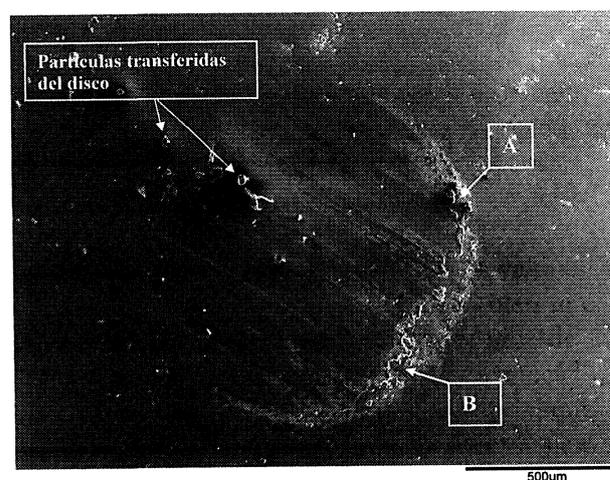


Figura 4. Desgaste producido sobre el punzón en un ensayo de desgaste sin lubricación. Se observa la presencia de material adherido procedente de la probeta.

Figure 4. Wear surface of the pin tested without lubrication. Remark the presence of adhered material on the surface.

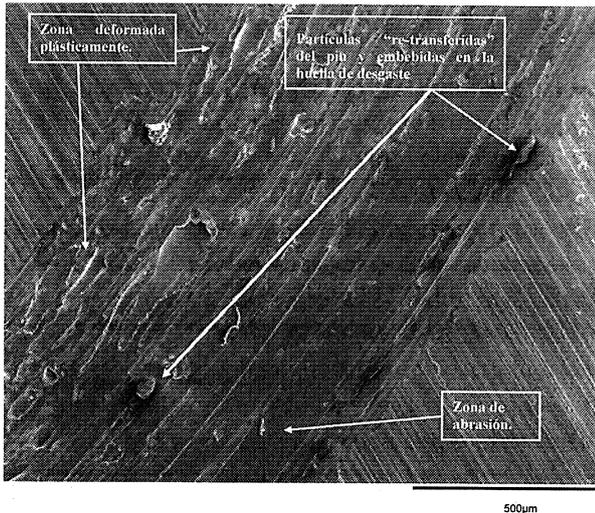


Figura 5. Superficie de la pista de desgaste en un ensayo sin lubricar.

Figure 5. Wear track in a unlubricated test.

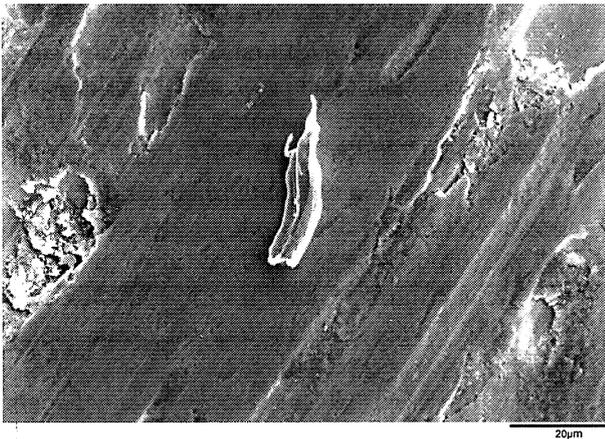


Figura 6. Partícula arrancada de la probeta en un ensayo sin lubricación.

Figure 6. Wear debris removed from the during wear test without lubrication.

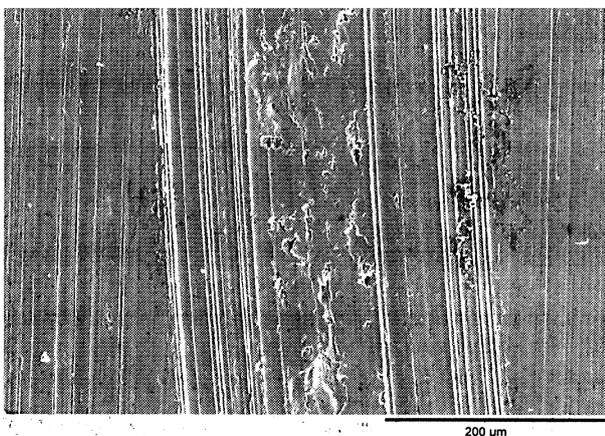


Figura 7. Superficie de la pista de desgaste en un ensayo lubricado.

