

## CARACTERIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO AL DESGASTE DESLIZANTE DEL ALUMINIO 7075-T6 RECUBIERTO CON ELECTROLESS NI-P

KATHERINE SILVA, MARIANA STAIA

Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Caracas 1042-A, Venezuela.

Recibido: noviembre de 2006

Recibido en forma final revisado: junio de 2008

### RESUMEN

En el siguiente trabajo, se evalúa el comportamiento ante el desgaste deslizante sin lubricación de una aleación de aluminio 7075-T6 recubierta autocatalíticamente con «electroless» Ni-P. Las características estudiadas del recubrimiento depositado fueron morfología, espesor, variación composicional de elementos con el espesor y su microdureza. Se estudió el efecto de los recubrimientos sobre el substrato utilizando un tribómetro con una configuración bola-sobre-disco, empleando como contraparte estática bolas de 6 mm de diámetro de acero AISI 52100, con una carga normal aplicada de 5 N y una distancia de deslizamiento de 1000 m, utilizando tres velocidades de deslizamiento (0,05, 0,10 y 0,15 m/s). El mecanismo de desgaste observado para el par tribológico aluminio 7075-T6/electroless Ni-P versus acero 52100 es un mecanismo mixto, observándose que a bajas velocidades el mecanismo es gobernado por el desgaste adhesivo severo, caracterizado por una deformación plástica y transferencia del recubrimiento a la bola, y a altas velocidades aparece un mecanismo abrasivo de tres cuerpos. La tasa de desgaste de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta es menor que la de la aleación sin recubrir. Para la velocidad de deslizamiento de 0.05 m/s se encontró que el recubrimiento mejora en un 77% el comportamiento ante el desgaste con respecto a la muestra de aluminio sin recubrir. Sin embargo, para todas las condiciones de ensayadas los valores de la constante de desgaste están en el orden de  $10^{-4} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ , indicando la baja resistencia al desgaste deslizante de la aleación de aluminio con o sin recubrimiento.

*Palabras clave:* Electroless Ni-P, Aluminio 7075-T6, Desgaste deslizante.

## CHARACTERIZATION AND WEAR BEHAVIOR OF A 7075-T6 ALUMINUM ALLOY COATED WITH ELECTROLESS NI-P

### ABSTRACT

The present work evaluates the dry sliding wear performance of a 7075-T6 aluminum alloy autocatalytically coated with electroless Ni-P. Characteristics such as coating morphology, compositional variation of the coating through its thickness, as well as coating microhardness were reported. The wear tests were carried out in a tribometer, under ball-on-disc configuration, and balls of AISI 52100 steel of 6mm diameter were employed as a static counterpart. A normal load of 5N was applied for all the tests which were carried out at three different sliding velocities (0.005, 0.1 and 0.15 m/s) for 1000 m sliding distance. When the tests were conducted at low sliding velocity (0.05 m/s), a severe adhesive wear mechanism, characterized by plastic deformation and transference of the coating to the steel ball, was found for the aluminum alloy disc coated with electroless Ni-P/AISI 52100 ball tribological pair. A three body abrasive wear mechanism was present when using higher sliding velocity. It was determined that, for the lowest sliding velocity employed in this study, the wear constant value for the coated system was 77% smaller than the value corresponding to the uncoated alloy. However, for all the tested conditions, the value of the wear constant was of approximately  $10^{-4} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ , indicating that both coated and uncoated aluminum alloy presented a low tribological performance under sliding conditions.

*Keywords:* Electroless Ni-P, Aluminium alloy 7075-T6, Sliding wear.

## INTRODUCCIÓN

La aleación de aluminio 7075 es considerada como un tipo especial de la serie 7XXX ya que posee una excelente respuesta al endurecimiento por envejecimiento (Metals Handbook, 1990). Esta característica lleva a que ocupe un importante lugar en la industria aeronáutica. Las piezas fabricadas con este tipo de aleación son sometidas a exigentes estados de esfuerzo, fenómenos de fricción y desgaste, dependiendo de las condiciones de servicio a las que estén sometidas. En general, las aleaciones de aluminio presentan una desventaja debido a su baja resistencia al desgaste. Estas aleaciones tienen que ser sometidas a tratamientos superficiales o recurrir al uso de recubrimientos para asegurar el óptimo comportamiento del componente. Entre las técnicas que han sido investigadas para conferirle mayor resistencia al desgaste a estas aleaciones se encuentran el anodizado, la proyección térmica, la deposición física en fase vapor y la deposición electrolítica o química (Ashrafizadeh *et al.* 1989).

Debido a la combinación de sus propiedades ante el desgaste y su baja temperatura de deposición, los recubrimientos autocatalíticos «electroless» son considerados como una opción viable para modificar la superficie de materiales livianos incrementando su resistencia. Las investigaciones realizadas del comportamiento tribológico de los recubrimientos «electroless» Ni-P indican que tienen una alta resistencia al desgaste para aplicaciones ingenieriles, asociado a la lubricidad inherente que poseen (Parker, 1992; Keong *et al.* 2002).

