

EFECTO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE SOBRE LA MORFOLOGÍA Y LAS PROPIEDADES ELECTROQUÍMICAS EN PELÍCULAS ANÓDICAS POROSAS, CRECIDAS SOBRE AA 2024-T3

WILLIAM APERADOR*
ENRIQUE VERA**
LEONID MILFRED IPAZ***

RESUMEN

En este artículo se presenta el estudio de las propiedades electroquímicas de las películas anódicas porosas, crecidas sobre la aleación de aluminio AA 2024-T3, obtenidas con la técnica de corriente directa (DC) con densidades de corriente de 10, 15 y 20 mA/cm² en una solución de H₂SO₄. El análisis morfológico se realizó con microscopia de fuerza atómica (AFM) y permitió identificar que el aumento en la densidad de corriente genera mayor homogeneidad de la superficie y disminución en los valores de rugosidad. Con la medida de microdureza Vickers, se determinó que los anodizados mejoran su resistencia mecánica frente al sustrato. Para evaluar la resistencia a la corrosión se utilizaron la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y las curvas de polarización Tafel. A partir de estas técnicas se determinó que el aumento en la densidad de corriente forma películas que incrementan la resistencia a la corrosión. Adicionalmente se modeló el comportamiento electroquímico de las películas producidas y se hizo la correlación con las imágenes obtenidas por microscopia electrónica de barrido (SEM).

PALABRAS CLAVE: AA 2024-T3; películas anódicas; microscopia de fuerza atómica; microscopia electrónica de barrido; espectroscopia de impedancia electroquímica; curvas de polarización Tafel.

* Físico, Magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Doctor en Ingeniería de Materiales. Profesor Asistente, Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. wiapch@yahoo.es

** Físico, Doctor en Física. Profesor Asociado, Ingeniería Metalúrgica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia. enrique.vera@uptc.edu.co

***Ingeniero de Materiales, Doctor en Ingeniería de Materiales. Docente, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. Cali, Colombia. leoipazc@calima.univalle.edu.co

EFFECT OF CURRENT DENSITY ON MORPHOLOGY AND ELECTROCHEMICAL PROPERTIES IN POROUS ANODIC FILMS GROWN ON 2024-T3 ALUMINIUM ALLOYS

ABSTRACT

This paper reports the results of a study about the corrosion electrochemical properties of the porous anodic films grown on aluminium alloys 2024 T3, obtained by DC technique at current densities of 10, 15 and 20 mA/cm² in an aqueous solution of H₂SO₄. Materials characterization was carried out using atomic force microscopy (AFM) allowing identify that the increase in the current density produces a greater surface homogeneity and a decrease of average surface roughness. The micro-hardness Vickers measurements determined that the hard anodization layer improves their mechanical resistance related to the substrate. To evaluate the corrosion resistance of the anodic films, the EIS technique and Tafel polarization curves were employed. From these techniques it has been determined that the increase in the current density values forms films that increase the corrosion resistance. In addition the electrochemical behavior of the obtained films was modeled and the correlation with the images obtained by scattering electron microscopy (SEM) was made.

KEY WORDS: aluminium alloys 2024-T3; anodic films; atomic force microscopy; scattering electronic microscopy; electrochemical impedance spectroscopy; Tafel polarization curves.

EFEITO DA DENSIDADE DE CORRENTE SOBRE A MORFOLOGIA E AS PROPRIEDADES ELECTROQUÍMICAS EM FILMES ANÓDICOS POROSOS, CRESCIDOS SOBRE AA 2024-T3

RESUMO

Neste artigo apresenta-se o estudo das propriedades eletroquímicas dos filmes anódicos porosos crescidos sobre a liga de alumínio AA 2024-T3, obtidos com a técnica de corrente direta (DC) com densidades de corrente de 10, 15 e 20 mA/cm² em uma solução de H₂SO₄. A análise morfológica realizou-se com microscopia de força atômica (AFM) e permitiu identificar que o aumento na densidade de corrente gera maior homogeneidade da superfície e diminuição nos valores de rugosidade. Com a medida de microdureza Vickers, determinou-se que os anodizados melhoram a sua resistência mecânica em frente ao substrato. Para avaliar a resistência à corrosão utilizaram-se a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e as curvas de polarização Tafel. A partir destas técnicas determinou-se que o aumento na densidade de corrente forma filmes que incrementam a resistência à corrosão. Adicionalmente modelou-se o comportamento eletroquímico dos filmes obtidos e fez-se a correlação com as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (SEM).

PALAVRAS-CÓDIGO: AA 2024-T3; filmes anódicos; microscopia de força atômica; microscopia eletrônica de varredura; espectroscopia de impedância eletroquímica; curvas de polarização Tafel.