Figure 7. Wear track in a lubricated test.

adheridas procedentes de la probeta. Por otro lado, en la pista de desgaste de la probeta (Fig. 5) se observan dos zonas diferenciadas: una zona externa, donde se aprecian los surcos característicos del mecanismo de desgaste por abrasión y una zona interna, donde se observa la presencia de zonas de material deformado plásticamente. En ambas zonas se encontraron partículas arrancadas durante el ensayo, como se muestra en la figura 6.

En la figura 7 se muestra la superficie de la pista de desgaste correspondiente al mismo material que se muestra en la figura 5, ensayado con lubricación. Se observa la presencia de numerosos surcos originados en los laterales de la huella como consecuencia de un mecanismo de desgaste abrasivo. Así mismo, en la zona central de la huella se observan regiones de material deformado plásticamente y regiones donde el material ha sido arrancado. En la figura 8 se muestra la superficie desgastada del punzón, en la que se observan surcos característicos de abrasión.

Por último, en la tabla IV se muestran los resultados de ensayos realizados con el tribómetro punzón-placa oscilante. Dichos resultados muestran que este método de ensayo es mucho más agresivo^[11] que el ensayo tipo punzón-disco. La diferencia en el desgaste, obtenida mediante ambos métodos, puede deberse a la variación en la tasa de evacuación de partículas. Así, en los ensayos de desgaste realizados con el tribómetro tipo punzón-disco la acción de la fuerza centrífuga facilita la evacuación de partículas de la zona de contacto entre el punzón y la probeta, mientras que en los ensayos realizados con el sistema punzón-placa oscilante las partículas desprendidas durante el ensayo se mantienen en el contacto, aumentando el desgaste.

4. DISCUSIÓN

En cuanto a los valores numéricos obtenidos con el tribómetro tipo punzón-disco (Tablas II y III), se observa que los materiales con mayor dureza presentan valores de desgaste menores, mientras que el valor del coeficiente de fricción se mantiene prácticamente constante. Esta tendencia es semejante a la observada en aceros sometidos a otros tipos de ensayo, como los realizados con el tribómetro punzón-placa oscilante (Tabla IV).

Cabe notar que existe una notable diferencia por efecto de la lubricación entre los valores obtenidos en los ensayos con y sin lubricación. El análisis de los resultados se realiza por separado para ambos casos.

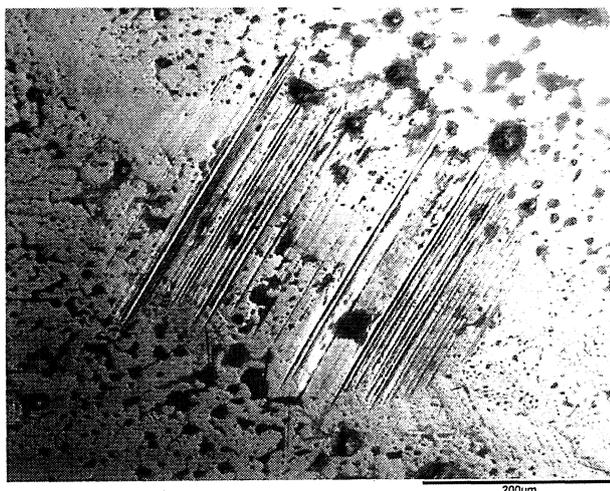


Figura 8. Superficie desgastada del punzón en un ensayo de desgaste realizado con lubricación.

Figure 8. Wear surface of the pin tested under lubrication conditions.

4.1. Ensayos de desgaste sin lubricación

De manera general, el aumento del coeficiente de fricción durante los ensayos de desgaste sin lubricación (Fig. 3a) se puede explicar teniendo en cuenta dos factores: 1) la rugosidad superficial y 2) la evolución de la naturaleza de los materiales en contacto.

En general, para un valor de carga constante, la variación del coeficiente de fricción depende del estado de rugosidad superficial^[12 y 14].