Abdel *et al.* (2000) estudiaron a través de ensayos de erosión las aleaciones de aluminio-silicio con recubrimientos «electroless» Ni-P reforzado con partículas duras. Estos investigadores encontraron que los recubrimientos mejoraron en un 37 % la resistencia ante el desgaste de la aleación, evidenciando que los recubrimientos con mayor dureza exhibieron la mejor resistencia al desgaste. Cabe destacar que existe poca bibliografía relacionada al sistema aluminio 7075- recubierto por electroless Ni-P. Sin embargo, existe una amplia bibliografía sobre el uso de estos recubrimientos, las características estructurales y comportamiento tribológico sobre otros sustratos, como por ejemplo el acero (Yu *et al.* 1993; Ma *et al.* 1987; Staia *et al.* 1996; León, 2001).

El propósito de este trabajo ha sido el de determinar la composición química, estructura y morfología de un recubrimiento electroless de Ni-P (18,4% wt P), depositado sobre una aleación de aluminio 7075-T6. Se evaluó y cuantificó, mediante ensayos de desgaste deslizante, los mecanismos de desgaste, el volumen perdido de material y la constante de desgaste del sustrato y las muestras recubiertas para diferentes velocidades de deslizamiento.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este estudio se utilizaron como sustrato discos de 19,05 mm de diámetro y 5,00 mm de altura de una aleación de aluminio 7075-T6. Las muestras fueron mecanizadas, pulidas y posteriormente limpiadas por ultrasonido en acetona y alcohol. La superficie de las mismas presentan una rugosidad superficial promedio (Ra) de aproximadamente  $0,043 \pm 0,009$   $\mu\text{m}$ . El recubrimiento de Ni-P fue depositado industrialmente por un proceso autocatalítico «electroless» realizado por la empresa Reliable Plating Inc, USA. La determinación del perfil composicional a través del espesor del recubrimiento, se logró empleando la técnica de espectroscopia de masa por bombardeo de neutrones (SNMS). Un difractómetro marca Siemens D5000, con una fuente de Cu-K $\alpha$  ( $\lambda=1,5418\text{\AA}$ ), se utilizó para determinar la estructura del recubrimiento «electroless» Ni-P, desde un ángulo  $2\theta=10^\circ$  hasta  $80^\circ$ , a una velocidad de 4 grados/min. Para determinación de la microdureza del recubrimiento se empleó un microdureómetro con un indentador Knoop utilizando una carga de 0,98 N por 15 s, y el valor promedio reportado corresponde a 10 indentaciones.

El comportamiento ante el desgaste deslizante del sistema aluminio 7075-T6 recubierto con Ni-P y la del sustrato, se evaluó mediante ensayos de desgaste deslizante sin lubricación (ASTM G 99-95a), utilizando un tribómetro marca CSEM bajo la configuración bola-sobre-disco. Los ensayos se realizaron bajo condiciones ambientales constantes a una temperatura  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  y una humedad relativa de  $60 \pm 5\%$ . En las tablas 1 y 2 se muestran las condiciones experimentales utilizadas en los ensayos de desgaste y las características de la contraparte estática.

**Tabla 1.** Condiciones experimentales del ensayo de desgaste.

Velocidad de deslizamiento (m/s)	0.05 0.10 0.15
Carga normal (N)	5
Distancia de deslizamiento (m)	1000
Radio de la huella (mm)	5
Presión Hertziana de contacto (GPa)	1.04

**Tabla 2.** Características de la contraparte estática.

ACERO AISI 52100						
Composición Química (% wt)	C	Cr	Mn	Mo	Si	Ni
E (GPa)	1,04	1,47	0,36	0,04	0,25	0,13
$\nu$	250					
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	0,33					
Dureza (HRC)	7,81					
Dureza (HRC)	62					
Diámetro (mm)D-1	6					

Para la determinación de los mecanismos de desgaste de los pares tribológicos ensayados se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) con un detector de espectroscopia de rayos X por dispersión de energía (EDX) empleando tanto el modo de electrones retrodispersados (BSE) como el de electrones secundarios (SE). Además, se realizó un análisis topográfico en 3D de las huellas de desgaste haciendo uso de un perfilómetro óptico, para calcular el área transversal de la huella y obtener así el volumen desgastado. El volumen desgastado se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$V_D = A_{Th} 2\pi R_H \quad (1)$$

donde:

- $V_D$  : volumen desgastado del disco [ $\text{mm}^3$ ]
- $R_H$  : radio de la huella de desgaste en el disco
- $A_{Th}$  : área de la sección transversal de la huella

La determinación de la constante de desgaste (K) definida por Archard *et al.* (1956) como la probabilidad de que en cada encuentro entre las asperezas se produzca una partícula de desgaste «debris», se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{V_D}{DL} \quad (2)$$