1. INTRODUCCIÓN

El aluminio posee poca resistencia mecánica, por lo cual se usa con otros elementos en aleaciones, mejorando así sus propiedades mecánicas, y de este modo, ofreciendo a la industria una variedad amplia de combinaciones de resistencia mecánica y resistencia a la corrosión (Bethencourt *et al.*, 2009). La mejor forma de proteger al aluminio y sus aleaciones de ambientes corrosivos, tales como los atmosféricos y marinos, se consigue recubriendo su superficie con gruesas capas de óxido. El proceso industrialmente utilizado para lograr esta protección se conoce como anodizado, el cual consiste en hacer crecer en forma controlada, con corriente o potencial constante, una película anódica de Al_2O_3 sobre el aluminio o sus aleaciones, que actúan como ánodos en una celda electroquímica que contiene un electrolito neutro o ácido. Estos anodizados siempre utilizan una densidad de corriente baja y logran el aumento de propiedades mecánicas, sin embargo, las propiedades corrosivas no mejoran frente al material base, por lo tanto, se ha propuesto en varios trabajos la variación de la densidad de corriente (Bethencourt *et al.*, 2009).

Las propiedades físicas y químicas de las películas anódicas dependen de la naturaleza del metal base, la temperatura y la agitación del electrolito, la densidad de corriente y la duración del tratamiento. Las películas anódicas de Al_2O_3 dependen en su morfología ante todo del electrolito en que fueron formadas durante la anodización, y se clasifican en dos tipos: películas barrera y películas porosas (Fedotiev y Grilijes, 1972).

Las aleaciones de aluminio se usan ampliamente en la industria aeronáutica, donde satisfacen la mayoría de los requisitos, por su relación entre peso y propiedades mecánicas (Davis, 1994). Las propiedades mecánicas de los anodizados son de gran importancia, debido a esto el estudio de su dureza y rugosidad es de gran significación, ya que definen varios parámetros, tales como: estado de esfuerzos en el material, condición de fatiga, relación

tracción/compresión y porcentaje de deslizamiento. Es, entonces, relevante investigar estos aspectos debido a los cambios microestructurales que se pueden producir en las superficies en contacto, asociados a la variación de temperatura para generar alteraciones de dimensión y de forma en una aplicación determinada (Aldykewicz, Isaacs y Davenport, 1995).

Las propiedades electroquímicas de la aleación de aluminio se estudian para realizar una selección de los materiales en la industria aeronáutica. Algunos trabajos en esta área muestran que los componentes de esta aleación generan un carácter anódico, pero con respecto a la matriz posee características catódicas (Bensalah *et al.*, 2008). Se han publicado numerosos estudios del comportamiento de las aleaciones de aluminio en condiciones atmosféricas, con el propósito de observar su comportamiento en diferentes situaciones climáticas y su aplicación en esas regiones (O'Sullivan y Wood, 1970). En otros estudios se muestra el comportamiento de las aleaciones de Al-Cu frente a la corrosión y relacionando esto con la calidad superficial de los materiales determinada mediante SEM y AFM (Dean y Anthony, 1988; Warner *et al.*, 1995; Obispo *et al.*, 2000; Kloet, Hassel y Stratmann, 2005; Lacroix *et al.*, 2008).

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de la densidad de corriente sobre la morfología y el comportamiento electroquímico de películas anódicas de tipo porosas obtenidas con la técnica DC y también comparar su comportamiento con el presentado por la aleación AA 2024-T3.

2. METODOLOGÍA

Como sustrato se emplearon láminas de la aleación de aluminio AA 2024-T3 (tabla 1) de 2 cm^2 de área, preparadas previamente con un pulido mecánico. Las probetas fueron limpiadas mediante ultrasonido en una secuencia de desengrasado por inmersión en alcohol y decapado en hidróxido de sodio al 5 % por volumen, a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 30 s, seguido del lavado con agua desionizada e inmersión en ácido nítrico 50 % volumen a volumen (v/v) a temperatura

Tabla 1. Composición química de la aleación de aluminio AA 2024-T3

Elemento	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
(wt.%)	90-93	0,50	0,50	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,25	0,15	0,10

ambiente durante 60 s; posteriormente se lavaron con agua desionizada y se secaron con aire caliente. Como electrolito se empleó una solución de H_2SO_4 al 15 % (v/v) durante 30 minutos a una temperatura de 20 °C. Las densidades de corriente empleadas fueron 10, 15 y 20 mA/cm². Se utilizó una fuente de corriente constante que permitió el seguimiento del potencial anódico y otras variables como el tiempo de proceso (t) y la densidad de corriente utilizada (J).