Desde el punto de vista de la naturaleza de los materiales en contacto, el comportamiento que experimenta el coeficiente de fricción hasta que alcanza la zona estable se puede explicar de la siguiente forma: durante el deslizamiento, en la zona A se desprenden un gran número de partículas,

Tabla IV. Resultados de los ensayos de desgaste punzón-placa oscilante^[9]

Table IV. Values of the wear pin oscillation plate test^[9]

%C	Coeficiente de rozamiento (μ)	Desgaste (W) (m^3/Nm) $\times 10^{-11}$	Coeficiente de desgaste (k) $\times 10^{-8}$	Dureza (HB)
0,45	0,8	344	67,08	195
0,92	1,2	200	47,80	239
1,1	0,9	83	21,9	264

que permanecen en la zona de contacto entre punzón y probeta y que conducen al aumento inicial del coeficiente de fricción. En este instante, tiene lugar el desgaste inicial de la superficie de la probeta y se crea la pista de desgaste debido a la rápida erosión de la rugosidad superficial. Además, en esta etapa, la superficie real de contacto aumenta a medida que avanza el ensayo por lo que la presión del punzón va descendiendo (la fuerza normal se mantiene constante).

En la zona B, se alcanza una situación de equilibrio en la que, únicamente, tiene lugar un proceso de erosión casi uniforme. Las partículas desprendidas se oxidan, como consecuencia del aumento de la temperatura en la zona de contacto debido a la fricción, y forman una capa de óxidos que da lugar a que el valor del coeficiente de rozamiento disminuya (zona B de la figura 3a)^[15-18]. A medida que avanza el deslizamiento, esta capa de óxidos se fragmenta y da lugar a un aumento de la superficie de contacto entre los dos materiales originales. Como consecuencia, a medida que se incrementa la distancia de deslizamiento durante el ensayo, aumenta el área real de contacto (punzón-probeta) hasta alcanzar una zona donde se mantiene estable. Dicho proceso conlleva un aumento del número de puntos en contacto entre los dos materiales, lo que conduce a un incremento de la fuerza tangencial y, por tanto, del coeficiente de fricción (zona C)^[15 y 19].

Finalmente, en la zona estable (zona D), el coeficiente de fricción permanece prácticamente constante, como consecuencia de un fenómeno continuo de destrucción y regeneración de la capa de óxidos y arranque de material de la pista.

Si los depósitos de material crecen formando cúmulos en la pista, se suele producir la adhesión del material al punzón (Fig. 4) arrancándolo de la superficie de la pista y originándose picos en los valores de la fuerza tangencial y, por tanto, del coeficiente de fricción (Fig. 3a). En algunos casos, se ha observado que parte de las partículas adheridas al punzón son “retransferidas” a la probeta y aparecen embebidas en la huella de desgaste, como se muestra en la figura 5^[18 y 20].

La diferencia de comportamiento que se observa en las dos zonas de la pista de desgaste (Fig. 5) se puede explicar teniendo en cuenta que, durante el ensayo, las partículas desprendidas se desplazan hacia la zona exterior de la pista debido a la acción de la fuerza centrífuga, dando lugar a un aumento del desgaste por abrasión en esa zona. Por el contrario, en la zona interior de la huella se produce un contacto más íntimo entre el punzón

y la probeta, debido a la ausencia de partículas desprendidas, lo que conlleva a un aumento del desgaste por un mecanismo de adhesión.

Esta diferencia de comportamiento también se observa en la superficie desgastada del punzón (Fig. 4), donde se diferencia una zona (zona A) en la que el número de partículas adheridas procedentes de la probeta es mayor y que podría corresponder con la zona interior de la pista de desgaste obtenida en la probeta.

En las figuras 9a y 9b se muestran los espectros correspondientes a los análisis cuantitativos realizados en una de las partículas encontradas en la pista de desgaste (Fig. 6) y en la superficie de la pista (Fig. 5), respectivamente, del ensayo realizado en el acero con un contenido en carbono de 0,49%, ensayado sin lubricación. En la figura 9a se observa un elevado pico de oxígeno indicativo de que la partícula analizada se corresponde con un óxido formado y posteriormente desprendido durante la realización del ensayo (zona D).

4.2. Ensayos de desgaste con lubricación

Durante los ensayos de desgaste de todos los tipos de aceros realizados con lubricación se observa que la presencia del lubricante dificulta el contacto entre la probeta y el punzón, e imposibilita el mecanismo de desgaste adhesivo, produciéndose sólo desgaste abrasivo (Fig. 7). Cabe destacar que los “surcos de abrasión” producidos en las pistas de las probetas ensayadas con lubricación son menores que los encontrados en los mismos aceros ensayados sin lubricación. Esto, se atribuye a que el tamaño de las partículas arrancadas inicialmente, es menor en el caso de los ensayos con lubricación (Figs. 6 y 10). El ancho de las pistas en ensayos con lubricación (280 μm , aproximadamente) también es menor que en los ensayos realizados sin lubricación (1mm, aproximadamente), para el mismo tipo de acero.