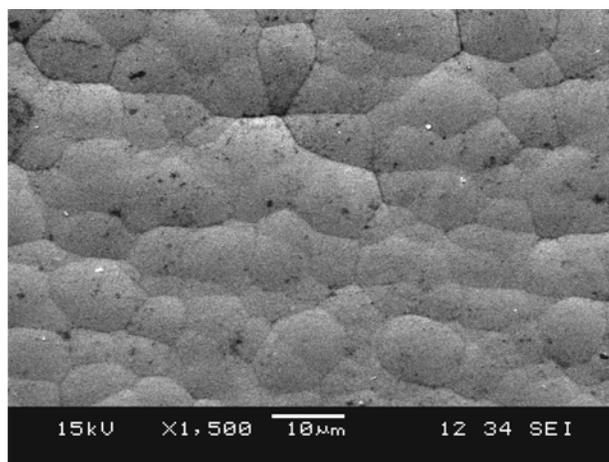
donde:

- K : constante de desgaste [ $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ ]
- $V_D$  : volumen desgastado del disco [ $\text{mm}^3$ ]
- D : distancia de deslizamiento [m]
- S : Carga normal del ensayo [N]

## RESULTADOS

### Caracterización del recubrimiento

En la figura 1 se muestra una fotomicrografía obtenida por MEB de la morfología del recubrimiento «electroless» Ni-P en el modo de electrones secundarios. Se observa que la superficie del recubrimiento se caracteriza por presentar una morfología de montañas redondeadas muy suaves, con un tamaño promedio de los nódulos que varía entre 5 a 8  $\mu\text{m}$  sin la presencia de hendiduras o poros. Estas características morfológicas son muy favorables por proveer al recubrimiento una buena resistencia a la corrosión, corroborándose con los resultados reportados en la literatura para depósitos de este tipo con alto contenido de fósforo (Riedel, 1991).



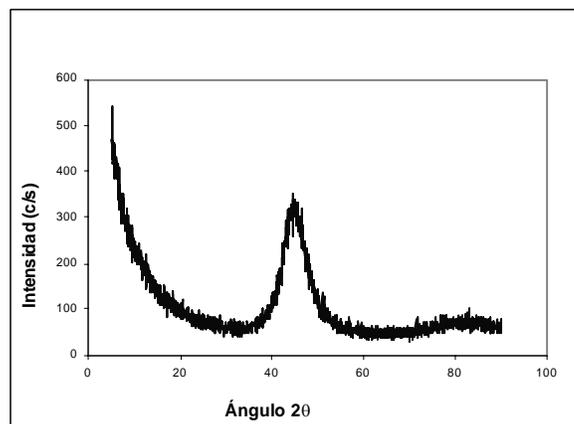
**Figura 1.** Fotomicrografía por MEB (SE) de la morfología del recubrimiento.

En la tabla 3 se presentan las características del recubrimiento estudiado.

**Tabla 3.** Características del recubrimiento electroless Ni-P.

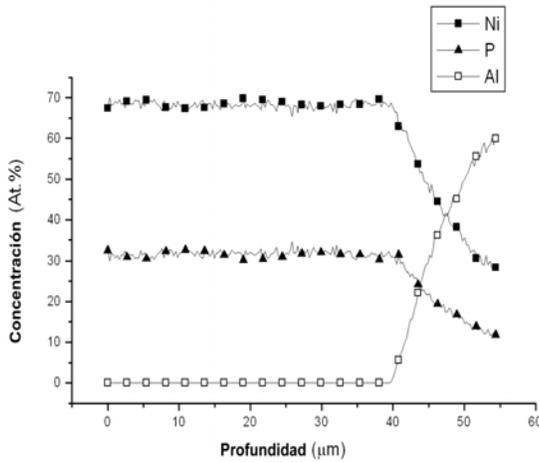
Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Dureza ( $HK$ ) <sub>100</sub>	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )
$40,90 \pm 1,10$	$454 \pm 11$	$0,12 \pm 0,02$

En la figura 2 se muestra el patrón de difracción de rayos-X de las muestras recubiertas. Como se puede apreciar en el patrón de difracción, existe un amplio pico entre los valores de  $2\theta$  de  $40^\circ$  y  $50^\circ$ , el cual es característico de los recubrimientos amorfos (Martyak *et al.* 1993; Song *et al.* 2002). Este tipo de estructura se debe al alto contenido de fósforo presente en el recubrimiento, debido a que es menos probable la formación de compuestos intermetálicos o fases de níquel microcristalinas por efecto de la acumulación progresiva de átomos de fósforo, sobre la superficie del recubrimiento previamente depositado (Martyak *et al.* 1993).