La caracterización por microscopía electrónica de barrido (SEM) se realizó en el equipo Leo Electron Microscopy modelo 430. La determinación del tamaño de grano y el análisis superficial de los depósitos se llevó a cabo con un microscopio de barrido por sonda en el modo de microscopía de fuerza atómica en contacto (AFM); el equipo utilizado es un MFP-3D de Asylum Research. La medida de rugosidad se obtuvo con el programa Scanning Probe Image Processor (SPIP) en un área de 1 μm^2 . Además se determinó la resistencia a la fractura por medio de la técnica de microindentación Vickers; con el microdurómetro HV serie 1000, se realizaron indentaciones con una carga de 2,94 N por un tiempo de 20 segundos, se efectuaron 15 medidas en 5 zonas diferentes en cada probeta.

La caracterización electroquímica se hizo en un equipo Gamry modelo PCI 4 mediante las técnicas de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y curvas de polarización Tafel. Estas pruebas se cumplieron a temperatura ambiente, empleando una celda compuesta por el electrodo de trabajo con un área expuesta de 0,4 cm², un electrodo de referencia de Ag/AgCl y un alambre de grafito como contraelectrodo en una solución de cloruro de sodio NaCl al 3,5 % peso a volumen (w/v) preparada con agua destilada. Se eligió esta solución debido a que simula una solución marina, que además corroe metales activos

formando los cloruros sobre el metal. Los diagramas de Nyquist se obtuvieron en un rango de frecuencias de 0,001 Hz hasta 100 kHz, empleando una amplitud de la señal sinusoidal de 10 mV, con una frecuencia logarítmica de 3 puntos por década. Los diagramas de Tafel se obtuvieron a una velocidad de barrido de 0,5 mV/s en un rango de voltajes de -0,25 V a 1,2 V.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Microscopía de fuerza atómica (AFM)

El análisis superficial del sustrato de aluminio y los anodizados se presenta en la figura 1; en la topografía del sustrato (ver figura 1a) se observa una superficie uniforme, con una rugosidad mínima, esto es debido a que a las probetas utilizadas como sustrato se les hizo un pulido mecánico hasta lograr un acabado brillo espejo. La figura 1b corresponde al anodizado efectuado con 10 mA/cm²; la rugosidad y la heterogeneidad de la superficie han aumentado, debido al proceso de cambio superficial logrado con la densidad de corriente; en la figura 1c se observa que, al aumentar la densidad de corriente (15 mA/cm²), la superficie se modifica adquiriendo un menor valor de rugosidad con respecto a la probeta de menor densidad de corriente utilizada, y finalmente en la figura 1d se observa una mayor uniformidad, menor rugosidad y un tamaño de grano más fino, esto a causa del incremento en la densidad de corriente (20 mA/cm²), lo cual genera una textura más fina, debido a la obtención de capas de óxido de mayor uniformidad y estabilidad y diferente estructura comparadas con las que se forman espontáneamente en la superficie del aluminio. El comportamiento mencionado de la rugosidad se puede observar en la figura 2.