La presencia de picos puntuales en el valor del coeficiente de fricción durante el ensayo se atribuye a la acumulación de partículas desprendidas, que permanecen en el lubricante y se agrupan formando cúmulos o “presas” sobre la pista de desgaste, como se observa en la figura. 10. Este efecto también se observó en los ensayos sin lubricación. En el caso de los ensayos sin lubricación, el “arranque” y eliminación de las partículas resultó más fácil, debido a que el lubricante impide que las partículas se suelden a la pista. Así, en estos ensayos los picos suponen 0,05 unidades, mientras que cuando

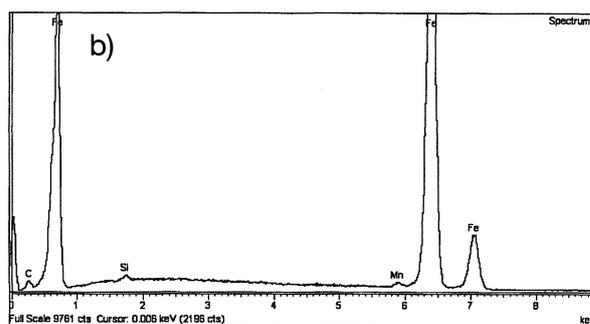
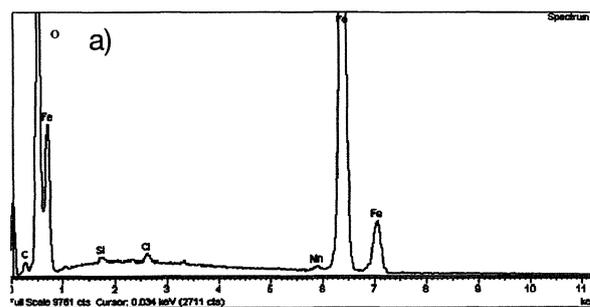


Figura 9. a) Análisis EDS de una partícula desprendida durante el ensayo de desgaste en un acero de 0,49% de carbono; b) Análisis EDS de la pista de desgaste en un acero de 0,49% de carbono.

Figure 9. a) Electron Dispersion Spectroscopy (EDS) of debris formed during wear test of 0,49% C steel; b) Electron Dispersion Spectroscopy (EDS) of wear track formed during wear test of 0,49% C steel.

no hay lubricante son de 0,2 unidades aproximadamente, lo que indica que se ha ejercido una fuerza tangencial mayor.

También, se ha observado que muchas de las partículas arrancadas durante los ensayos se mantienen en el lubricante erosionando la superficie del punzón, lo que provoca la formación de “surcos de abrasión”, como se observa en la figura 8, no detectándose partículas adheridas a la superficie.

En resumen, la utilización de lubricante permite disminuir el desgaste de los aceros empleados para la fabricación de aerovías (Tabla II) debido a: 1) la disminución del tamaño de la huella de desgaste y 2) la disminución del tamaño de las partículas desprendidas durante el ensayo.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se ha evaluado el desgaste que experimentan, en condiciones de lubricación y sin lubricación, los aceros típicamente empleados en la fabricación de carriles para líneas de manutención aérea. Para ello, se han realizado ensayos de desgaste tipo punzón-disco y se ha utilizado

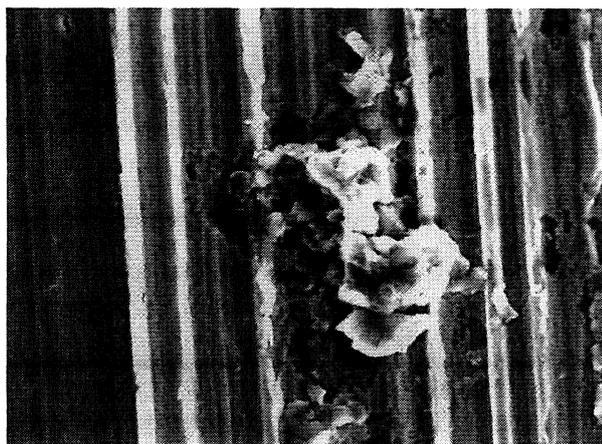


Figura 10. Partículas acumuladas durante un ensayo de desgaste con lubricación. Obsérvese que el tamaño mayor de partícula es aproximadamente 10 μm .