**Figura 2.** Patrón de difracción de rayos X de las muestras recubiertas con electroless Ni-P.

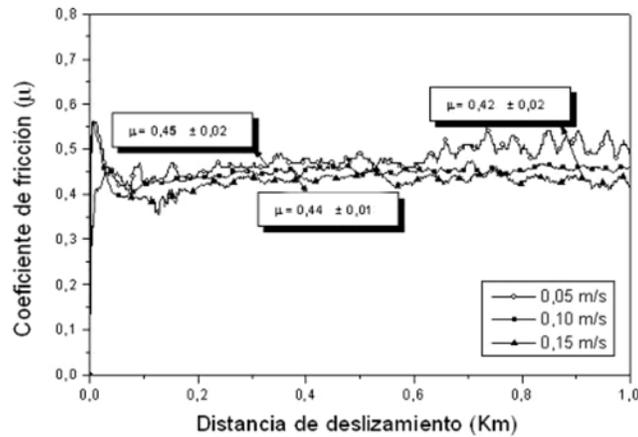
En el perfil composicional de la sección transversal del recubrimiento que se presenta en la figura 3, el contenido aproximado de fósforo es de 30 % atómico, lo cual corresponde a 18,4 % (peso), y el contenido de níquel a lo largo del espesor del recubrimiento es constante con un valor de 70% atómico, correspondiente 81,6 % (peso) permaneciendo constante a través de todo el espesor del recubrimiento (~ 40  $\mu\text{m}$ ). Estos resultados indican, que hubo un buen control del pH durante el proceso de deposición, siendo una de las variables que mas afecta la composición de estos depósitos (Riedel, 1991; Martyak *et al.* 1993; Song *et al.* 2002).



**Figura 3.** Perfil composicional de la sección transversal del recubrimiento.

### Ensayos de desgaste deslizante

En las figuras 4a y 4b se presentan la evolución del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de



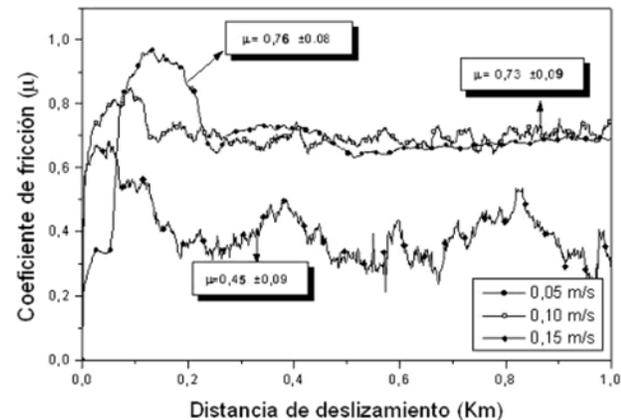
a)

deslizamiento para las tres velocidades utilizadas (0,05, 0,10 y 0,15 m/s), para el sustrato y las muestras recubiertas, respectivamente. Los resultados obtenidos de estos ensayos se resumen en la tabla 4.

La figura 4a corresponde al sustrato evaluado a diferentes velocidades. En los primeros metros de la distancia de deslizamiento se observa un aumento del coeficiente de fricción, debido a que entre las dos superficies en contacto ocurre un proceso de microsoldadura instantánea de las asperezas, de acuerdo a lo reportado en la literatura para este par tribológico (Alpas *et al.* 1993).

Posteriormente, en la medida que aumentan los ciclos, las asperezas que están en contacto se deforman provocando un aumento en el área de contacto entre ellas, permitiendo al mismo tiempo que otras asperezas entren en contacto, produciéndose un desgaste tipo adhesivo con transferencia del sustrato al acero (Guilemany, 1998). De manera general todas las curvas tienen inicialmente la misma tendencia con una posterior estabilización del coeficiente de fricción entre valores de 0,4-0,5. De acuerdo con estos resultados, el comportamiento ante el desgaste deslizante para esta aleación no es afectado severamente por la variación de velocidad de deslizamiento en las condiciones correspondientes al presente estudio. Sin embargo, la tendencia es a disminuir la constante de desgaste con el aumento de la misma.

La figura 5 corresponde a las fotomicrografías por MEB de la morfología de las huellas de desgaste para el sustrato y las muestras recubiertas. En la figura 5a correspondiente al sustrato ensayado a 0,05 m/s, se aprecia en la huella de desgaste la formación de una capa compacta sobre ésta,



b)