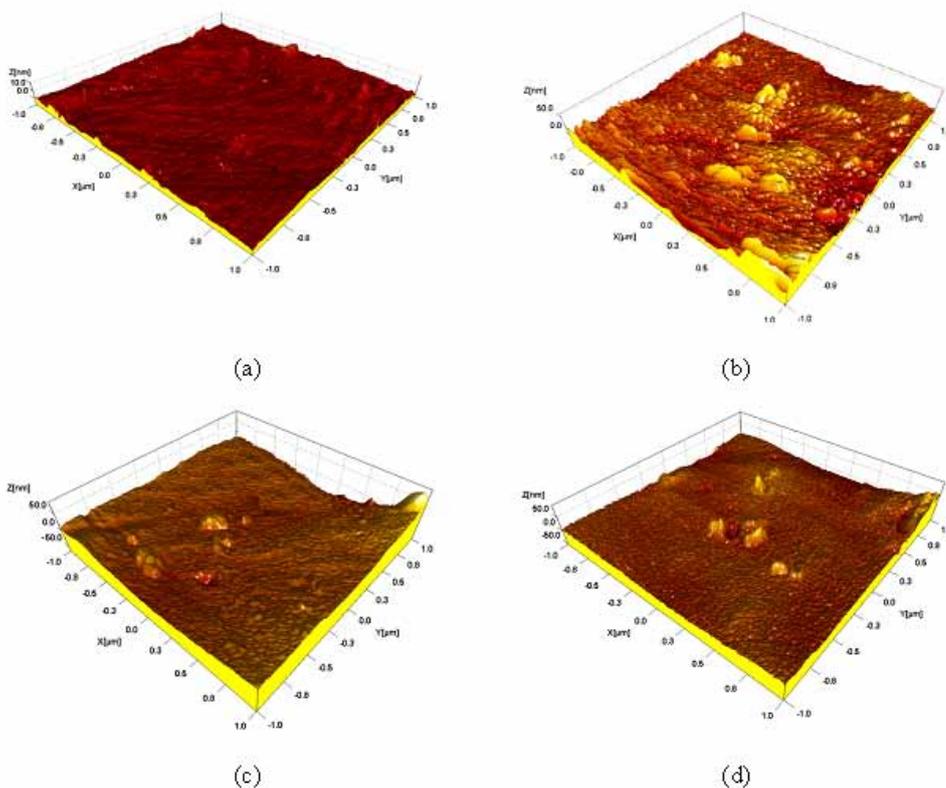


Figura 1. Topografía obtenida mediante AFM del sustrato y de las películas anódicas tratadas con diferentes densidades de corriente: a) Al 2024-T3; b) 10 mA/cm²; c) 15 mA/cm²; d) 20 mA/cm²

3.2 Microdureza Vickers

Las películas anódicas son de espesores pequeños (los espesores fueron medidos mediante SEM realizando un corte transversal, las medidas fueron 6,32 μm para 10 mA/cm²; 7,65 μm para 15 mA/cm² y 11,25 μm para 20 mA/cm², por lo tanto, la medida corresponde a la microdureza del sistema sustrato-película anódica, demostrándose que la película que tiene mayor dureza es la lograda con una densidad de corriente de 20 mA/cm², cinco veces mayor que la obtenida del AA 2024-T3. En la figura 2, se observa el comportamiento de la microdureza Vickers en función de la densidad de corriente, en donde se ve un incremento directamente proporcional, siendo este valor en todos los casos superior al del sustrato. Al correlacionar este parámetro con la rugosidad, se observa que a medida que disminuye

la rugosidad en los anodizados, la microdureza sube, debido a que la película de óxido formado sobre el aluminio se hace más compacta, uniforme y adherente con el aumento de la densidad de corriente.

3.3 Comportamiento electroquímico

La aleación AA 2024-T3 es principalmente aluminio mezclado con un porcentaje de cobre presente en solución sólida (ver tabla 1). Este metal de aleación altera el potencial en la dirección catódica, lo cual explica el potencial de corrosión inicial del sustrato y los anodizados cuando se exponen a una solución de NaCl (3,5 % NaCl). En la figura 3, se muestran las curvas de polarización Tafel, allí se observa que el potencial más activo corresponde al sustrato, debido a la capa de óxido formada de

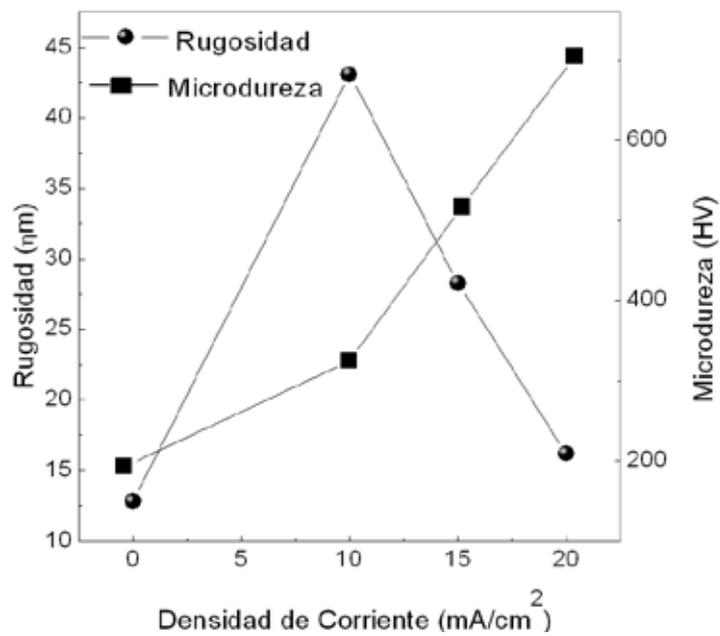


Figura 2. Relación entre rugosidad y microdureza en función de la densidad de corriente

