

Caracterización de recubrimientos a base de poliéster sobre AACLAD 2024-T3 mediante pruebas aceleradas de corrosión*

Characterization Coatings Based Polyester Coatings on AA ALCLAD 2024-T3 Through Accelerated Corrosion Tests

William Aperador Chaparro, Andrés Felipe Escobar Mosquera, Jorge Hernando Bautista Ruíz

Resumen

En el presente trabajo se muestra la implementación del recubrimiento tipo poliéster Hetron 197-3 aplicado sobre sustratos de la aleación de aluminio Alclad 2024-T3 que actúan como barreras anticorrosivas. Este tipo de sustrato es muy utilizado en la fabricación del compartimiento de la batería de los aviones T-41. Los recubrimientos fueron expuestos a 0 y 2000 horas, en condiciones atmosféricas agresivas (medio salino-acidificado). Se comparó el

grado de deterioro en los sistemas con protección base resina sintética (Hetron 197-3) y poliéster. El análisis de la morfología superficial se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar el deterioro generado por la exposición al medio agresivo. El desempeño electroquímico de los recubrimientos se evaluó mediante la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y curvas de polarización tafel. Las curvas de polarización y los diagramas de nyquist indican que los recubrimientos de resina antiácida poliéster presentan

• Fecha de recepción del artículo: 22-03-2011 • Fecha de aceptación: 11-04-2011.

WILLIAM APERADOR CHAPARRO. Físico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la misma Universidad. Doctor en Ingeniería de los Materiales de la Universidad del valle. Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito y de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. Correo electrónico: *g.ing.materiales@gmail.com*. **ANDRÉS FELIPE ESCOBAR MOSQUERA.** Ingeniero de Materiales de la Universidad del Valle y estudiante de Maestría en Ingeniería de materiales de la misma universidad. Correo electrónico: *andresescobar_70@hotmail.com*. **JORGE HERNANDO BAUTISTA RUIZ.** Licenciado en Física y Matemáticas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la misma universidad. Investigador Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica GITEC, Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta. Correo electrónico: *jorgebautista@ufps.edu.co*.

* Este artículo hace parte de los resultados finales del proyecto de investigación *Recubrimientos poliméricos aplicados a la aleación de aluminio Alclad 2024-T3 utilizado en aeronaves*. Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle. Fecha de aprobación, 6 de junio de 2009.

el menor valor de corriente y velocidad de corrosión con respecto al sistema tradicionalmente utilizado en la industria aeronáutica (Proceso de plaquado o chapeado (Alclad), recubrimientos por conversión en aleaciones de aluminio, oxidación química).

Palabras clave: AA 2024-T3, cámara salina, corrosión, microscopía electrónica de barrido.

Abstract

In this paper are presents the implementation of protective coating Hetron 197-3 polyester type of corrosion protection of aluminum alloy 2024-T3, which is used in battery compartment manufacturing of T-41 Aircraft. The coatings were exposed to 0 and 2000 hours in neutral salt fog exposure. The compared the degree of deterioration in protection systems based synthetic resin and polyester. The morphology surface analysis was made using Scanning Electron Microscopy (SEM) to observe the damage generated by exposure to aggressive media. The electrochemical characterization of the coatings was performed through Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and Tafel polarization curves, polarization curves and Nyquist plots indicates that antacid polyester resin coating has the lowest value of current and corrosion rate with the system traditionally used in the aviation industry (Plating Process (Alclad), Conversion Coatings for Aluminum Alloys, chemical oxidation).

Keywords: AA 2024-T3, saline fog, corrosion, Scanning Electron Microscopy.

Introducción

Las aleaciones ligeras de aluminio son materiales metálicos de gran aplicación aeronáutica por su alta resistencia mecánica y bajo peso específico. Son empleadas en la construcción del fuselaje y componentes estructurales de las aeronaves, principalmente las aleaciones de la serie 2XXX o duraluminios. La aleación de mayor importancia en este campo de aplicación es la AA2024, la cual puede ir chapeada, tratada térmicamente y es empleada en toda clase de revestimientos, componentes estructurales y