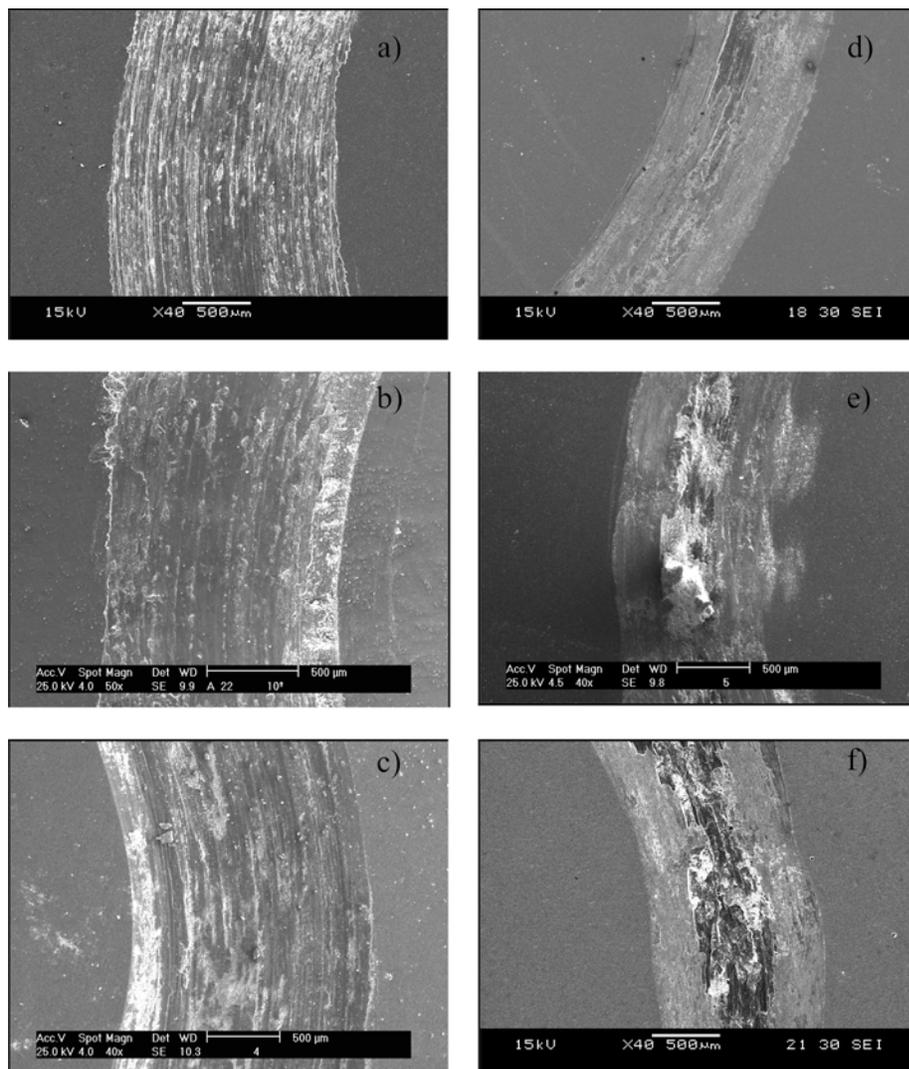
**Figura 4.** Variación del coeficiente de fricción en función de la velocidad de deslizamiento: a) Al 7075-T6; b) Al 7075-T6 recubierta.

**Tabla 4.** Resultados de los ensayos de desgaste deslizante.

Par Tribológico	Velocidad de deslizamiento [m/s]	Coefficiente de fricción [ $\mu$ ]	Ancho de la huella [ $\mu\text{m}$ ]	Volumen perdido $V_D$ [ $\text{mm}^3$ ]	Constante de desgaste $K \times 10^{-4}$ [ $\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ ]
Al 7075T-6 vs. AISI 52100	0,05	$0,45 \pm 0,02$	$1663,3 \pm 47,2$	$3,09 \pm 0,05$	$6,19 \pm 0,10$
	0,10	$0,44 \pm 0,01$	$1481,6 \pm 47,1$	$1,90 \pm 0,33$	$3,81 \pm 0,59$
	0,15	$0,42 \pm 0,02$	$1488,3 \pm 109,1$	$1,58 \pm 0,53$	$3,17 \pm 1,06$
Al 7075T-6/ Ni-P vs. AISI 52100	0,05	$0,76 \pm 0,08$	$858,6 \pm 13,3$	$0,69 \pm 0,01$	$1,39 \pm 0,05$
	0,10	$0,73 \pm 0,09$	$929,5 \pm 73,1$	$0,67 \pm 0,03$	$1,33 \pm 0,01$
	0,15	$0,45 \pm 0,09$	$1136,9 \pm 20,1$	$0,65 \pm 0,07$	$1,29 \pm 0,01$

como consecuencia de la aglomeración y compactación de partículas de desgaste generadas durante el ensayo (Goldman *et al.* 2001; Ashrafizadeh *et al.* 1989). Una vez alcanzado el valor máximo del coeficiente de fricción, el recubrimiento comienza a sufrir un desgaste adhesivo, con el posterior desprendimiento, formación de partículas de

desecho «debris» y desgarramiento de la capa formada, de manera que, el coeficiente de fricción fluctúa por efecto de estos mecanismos. Este mismo comportamiento fue reportado por Santana (2002) para este mismo tipo de aleaciones de aluminio.



**Figura 5.** Fotomicrografías MEB de las huellas de desgaste: aluminio 7075-T6 a) 0,05 m/s; b) 0,10 m/s; c) 0,15 m/s y aluminio 7075-T6 recubierto d) 0,05 m/s; e) 0,10 m/s; f) 0,15 m/s.

La formación de partículas de desgaste durante el ensayo, puede producir desgaste abrasivo de tres cuerpos generado por un mecanismo de arado (Li *et al.* 1999). Esto se evidencia en la fotomicrografía de la figura 6 correspondiente a la huella de desgaste a 0,05 m/s, donde las regiones más claras corresponden a un desgaste de la superficie por abrasión o arado de las partículas, que causa deformación plástica y remoción de material produciendo surcos en la superficie (Hokkirigawa *et al.* 1988). Las zonas oscuras, de acuerdo al análisis químico por EDX, corresponden al aluminio y el oxígeno por lo tanto posiblemente se encuentran formando un óxido de aluminio.