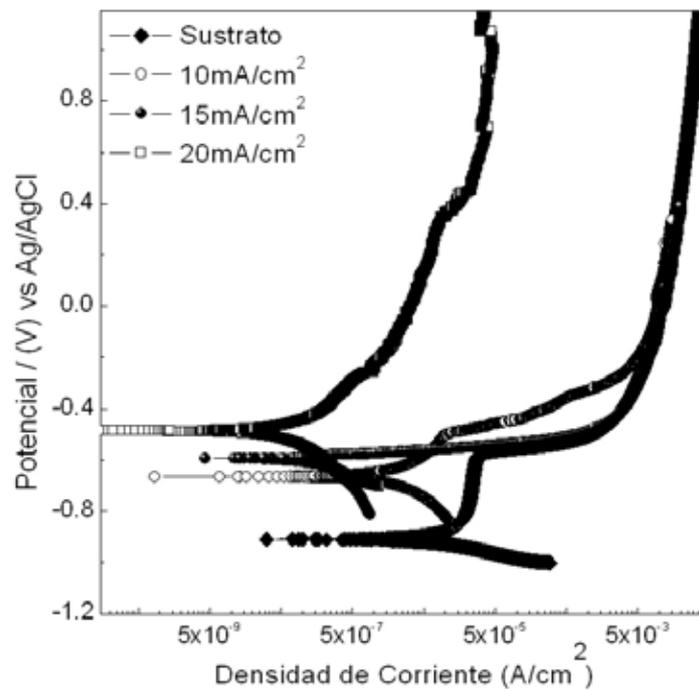


Figura 3. Curvas de polarización Tafel para el AA 2024-T3 y las películas anódicas



manera espontánea sobre él (-0,91 V y Ag/AgCl). A medida que se incrementa la densidad de corriente, se observa el desplazamiento de las curvas hacia zonas pasivas, pasando desde -0,639 V para 10 mA/cm² hasta -0,499 V para 20 mA/cm², por tanto, al aumentar la densidad de corriente se eleva la relación de áreas catódicas/anódicas en la matriz de los anodizados (Campestrini *et al.*, 2000; Llevbare *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2004). Las curvas de polarización en todos los casos generan un comportamiento pasivo, en ellas la rama anódica describe una tendencia a mantener o reducir el flujo de corriente a medida que se incrementa el potencial.

Los parámetros encontrados con ayuda de las curvas de polarización permiten usar la ecuación de Stern-Geary (ecuación 1) para calcular las corrientes de corrosión, en donde estas varían en función de la densidad de corriente; además se utilizó la ecuación 2 para el cálculo de B a partir de las pendientes de

Tafel. Los datos obtenidos con las curvas de polarización Tafel pueden apreciarse en la figura 4.

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303 R_p (\beta_a + \beta_c)} \quad (1)$$

donde:

$$R_p = \frac{B}{i_{corr}} \quad (2)$$
$$B = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)}$$

Se obtiene (figura 4) que el valor más alto corresponde al sustrato (21 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), y a medida que se aumenta la densidad de corriente en los anodizados, disminuye la densidad de corrosión generando valores muy pequeños (0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), lo cual indica que las capas de óxido formadas producen un efecto protector de la aleación en ambientes corrosivos (NaCl).

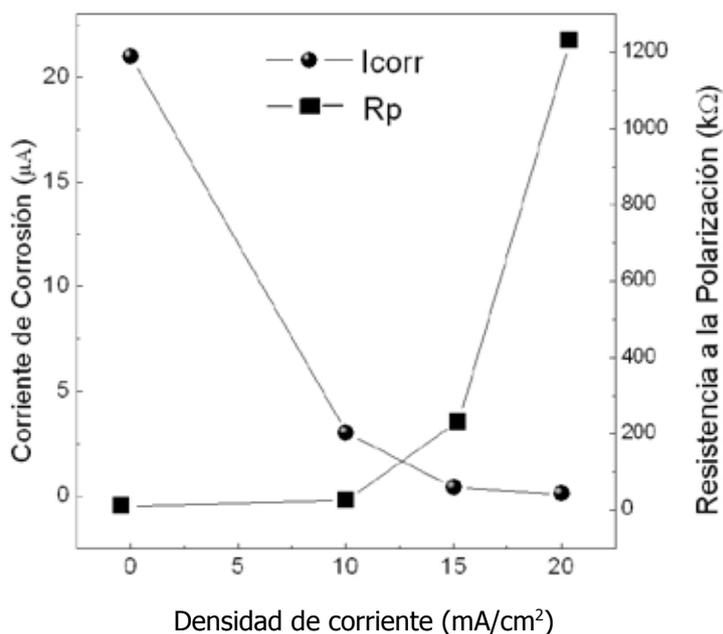


Figura 4. Corriente de corrosión y resistencia a la polarización en función de la densidad de corriente

Con el propósito de realizar una evaluación que permita discriminar los procesos que suceden durante la prueba electroquímica sobre la aleación AA 2024-T3 y sobre los anodizados en contacto con la solución de NaCl, se hizo uso de la técnica EIS, la cual es una herramienta que genera una respuesta electroquímica del sistema estudiado, describiéndolo mediante elementos físicos conectados en forma de circuitos. Este comportamiento se correlaciona con la observación realizada por SEM (figura 8). Para la muestra de AA 2024-T3, se obtiene un pequeño semicírculo mucho menor comparado con los de los anodizados, lo que indica un menor valor de la resistencia para el AA 2024-T3 (figura 5).