herrajes (Oñate, 1991; ASM 9, 2005; Airframe, 1999). Sin embargo, las aleaciones de aluminio son susceptibles a corroerse y sufrir ataque destructivo por reacción química o electroquímica con algún medio circundante altamente corrosivo, ambientes marinos y acidificantes. Una consecuencia de los problemas generados por la degradación de las propiedades mecánicas son los altos costos representados en los aspectos de inspección, control y mantenimiento. Surge, entonces, la necesidad de desarrollar, a escala industrial, sistemas de protección anticorrosiva, como por ejemplo, recubrimientos protectores orgánicos, que aíslan la superficie metálica y generan una barrera de impedimento frente a las respectivas reacciones que puedan darse con el medio ambiente presente. Estas características en los recubrimientos permiten contrarrestar las altas velocidades de corrosión (ESTCP, 2004; Bierwagen, 2002; Buchheit, 2003; Atta, 2007).

Los recubrimientos orgánicos a base de resinas sintéticas proveen una excelente protección contra la corrosión siempre y cuando se haya realizado una buena limpieza y preparación de superficie, seguida de un pre-tratamiento adecuado según el tipo de sustrato a proteger (Atta, 2006; Atta, 2007; Sathyanarayan, 2008). Estos sistemas de protección pueden aplicarse en una sola capa o en multicapas, como en el caso de los recubrimientos para la industria aeronáutica, los cuales están constituidos generalmente por un pre-tratamiento, un imprimante y una pintura de acabado. Han venido desarrollándose diversos trabajos referentes a la innovación y optimización de nuevos recubrimientos alternativos protectores a la corrosión de aplicación aeronáutica han venido desarrollándose (Reynolds, 1997), investigaciones que se han orientado en dos direcciones: la primera, recubrimientos alternativos a los tratamientos superficiales tradicionales (pre-tratamiento), de los cuales el caso más representativo son los recubrimientos por oxidación química a partir de óxidos de circonio y titanio (Sánchez-Amaya, 2007; Osborne, 2001; Neuder, 2003), y segundo, recubrimientos alternativos de los imprimantes orgánicos tradicionales a partir de resinas e imprimantes, sin ninguna incorporación de pigmentos cromatantes como agentes inhibidores a la corrosión (Twite, 1998).

La adaptación de estos sistemas protectores a la corrosión requiere de pruebas que evalúen el desempeño del material en condiciones reales de exposición en ambientes diversos, y aun más, que establezcan un estimativo de la vida útil del sistema de protección. El ensayo de spray de niebla salina (Salt Spray Fog Test), descrito por la norma ASTM B117 (2008), es uno de los más difundidos. En esta evaluación (Spray de Niebla Salina) se expone un determinado recubrimiento (Hetron 197-3 y poliéster) bajo una niebla salina a modo de ambiente marino artificial y en condiciones exageradas de temperatura y humedad relativa. De esta manera, al evaluar los recubrimientos en condiciones aceleradas se puede apreciar cómo es el comportamiento ante la corrosión de un sistema de recubrimientos protectores en los ambientes atmosféricos más agresivos que existen y evaluar su eficiencia en cuanto a durabilidad.

El objetivo de este trabajo fue la evaluación y comparación del comportamiento anticorrosivo del sistema de recubrimientos tipo poliéster Hetron 197-3 en un medio salino-acidificado como alternativa para sustituir las pinturas tradicionalmente utilizadas por la industria militar de aviación.

Desarrollo experimental: materiales

Los revestimientos del fuselaje de las aeronaves T41, al igual que las áreas internas

propensas a la corrosión, como es el caso del compartimiento de la batería, están fabricados de láminas de la aleación de aluminio 2024-T3, cuya composición química se muestra en la Tabla 1, chapeadas con la aleación 1230 conforme las especificaciones internacionales de la norma ASTM B209 (ASTM, 2007) (tabla 2); y recubrimientos protectores a la corrosión base pintura, acorde con estándares militares de aviación (pre-tratamiento superficial, imprimante y pintura de acabado). Dicho sistema de protección está constituido por un tratamiento superficial de nombre comercial Alodine 5700 que genera un recubrimiento de conversión sin cromo bajo una solución química con un 80% de un componente inorgánico de especies de oxifluoruro de titanio, circonio y silicio ($H_2 Ti F_6 + Zr O (OH) (CO_3)_{0.5} + SiO_2$). Adicionalmente posee un 20% de un componente orgánico poly-4-vinyl- fenol y aminas, promoviendo de esta manera un recubrimiento protector inorgánico por conversión a partir de un complejo órgano-metálico de circonatos, y una buena superficie de adhesión para el posterior recubrimiento orgánico. Segundo, una imprimación superficial con un imprimante epóxico de base cromatante, cuyo principal componente es una resina epóxica diluida bajo contenidos de cromato de estroncio como pigmentos de protección a la corrosión; y finalmente una pintura de acabado (poliuretano) (Twite, 1998).