La huella de desgaste correspondiente a la velocidad de deslizamiento de 0,10 m/s (figura 5b), muestra la presencia de un desgaste adhesivo que se inició con la delaminación de las asperezas menos duras y fracturadas por los repetidos ciclos, generando inicialmente, una superficie relativamente lisa donde la fuerza tangencial ejercida en los puntos de contacto inducen deformaciones plásticas superficiales y subsuperficiales (León, 2001).

En la figura 5c la fotomicrografía de la huella de desgaste del sustrato, correspondiente a la velocidad de deslizamiento de 0.15 m/s, se nota el mismo patrón de comportamiento que en la condición anterior, caracterizándose por la presencia de un severo desgaste mixto. La capa compacta que se forma durante los primeros metros se desgarró en la dirección del deslizamiento, debido a las partículas que quedan atrapadas en el contacto. Es por ello, que se observan variaciones del coeficiente de fricción durante todo el ensayo (figura 4a).

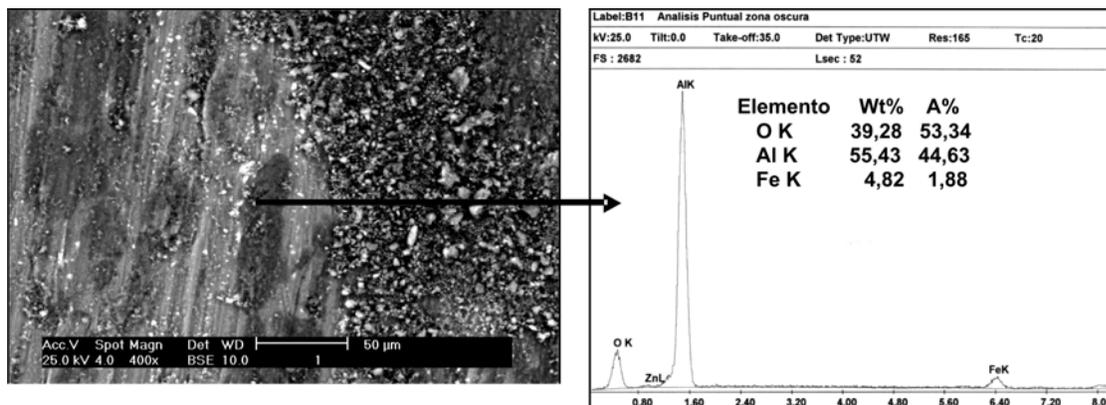
Las curvas del coeficiente de fricción correspondientes al sustrato recubierto se muestran en la figura 4b, para las diferentes condiciones estudiadas. En la curva correspondiente a 0,05 m/s se aprecia un comportamiento estable, debido a que los «debris» se aglomeraron sobre la superficie de la huella formando la capa de material adherido que se describió anteriormente, tal como se muestra en la

figura 5d. Se observa que la morfología de la huella corresponde a un mecanismo de desgaste adhesivo que ha sufrido deformación plástica debido a que el área de contacto entre las asperezas es muy pequeña y el esfuerzo asociado en estos puntos supera la resistencia a la fluencia del material. En cambio para las otras velocidades, el coeficiente de fricción fluctúa, aumentando y disminuyendo bruscamente. Este fenómeno se debe a la presencia de partículas dentro del contacto de la huella y la contraparte, provocando la ruptura de la nueva superficie de contacto entre el par tribológico.

La huella de desgaste correspondiente a la velocidad de deslizamiento de 0,10 m/s, para las muestras recubiertas (figura 5e), exhibe la presencia de varios mecanismos de desgaste. En primer lugar, la formación de una capa compacta que se fractura y desgarró en la dirección de deslizamiento, indicando una alta deformación del recubrimiento, pero también, hay evidencia de un desgaste abrasivo debido a la presencia de «debris» y surcos dentro de la huella característico de un mecanismo de arado (Li *et al.* 1999). La morfología de la huella revela zonas en bajo relieve y limado de asperezas como ha sido reportado por Suh *et al.* 1981.

Con respecto a la morfología de la huella de desgaste a la velocidad de deslizamiento de 0,15 m/s (figura 5f), se puede observar la presencia de un severo desgaste mixto en el centro de la huella. La capa compacta que se formó durante los primeros metros se desgarró en la dirección de deslizamiento debido a las partículas que quedaron atrapadas en el contacto, iniciándose con un mecanismo de desgaste similar a los casos anteriores pero de manera más acentuada por efecto de la velocidad de deslizamiento. Sin embargo, la presencia del mecanismo mixto ocurre sólo en el centro de la huella, ya que en su periferia, los mecanismos que prevalecen son delaminación de las asperezas y adhesión.