El circuito equivalente que mejor se adaptó a las medidas experimentales es el presentado en la figura 6. En este circuito se observa un elemento de fase constante que está en paralelo con la resistencia a la

transferencia de carga y en serie con la resistencia de la solución.

Para las películas anódicas se observan varios semicírculos (figura 5). Debido a esto se utilizó un circuito equivalente con tres elementos de fase constante (CPE_1 , CPE_2 y CPE_3) representado en el diagrama de la figura 7, donde los elementos CPE_1-R_1 se presentan a altas frecuencias y se asocian a las reacciones que ocurren alrededor de la capa de óxido superficial pasivante. Un segundo conjunto de elementos CPE_2-R_2 , presentes en frecuencias intermedias, están relacionados con la capa de barrera que es generada por el espesor del anodizado, y finalmente un tercer conjunto de elementos CPE_3-R_3 , hallado a muy bajas frecuencias (1mHz) y debido a la transferencia de carga, representa la respuesta a los procesos que ocurren en el sistema, los cuales son lentos en los

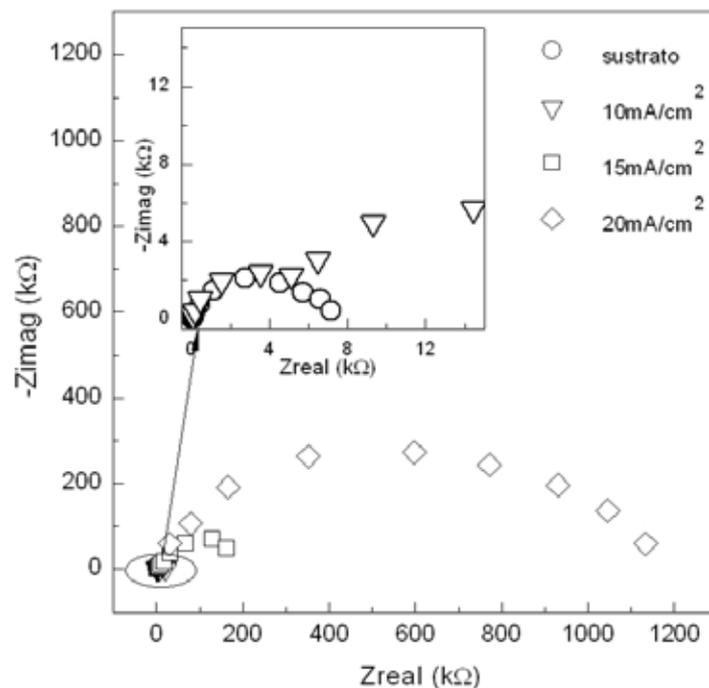


Figura 5. Diagrama de Nyquist del sustrato (AA 2024-T3) y las películas anódicas

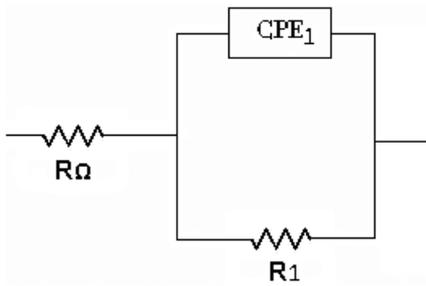


Figura 6. Circuito equivalente utilizado para ajustar los datos de impedancia del sustrato

anodizados obtenidos. En la figura 8 se observa la micrografía SEM en sección transversal de uno de los anodizados. Debido a la formación de una película de óxido de aluminio, que actúa como aislante, se les realizó un recubrimiento con cobre para la preparación superficial. Se observa la micrografía de SEM de la sección transversal de las

capas de óxido superficial junto con la capa que sirve de barrera, las correspondientes al conjunto de elementos CPE_1-R_1 y CPE_2-R_2 , la interfase entre la película anódica y el sustrato de aluminio 2024-T3. La capa relacionada con el conjunto de elementos CPE_3-R_3 es la interfase de transferencia de carga, en donde el valor de la resistencia a la transferencia de carga es el parámetro más importante, debido a que se puede relacionar con la velocidad de corrosión y se extrae de los circuitos equivalentes. En la figura 4 se observa que el menor valor es 12 k Ω y corresponde al sustrato, aumentando a medida que se amplifica la densidad de corriente utilizada en el proceso de anodizado; se obtiene un valor máximo de 1700 k Ω para cuando se utiliza una densidad de corriente de 20 mA/cm², debido a la formación de capas de óxido porosas (figura 8), cuyo espesor se incrementa a medida que aumenta la densidad de corriente (tabla 2).