Tabla 1
Composición química de la aleación del sustrato (Al 2024)

Composición química del sustrato (AA 2024) Aprox. 91% Al										
									Otros	
% Peso	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	-	Total
Mínimo	-	-	3.8	0.30	1.2	-	-	-	-	-
Máximo	0.50	0.50	4.9	0.9	1.8	0.10	0.25	0.15	0.05	0.15

Tabla 2
Composición química de la aleación de chapeo (Al 1230)

Composición química del chapeado (AA1230) Aprox. 99 % Al									
								Otros	
% Peso	Si +Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	-	Total
	0.7	0.1	0.05	0.05	-	0.1	0.03	0.03	0.15

Procesos experimentales

El sistema de protección basado en resina sintética consta de las siguientes etapas de aplicación: El pre-tratamiento se realizó de forma química iniciando con un proceso de limpieza y desengrase con un detergente ácido a base de ácido fosfórico a una temperatura de 46 °C durante 10 minutos; luego se realizó un decapado con NaOH a una concentración de 50 g/l disuelto en agua destilada, durante 1 minuto a una temperatura de 52 °C; finalmente se generó un tratamiento de anclaje con Alodine 5700. Posteriormente se aplicó una delgada capa de resina poliéster Polisecc 115, de 50 µm por vaciado y se homogenizó el recubrimiento en toda el área de aplicación. La resina tuvo un tiempo de curado de 20 minutos. Para terminar el proceso se aplicó un revestimiento compuesto de resina antiácida poliéster Hetron 197-3, a la cual se le incorporó como relleno escamas de vidrio en un 20% (peso/peso) con respecto al peso total, y 2% (peso/peso) de catalizador con respecto al peso total. Se obtuvieron dos sistemas: H1=1capa (100 µm); H2= 2 capas (200 µm). Estos sistemas se compararon con el recubrimiento comúnmente utilizado, el cual es una combinación de Alodine 5700, imprimante epóxico y pintura de poliuretano. Este recubrimiento se denominó PP.

Técnicas de caracterización

Las probetas fueron sometidas a un proceso de limpieza ultrasónica en un baño de acetona y secadas previamente al ensayo. Los recubrimientos se evaluaron en una cámara salina acidificada conforme con las normas ASTM B117 (ASTM B 117, 2008). La caracterización electroquímica se realizó en un equipo Gamry modelo PCI-4 mediante las técnicas de curvas de polarización Tafel y espectroscopía de impedancia electroquímica, a temperatura ambiente, empleando una celda compuesta por un típico arreglo de tres electrodos: electrodo de trabajo con un área expuesta de 1 cm², un electrodo de referencia de Ag/AgCl y como contraelectrodo un alambre de platino, en una solución de NaCl al 3.5 peso % (ASTM B 209, 2007). Las mediciones de curvas de polarización Tafel se obtuvieron a una velo-

cidad de barrido de 0,125 mV/s en un rango de voltajes -200 mV hasta +1200 mV vs. Ecorr. Los diagramas de Nyquist se obtuvieron mediante barridos de frecuencia en el rango de 0,001 Hz hasta 100 KHz, con una amplitud de la señal sinusoidal de 10 mV (Aperador, 2010). Para la medida de espesores se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM) de alta resolución (JEOL JSM – 6490LV), en corte transversal, realizando un recubrimiento previo de oro.

Resultados: Morfología de los recubrimientos

El estudio realizado por SEM (figuras 1 y 2) se llevó a cabo a los recubrimientos H2 (los recubrimientos H1 muestran un comportamiento similar) y a la muestra patrón PP. Una vez las probetas son sometidas a 2000 horas en cámara salina acidificada su interfase recubrimiento sustrato no presenta ningún tipo de deterioro apreciable con respecto a la adherencia, ni disolución del sustrato por procesos corrosivos.