Figure 10. Accumulated debris during wear test with lubrication. Remark that the biggest size of accumulated debris particles is smaller than 10 μm .

un punzón de la misma calidad de acero empleada para la fabricación de las ruedas de los carros que se desplazan a lo largo de dichas líneas. Los resultados obtenidos en estos ensayos se han comparado con los resultados obtenidos en ensayos de desgaste tipo punzón-placa oscilante. Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

- El coeficiente de fricción medio obtenido en los ensayos de desgaste sin lubricación varía entre 0,6 y 0,7. Si se utiliza lubricación, este parámetro se reduce hasta 0,1 y 0,2.
- El desgaste de los aceros ensayos sin lubricación se produce mediante un mecanismo combinado de abrasión y adhesión, mientras que cuando se lubrican, el mecanismo de desgaste predominante es la abrasión.
- La tendencia del coeficiente de desgaste y del desgaste es a reducirse según aumenta la dureza de los aceros, independientemente del método de ensayo utilizado, aunque los valores numéricos en cada caso son muy diferentes.
- El desgaste de los materiales de las aerovías empleadas en las líneas de manutención aérea disminuye apreciablemente al aplicar un medio lubricante apropiado.

Agradecimientos

Trabajo financiado por la Consellería de Innovación, Industria y Comercio de Galicia a través del Proyecto PGIDIT 3DPI098E.

Agradecemos también la inestimable colaboración del personal de la factoría PSA-Vigo y del Centro de Innovación y Servicios CIS Galicia.

REFERENCIAS

- [1] P. JOST, *Dept. of Education and Science*, HMSO, London (1966).
- [2] P. JOST, *Proc. Mechanical Failures Prevention Group*, NBS Spec. Pub. 423, Gaithersburg, Maryland (1976).
- [3] A. MAMMERI, F.J. BELZUNCE, C. RODRÍGUEZ, M. TORRE, S. POVEDA y J. GARCÍA, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 107-113.
- [4] E. FLEURY, Y.C. KIM y J.S. KIM, *J. Mater. Res.*, 17 (2002) 492-501.
- [5] P.L. HURRICKS, *Wear* 26 (1973) 285-304.
- [6] G. MUÑIZ, A. CONDE, B.J. FERNÁNDEZ, R. VARELA y J. DE DAMBORENEA, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 443-451.
- [7] D.H. HWANG y K.H. ZUM GAHR, *Wear* 254 (2003) 365-375.
- [8] S. DIZDAR, *Wear* 237 (2000) 205-210.
- [9] E. RABINOWICZ, *Wear* 136 (1990) 199-206.
- [10] N.P. SUH., *Tribophysics*, Ed. Prentice Hall: Inc., EEUU (1986).
- [11] M.A. MARTÍNEZ y A. MARTÍN, *Ing. Química* 11 (1993) 81-87.
- [12] R. KUMAR, B. PRAKASH y A. SETHURAMIAH, *Wear* 252 (2002) 445-453
- [13] F. SVAHN, A. KASSMAN-RUDOLPHI y E. WALLÉN, *Wear* 254 (2003) 1092-1098.
- [14] R. TYAGI, S.K. NATH y S. RAY, *Metal. Mater. Trans. A* 33 (2002) 3.479-3.488.
- [15] W.M. RAINFORTH, A.J. LEONARD, C. PERRIN, A. BEDOLLA JACUINDE, Y. WANG, H. JONES y Q. LUO, *Tribol. Int.* 35 (2002), 731-748.
- [16] F.P. BOWDEN, *The Friction and Lubrication of Solids. Part 1, Cap V*, Ed. Clarendon Press, Oxford, 1950.
- [17] K. HIRATSUKA y M. GOTO, *Wear* 238 (2000) 70-77.
- [18] H. JENG-HANR, L. MU-LONG y L. JIAN-SHING, *Wear* 253 (2002) 899-913.
- [19] E. RABINOWICZ, *Friction and Wear of Materials*, Ed. John Wiley & Sons, Inc., U.S.A. (1995) 44-65.
- [20] M.H. STAIA, A. FRAGIEL, E. CARRASQUERO, B. CAMPILLO, S.P. BRÜHL, J.N. FEUGEAS y B.J. GÓMEZ, *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, 18, N° 3 (2003) 97-102.