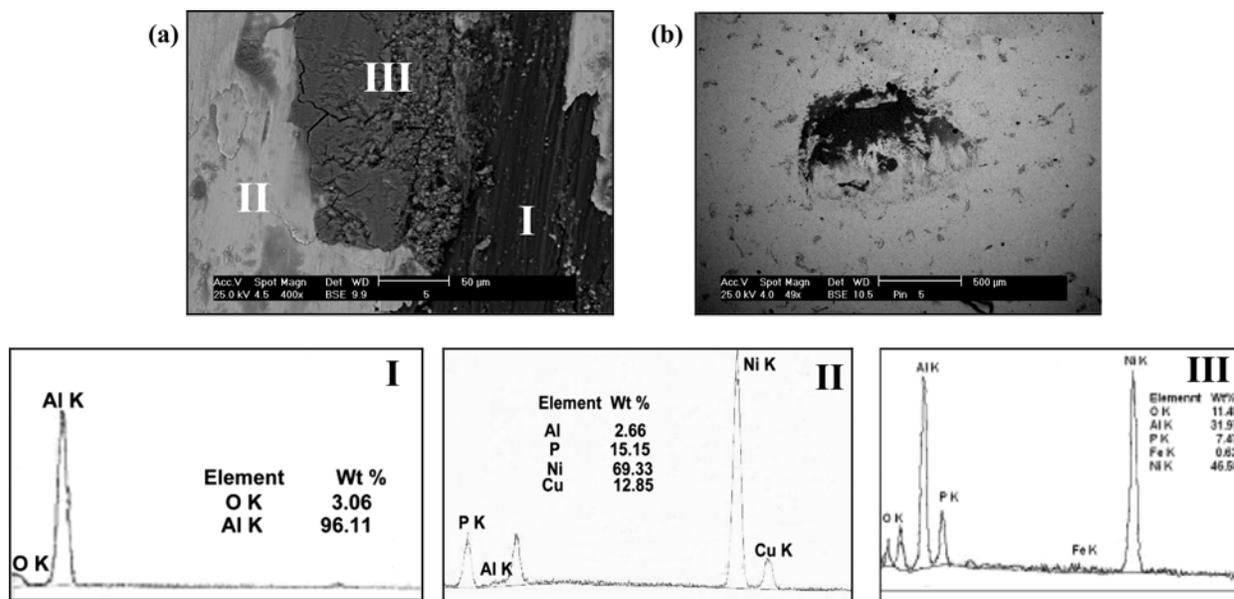
Las fotomicrografías por MEB en modo de BSE de la huella de desgaste de la muestra recubierta y la contraparte estática



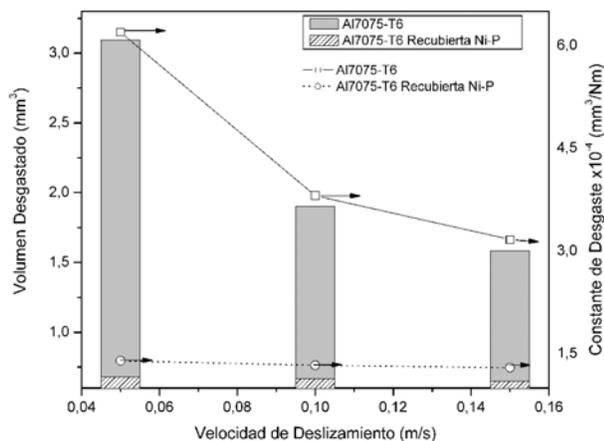
**Figura 6.** Fotomicrografía por MEB de la huella de desgaste del Al7075-T6 ensayado a 0,05 m/s.

ensayada a 0.10 m/s se presentan en la figura 7a y 7b, respectivamente. Se puede identificar claramente en la imagen de la huella de desgaste tres zonas: una oscura (Zona I) que de acuerdo al microanálisis químico elemental puntal por EDX corresponde al sustrato, por lo tanto se evidencia que el recubrimiento llegó a desprenderse en algunos puntos, por efecto del agresivo mecanismo al que fue sometido y su alta ductilidad. La Zona II, corresponde al recubrimiento en sí, ya que los picos detectados son de Ni y P, la Zona III es la correspondiente al material producto de los mecanismo de adhesión y abrasión, como se evidencia en la fotomicrografía de la contraparte de acero AISI 52100 (figura 7b) la presencia de material adherido a su periferia.

En la figura 8, se muestra el efecto de la velocidad de deslizamiento en el volumen desgastado y la constante de desgaste de las muestras ensayadas. Se corrobora que la condición más severa para el sustrato, con y sin recubrimiento, es la velocidad de deslizamiento de 0,05 m/s, obteniéndose para esta misma condición un 77 % menos de volumen desgastado con respecto al aluminio 7075-T6, mientras que para las velocidades de 0,10 y 0,15 m/s, se alcanzó una disminución de 65 y 60 %, respectivamente.



**Figura 7.** Fotomicrografías por MEB y microanálisis químico por EDX, en modo de BSE de las huellas de desgaste ensayada a 0,10 m/s: a) Al7075-T6 recubierta con Ni-P; b) Bola acero AISI 52100.