Las microfotografías por SEM permiten determinar el espesor de los recubrimientos y además las condiciones de las diferentes capas y sus respectivos espesores en los recubrimientos base resina Hetron 197-3 y poliéster (figuras 1 y 2). Sin embargo, para el recubrimiento H2 se aprecia un aumento en el espesor de la capa de resina antiácida de aproximadamente 50 µm luego de haberse sometido a 2000 horas de exposición en la cámara salina, lo cual se debe a la permeabilidad de la capa de resina poliéster y a una retención de humedad en la estructura molecular de la capa.

En las microfotografías del recubrimiento H2 se puede verificar el acomodamiento continuo y paralelo a la superficie de las escamas de vidrio que simulan la forma de un velo de superficie, potencializando con ello la barrera química del recubrimiento. Igualmente se observa una buena cohesión de la capa al sustrato a lo largo de toda la interfase aun a las 2.000 horas de exposición en cámara salina, lo cual corrobora un buen patrón de anclaje (entre el recubrimiento y el sustrato) a pesar de la alta viscosidad de la resina.

Figura 1

Microfotografías por SEM del recubrimiento H2. Exposición en cámara salina de (a) 0 horas y (b) 2.000 horas

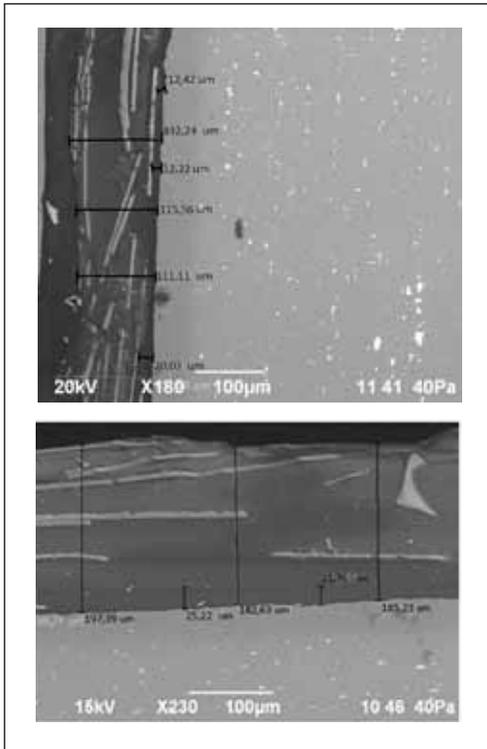
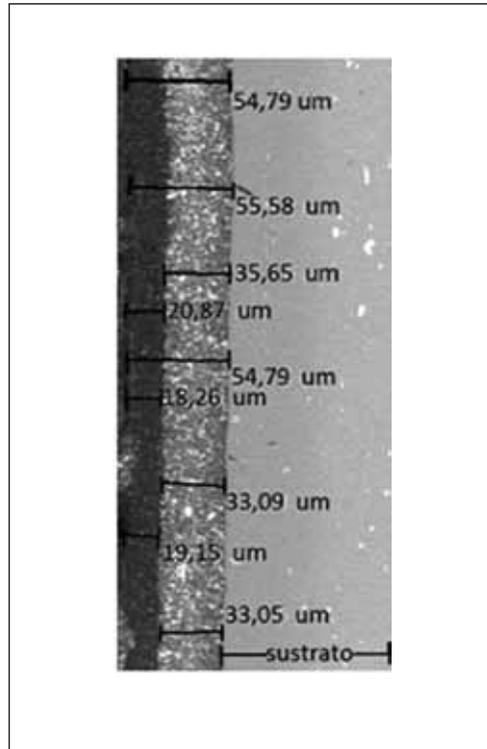


Figura 2

Microfotografía por SEM al recubrimiento PP (muestra patrón) luego de 2.000 horas de exposición en la cámara salina



Curvas de polarización Tafel y diagramas de Nyquist

En la Figura 3 se muestran las curvas de polarización Tafel correspondientes a los recubrimientos tipo poliuretano y resina antiácida poliéster (AH1, AH2 y PP). Las curvas de polarización fueron obtenidas a 0 horas y 2000 horas. Se encontraron los valores de las pendientes anódica y catódica en cada caso, los cuales se registran en la tabla 3, junto con los valores de densidad de corriente, potencial de corrosión y velocidad de corrosión para cada uno de los casos estudiados.