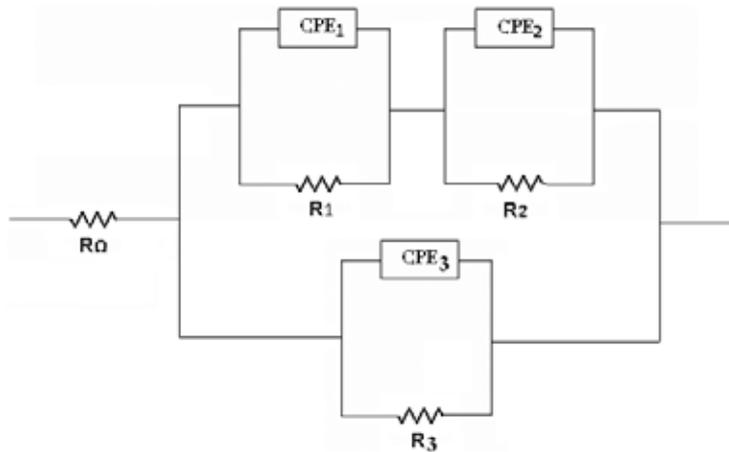
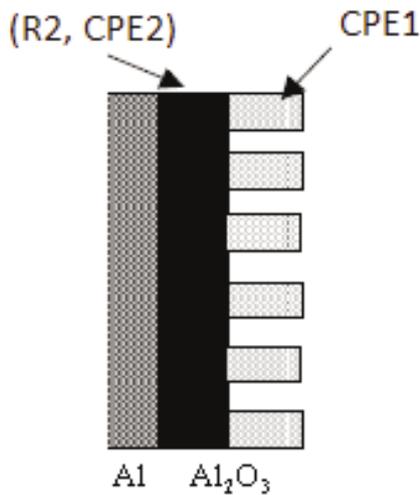


Figura 7. Circuito equivalente utilizado para ajustar los datos de impedancia de las películas anódicas

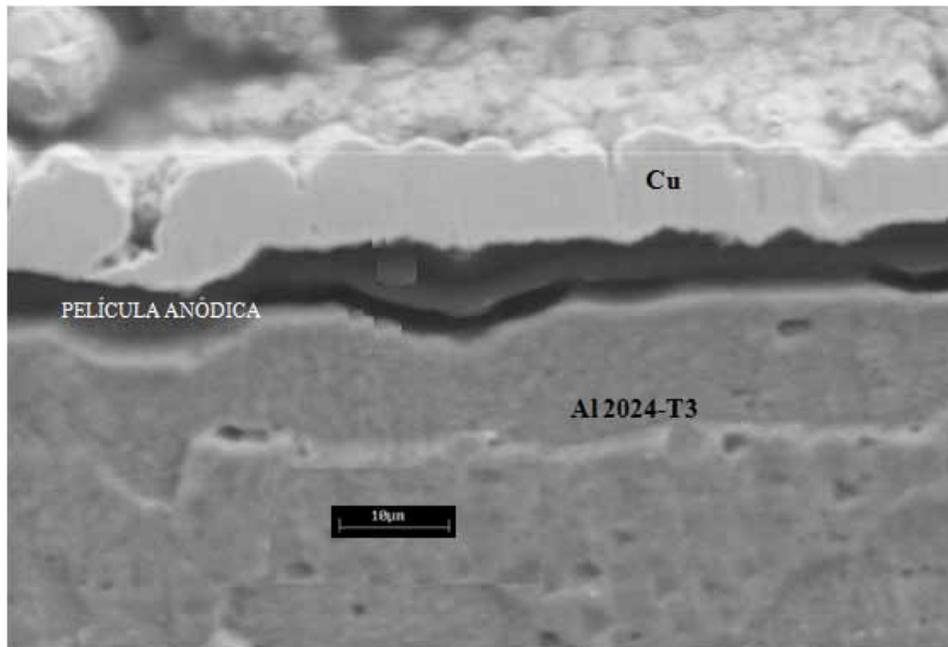


Figura 8. Micrografía SEM de la película anódica (20 mA/cm²)

Tabla 2. Parámetros usados para el ajuste de impedancia de los datos del sustrato y las películas anódicas

Parámetro	Sustrato	Densidad de corriente (mA/cm ²)		
		10	15	20
R _Ω (Ω.cm ²)	54	50,7	50,7	50,7
CPE ₁ (F.cm ²)	2,32*10 ⁻⁴	1,18*10 ⁻⁵	3,16*10 ⁻⁶	2,27*10 ⁻⁶
R1 (kΩ.cm ²)	12	128	224	765
CPE ₂ (F.cm ²)		9,57*10 ⁻³	1,72*10 ⁻³	3,12*10 ⁻⁶
R2 (kΩ.cm ²)		17,3	19,3	210,7
CPE ₃ (F.cm ²)		3,06*10 ⁻⁴	2,02*10 ⁻²	5,03*10 ⁻⁴
R3 (Ω.cm ²)		0,366*10 ⁶	0,55*10 ⁶	1,67*10 ⁶



4. CONCLUSIONES

Las películas anódicas tipo porosas producidas sobre la aleación de aluminio AA 2024-T3 presentan mayor homogeneidad y resistencia mecánica a medida que se incrementa la densidad de corriente.