**Figura 8.** Efecto de la velocidad de deslizamiento en volumen desgastado y en la constante de desgaste.

## CONCLUSIONES

De los resultados presentados en este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- El recubrimiento autocatalítico «electroless» Ni-P estudiado presentó una morfología nodular y una estructura amorfa, debido al alto contenido de fósforo (18% peso) presente. Además, la composición y distribución del níquel y el fósforo fueron uniformes a lo largo de todo el espesor del recubrimiento.
- Bajo las condiciones estudiadas en este trabajo, el coeficiente de fricción promedio de la aleación de aluminio 7075-T6 versus acero AISI 52100 presenta valores que oscilan entre 0,423 - 0,449.
- Para todas las condiciones de ensayo de las muestras recubiertas, los valores de volumen desgastado fueron menores que los obtenidos en los ensayos de las muestras sin recubrimiento.
- El proceso de desgaste para el par tribológico aleación de aluminio 7075-T6 recubierto versus acero AISI 52100 fue gobernado por un mecanismo de desgaste adhesivo severo, caracterizado por parches adheridos y desgarrados sobre la superficies de la huella, con indicios de deformación plástica y transferencia del recubrimiento a la bola, que se intensifica al aumentar la velocidad produciendo la generación de partículas de desgaste que llevaron a un mecanismo de desgaste mixto.
- Los valores de la constante de desgaste del sustrato con y sin recubrimiento para las velocidades estudiadas estuvieron en el orden de  $10^{-4} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ , indicando que ambos sistemas tribológicos presentaron una baja resistencia al desgaste deslizante bajo las condiciones ensayadas.

## AGRADECIMIENTOS

Al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) por el financiamiento recibido para el desarrollo de este trabajo a través del Proyecto G-2000001591.

## REFERENCIAS

- ABDEL, H.Z. & ABOU M.T. (2002). *Development of electroless nickel-phosphorous composite deposits for wear resistance of 6061 aluminium alloy. Materials Letters.*, 57, 720-726.
- ALPAS, A.T., HU, H., ZHANG, J. (1993). *Plastic deformation and damage accumulation below the worn surfaces. Wear.*, 162-164, 188-195.
- ARCHARD, J. & HIRST, W. (1956). *The wear of metals under unlubricated conditions. Proc Roy Soc A.*, 236-397.
- ASHRAFIZADEH, F. & BELL, T. (1989). *Hard coatings on aluminum alloys by PVD. Surface Engineering Practice. Processes, Fundamental and applications in corrosion and wear*, 45-59.
- GOLDMAN, R.W, SEGALL, A.E., CONWAY, J.C. (2001). *The dry sliding behavior of aluminum alloys against steel in sheave wheel applications. J. Tribol.*, 123, 676-681.
- GUILERMANY, J.M. (1998). *The Influence of the interstitial element on tribological behavior of tungsten coating. Surf. Coat. Technol.*, 102, 50-62.
- HOKKIRIGAWA, K. & KATO, K. (1988). *An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedformation during abrasive wear. Tribol. Int.*, 21(2), 51-57.
- KEONG, K.G. & SHA, W. (2002). *Crystallisation and phase transformation behaviour of electroless nickel-phosphorus deposits and their engineering properties. Surf. Eng.*, 18, 329-343.
- LEÓN, O. (2001). *Recubrimientos autocatalíticos compuestos Ni-P-BN (H)*. Tesis de Doctorado. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- LI, X.Y. & TANDON, K.N. (1999). *Mechanical mixing induced by sliding wear of an Al-Si alloy against M2 steel. Wear*, 225-229, 640-648.
- MA, U. & D.T. GAWNE. (1987). *Wear mechanisms in electroless nickel coatings. Wear*, 120(2), 125-149.
- MARTYAK, N.M, WETTER, S.S., HARRISON L., MCNEIL M., HEU, R., NEIDERER, A. (1993). *Structure of electroless nickel coatings. Plating and Surface Finishing*, Volumen, 60-64.
- METALS HANDBOOK. (1990), *Properties and selection: Nonferrous alloys and special*. ASM International Metals Park, Ohio. USA.
- PARKER, K. (1992). *Electroless nickel: state of the art. Plating and Surface Finishing*, 79.

RIEDEL, W. (1991). *Electroless Nickel plating*. ASM International Metals Park. Ohio. USA.

SANTANA, Y. 2002. «*Comportamiento ante el desgaste deslizando de la aleación de aluminio 7075-T6 con y sin recubrimiento duro de  $TiN_{65}$* ». Trabajo especial de grado. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales Universidad Central de Venezuela. Caracas.

SONG, J.Y. & YU, J. (2002). *Residual stress measurements in electroless plated Ni-P films*. *Thin Solid Films*, 415, 167-172.

STAIA, M.H., CASTILLO, E., PUCHI, E.S., LEWIS P., HINTERMANN, H. (1996). *Wear performance and mechanism of electroless Ni-P coating*. *Surf. Coat. Technol.*, 86-87, 598-602.

SUH, N.P. & SIN, H.C. (1981). *The genesis of friction*. *Wear.*, 69, 91-114.

YU, L. & ZHANG, X. (1993). *Study of the friction and wear behaviour of electroless Ni-P coating*. *Thin Solid Films*, 229, 76-82.