La velocidad de corrosión indica un buen desempeño de los recubrimientos en comparación con el sustrato, para 0 horas de exposición en la cámara salina. Los recubrimientos que presentan menor valor de densidad de corrosión son los denominados H con 1 y 2 capas, seguidos de los utilizados por la industria militar de aviación. Posteriormente se realizaron las medidas de curvas de polarización Tafel a las 2.000 horas de exposición al medio salino-acidificado. Se

puede observar el aumento en la velocidad a la corrosión de los recubrimientos y el sustrato, lo cual evidencia el efecto destructor del medio expuesto. También se distingue el efecto protector de los recubrimientos frente al sustrato en estas condiciones. Los menores valores de velocidad de corrosión los reportó $(9,03 \times 10^{-11} \text{ mpy})$ el recubrimiento PP. Sin embargo, los recubrimientos implementados en este estudio presentan un comportamiento similar al PP. La disminución tan alta en la resistencia a la corrosión en este tipo de recubrimientos se debe a la permeabilidad de la capa de resina poliéster y a una retención de humedad en la estructura molecular de la capa.

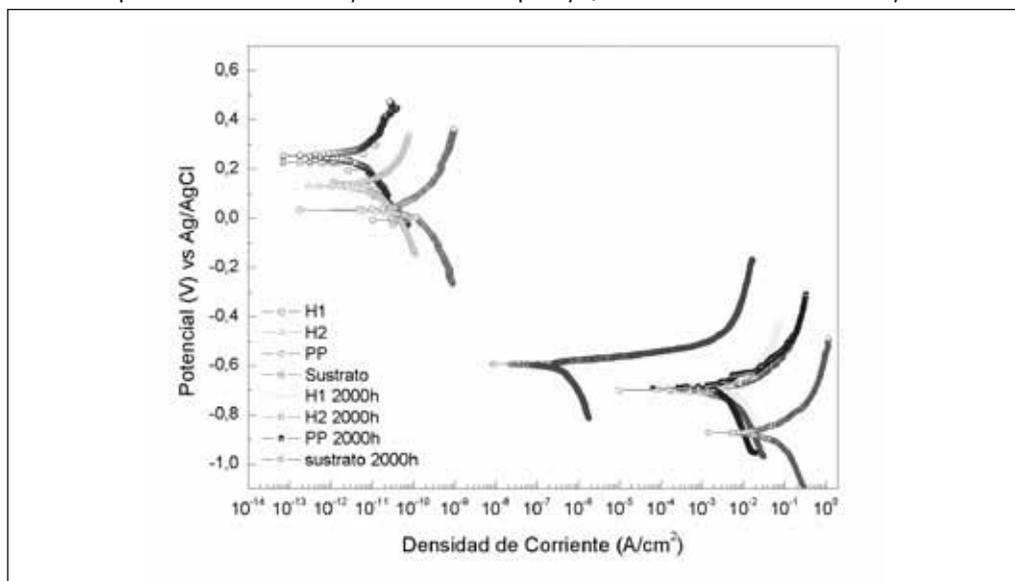
En la Tabla 3 y en la Figura 3 se observa la disminución del potencial de corrosión cuando se han sometido las probetas a un medio salino-acidificado durante 2.000 horas, lo que indica la corrosión activa generada. Los recubrimientos tipo PP y H generan un valor de potencial de corrosión similar. Al comparar este valor con el sustrato se observa el efecto protector frente a fenómenos de degradación de los recubrimientos. La densidad y velocidad de corrosión disminu-

Tabla 3
Parámetros electroquímicos generados a partir de las curvas de polarización Tafel