Se modelaron los comportamientos electroquímicos obtenidos con el conjunto sustrato-películas anódicas, permitiendo hallar la correlación con su microestructura obtenida por SEM, lo que explica el buen comportamiento de las películas anódicas. Los resultados de la espectroscopia de impedancia electroquímica y las curvas de polarización Tafel indican el buen desempeño de las películas anódicas, ya que incrementan su protección frente a fenómenos altamente corrosivos, además se observó que la tendencia es a aumentar su valor protector a medida que se incrementa la densidad de corriente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección de Investigaciones (DIN) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en Tunja y al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM).

REFERENCIAS

- Aldykewicz, A. J.; Isaacs, H. S. and Davenport A. J. (1995). "The investigation of cerium as a cathodic inhibitor for aluminum-copper alloys". *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 142, No. 10 (October), pp. 3342-3350.
- Bensalah, W.; Elleuch, K.; Feki, M.; Wery, M.; Gigandet, M. P. and Ayedi. H. F. (2008). "Optimization of mechanical and chemical properties of sulphuric anodized aluminium using statistical experimental methods". *Materials Chemistry and Physics*, vol. 108, No. 3 (April), pp. 296-305.
- Bethencourt, M.; Botana, F. J.; Cano, M. J.; Marcos, M.; Sánchez-Amaya, J. M. and González Rovira L. (2009). "Behaviour of the alloy AA2017 in aqueous solutions of NaCl. Part I: Corrosion mechanisms". *Corrosion Science*, vol. 51, No. 3 (March), pp. 518-524.
- Campestrini, P.; Van Westing E. P. M.; Van Rooijen, H. W. and De Wit J. H. W. (2000). "Relation between microstructural aspects of AA2024 and its corrosion behavior investigated using AFM scanning potential technique". *Corrosion Science*, vol. 42, No. 11 (November), pp. 1853-1861.
- Davis, J. *Aluminum and aluminum alloys*, prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee. Metals Park, OH: ASM International, 1994. pp. 231-267.
- Dean, S. W. and Anthony, W. H. (1988). *Atmospheric corrosion of wrought aluminium alloys during a ten-year period*. In: Degradation of metals in atmosphere. Dean, S. W. and Lee, T. S. (eds.). STP 965, American Society of Testing and Materials, Philadelphia. pp. 191-205.
- Fedotiev N. P. y Grilijes S. Y. *Electropulido y anodización de metales*. Barcelona: Gustavo Gili, 1972. pp. 145-194.
- Kloet, J. V.; Hassel, A. W. and Stratmann, M. (2005). "Effect of pretreatment on the intermetallics in aluminum alloy 2024-T3". *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, vol. 219, No. 11, pp. 1505-1518.
- Lacroix, L.; Ressler, L.; Blanc, C. and Mankowski, G. (2008). "Combination of AFM, SKPFM, and SIMS to study the corrosion behavior of S-phase particles in AA2024-T351". *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 155, No. 4 (January), pp. C131-C137.
- Llebbare, G. O.; Scully, J. R.; Yuan J. and Kelly, R. G. (2000). "Inhibition of pitting corrosion on aluminum alloy 2024-T3: Effect of soluble chromate additions vs. chromate conversion coating". *Corrosion*, vol. 56, No. 3 (March), pp. 227-242.
- Obispo, H. M.; Murr, L. E.; Arrowood, M. and Trillo, E. A. (2000). "Copper deposition during the corrosion of aluminum alloy 2024 in sodium chloride solutions". *Journal of Materials Science*, vol. 35, No. 14 (March), pp. 3479-3495.
- O'Sullivan, J. P. and Wood, G. C. (1970). "The morphology and mechanism of formation of porous anodic films on aluminium". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 317, No. 1531, pp. 511-543.
- Silva, J. W. J.; Bustamante, A. G.; Codaro E. N.; Nakazato, R. Z. and Hein, L. R. O. (2004). "Morphological analysis of pits formed on Al 2024-T3 in chloride aqueous solution". *Applied Surface Science*, vol. 236, No. 4 (September), pp. 356-365.
- Warner, T. J.; Schmidt, M. P.; Sommer, F. and Bellot, D. (1995). "Characterization of corrosion initiation on 2024 aluminum alloy by atomic force microscopy". *Zeitschrift für Metallkunde*, vol. 86, No. 7 (November), pp. 494-501.