	Sustrato	H1	H2	PP	Sustrato 2000h	H1 2000h	H2 2000h	PP 2000h
Beta Anódico (V/decada)	$28,70 \times 10^{-3}$	145×10^{-3}	30×10^{-3}	387×10^{-3}	$497,1 \times 10^{-3}$	$79,80 \times 10^{-3}$	$510, \times 10^{-3}$	$239,7 \times 10^{-3}$
Beta Catódico (V/decada)	263×10^{-3}	245×10^{-3}	77×10^{-3}	389×10^{-3}	737,2	$178,9 \times 10^{-3}$	$475,0 \times 10^{-3}$	$371,5 \times 10^{-3}$
Corriente de corrosión (A/cm ²)	370×10^{-9}	121×10^{-12}	3.31×10^{-12}	210×10^{-12}	$38,30 \times 10^{-6}$	$1,790 \times 10^{-6}$	$13,30 \times 10^{-6}$	$40,90 \times 10^{-9}$
Potencial de Corrosión (mV)	-594	133.4	250	37,10	-686	-710	-740	-750
Velocidad de corrosión (mpy)	1.59×10^{-7}	1.05×10^{-12}	1.42×10^{-12}	9.03×10^{-11}	17,50	0,817	0,608	$18,68 \times 10^{-3}$

Figura 3

Curvas de polarización Tafel del sustrato y los recubrimientos tipo PP y H, evaluados en cámara salina a 0 horas y 2.000 horas



yen apreciablemente cuando se aplica la película protectora. La velocidad de corrosión disminuye en cinco órdenes de magnitud. Como resultado de exponer las probetas a la cámara salina durante las 2.000 horas se observa el aumento de la densidad y velocidad de corrosión en todos los casos evaluados, lo cual es más notorio para el sustrato. Sin embargo, se sigue manteniendo el efecto protector de los recubrimientos al corroborar estos resultados con los valores obtenidos para los potenciales de corrosión.

En la Figura 4 se muestra el diagrama de Nyquist correspondiente al sustrato y los recubrimientos tipo poliuretano y resina sintética, expuestos a 0 horas y 2.000 horas.

La formación de los espectros de impedancia en el diagrama de Nyquist, tanto para la probeta de la PP como para la H1 y H2, son gráficos conformados por dos semicírculos. Estos sistemas se encuentran representados por un circuito equivalente que se muestra en la Figura 5.

El circuito equivalente de la Figura 5 es aplicable para los recubrimientos expuestos en cámara salina a 0 horas y 2.000 horas. La diferencia se establece en la magnitud de los valores de resistencia a la polarización (R_{ct}). El parámetro de R_s representa la resistencia del electrolito para este caso de evaluación en solución salina (NaCl) acidificada, la cual corresponde a la resistencia entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia. En el caso de los recubrimientos de

Figura 4

Diagramas de Nyquist del sustrato y los recubrimientos tipo PP y H, evaluados en cámara salina a 0 horas y 2000 horas

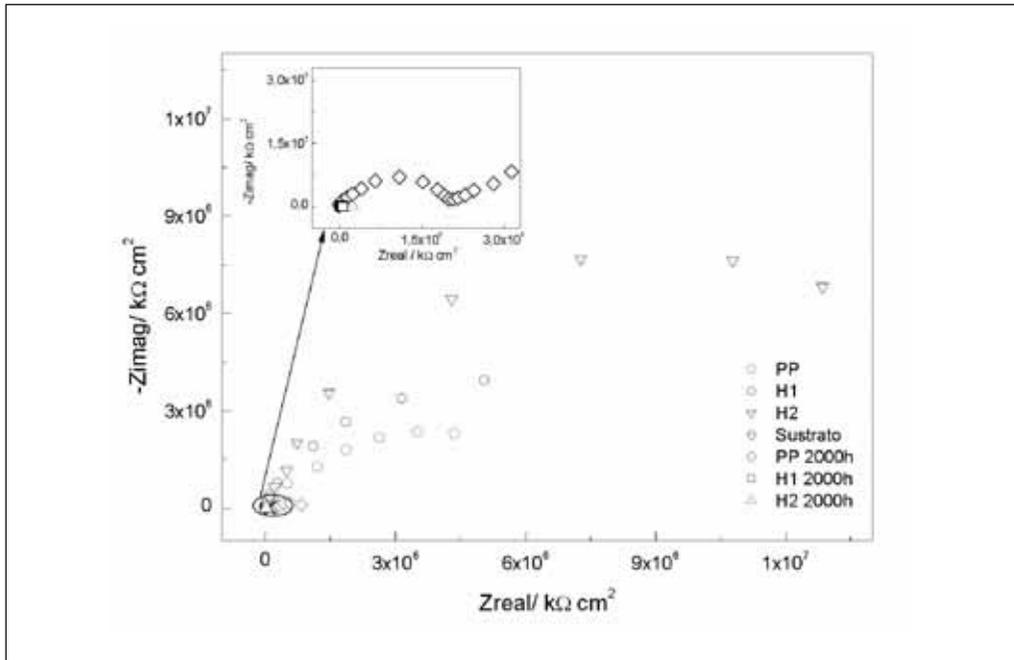
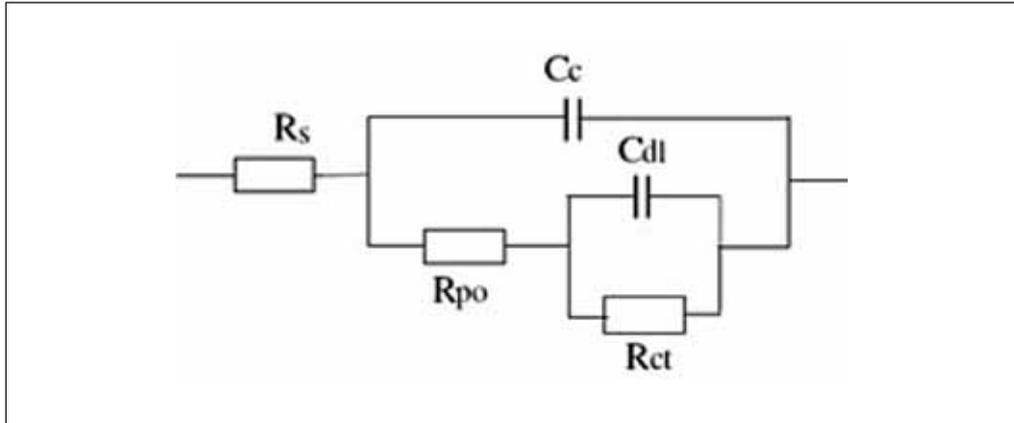


Figura 5

Circuito equivalente utilizado para explicar los diagramas Nyquist de los recubrimientos correspondientes a los recubrimientos H1, H2 y PP



interés H y PP su magnitud es pequeña: en el orden de $1 \times 10^5 \Omega$. C_c es la capacitancia de la capa del recubrimiento y R_{po} es la resistencia en la interface solución-recubrimiento. En el caso de los sistemas base pintura, hace referencia al recubrimiento conformado por el sistema Alodine 5700 primer epóxico y pintura de acabado, y en el caso de los sistemas H se refiere al sistema conformado por Alodine 5700, imprimante y resina antiácida Hetron197-3, en el cual el incremento en C_c es consecuente con una medida del nivel de degradación del recubrimiento. La disminu-

ción en R_{po} corresponde con el incremento en absorción de agua o permeabilidad del mismo. Diferenciar el aporte de cada una de las capas a la resistencia total frente a la corrosión es posible mediante EIS. Se deduce que el primer semicírculo hace referencia al aporte resistivo de los recubrimientos orgánicos (primer epóxico y resinas sintéticas), puesto que el aporte resistivo de los recubrimientos por conversión es relativamente pequeño comparado con los recubrimientos orgánicos y por lo tanto no se registra claramente su aporte en la impedancia en el sistema

de protección a la corrosión. A las 0 horas de exposición el valor de R_{po} del recubrimiento H con 1 y 2 capas se encuentra cerca de $1 \times 10^9 \Omega$ y el recubrimiento PP exhibe $1 \times 10^8 \Omega$; sin embargo, después de 2.000 horas de exposición el R_{po} de los recubrimientos H y PP disminuye a $1 \times 10^6 \Omega$. Además, el valor de PP es superior. Esto indica que la permeabilidad se incrementa drásticamente en el recubrimiento H en comparación con el recubrimiento PP, y se refleja igualmente en la disminución de la resistencia a la polarización y en la cinética de la corrosión, ya que al permear el recubrimiento las especies iónicas llegan a la interfase recubrimiento-sustrato, disminuyen la resistencia a la polarización e incrementan la velocidad de corrosión; este comportamiento es análogo al hallado en las curvas de polarización Tafel. El Cdl es la capacitancia de la doble capa y su incremento es un indicador de la pérdida de adherencia del recubrimiento (Osborne, 2001). El Rct simboliza la resistencia a la transferencia de carga (resistencia a la polarización) asociado con la cinética del proceso de corrosión. Este parámetro es proporcionalmente inverso a la velocidad de corrosión y al área de ocurrencia de oxidación (Reynolds, 1997). Por consiguiente, los sistemas de recubrimiento tienen un buen desempeño como sistema protector a la corrosión con respecto al sustrato, debido a los altos valores de R_{po} y Rct y bajos valores Cc y Cdl tanto a 0 horas como a 2.000 horas de exposición en la cámara salina.

Conclusiones

Según las curvas de polarización Tafel y los diagramas de Nyquist, los recubrimientos de resina antiácida poliéster presentan el menor valor de corriente y velocidad de corrosión con respecto al sistema tradicionalmente utilizado en la industria aeronáutica a las 0 horas.

A 2.000 horas de exposición el sistema de las PP presenta una menor caída en la corriente de corrosión frente al sistema H, lo cual se debe a la mayor permeabilidad de humedad que permite la resina de poliéster.

El efecto del espesor en los recubrimientos base resina antiácida poliéster no es significativo (velocidades de corrosión de $H1=0,817$ y $H2=$

$0,608$) en cuanto a los resultados de velocidad de corrosión, cuando hay un incremento del espesor alrededor de las 100 micras, pasando de una capa de 100 (1 capa) a 200 micras (2 capas) aproximadamente.

Las técnicas de caracterización por SEM confirman que después de 2.000 horas en cámara salina acidificada la adherencia y la interface sustrato recubrimiento en los sistemas de las PP y H no presentan deterioro visible.

Bibliografía

- AIRFRAME, Hanbook (1999). *Airframe & Powerplant Mechanics*. Department of transportation. Federal Aviation Administration. U.S.
- APERADOR, W., VERA, E. and VARGAS, A. (2010) “Estudio de la resistencia a la corrosión electroquímica de electro-recubrimientos níquel/cobre obtenidos por corriente pulsante”. *Ingeniería & Desarrollo*. Vol. 27(2). pp. 48-61. Barranquilla. Universidad del Norte.
- ASTM B209 -07 (2007). Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate. West Conshohocken: PA. American Society for Testing and Materials.
- ASTM B117 - 09 (2008). Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. West Conshohocken: PA. American Society for Testing and Materials.
- ASM, Hanbook (2005). *Metallography and Microstructures*. ASM international the materials information society.
- ATTA, A, M.; ELSAEED, A, M. (2006). “New Vinyl Ester Resins Based on Rosin for Coating Applications”. *Reactive & Functional Polymers*. Vol. 66(6). pp. 1596–1608.
- ATTA, A, M.; ELSAEED, A, M. (2007). “Unsaturated Polyester Resins Based on Rosin Maleic Anhydride Adduct as Corrosion Protections of Steel”. *Reactive & Functional Polymers*. Vol. 67(3). pp. 549–563.
- ATTA, A, M.; NASSAR, I. F. (2007). “Unsaturated polyester resins based on rosin maleic anhydride adduct as corrosion protections of steel”. *Reactive & Functional Polymers*. Vol. 67(4). pp. 617–626.

- BIERWAGEN, G.P.; TALLMAN, D.E. (2001). "Choice and measurement of crucial aircraft coatings system properties". *Progress in Organic Coatings*. Vol. 41(2). pp: 201–216.
- BUCHHEIT, R.G.; GUAN, H. (2003). "Active corrosion protection and corrosion sensing in chromate-free organic coatings". *Progress in Organic Coatings*. Vol. 47(4). pp. 174–182.
- ESTCP, reporte (2004). *Non-Chromate Aluminium Pretratments*. Environmental Security Technology Certification Program.
- NEUDER, H.; SIZEMORE, C. "Chrome-Free Single-Step In-Situ Phosphatizing Coatings on a Ti-6Al-4V Titanium Alloy". *Progress in organic coatings*. Vol. 47(3). pp. 307 -311.
- OÑATE, A. E. (1991). *Las Aeronaves y sus Materiales. Tecnología Aeronáutica*. Madrid: Paraninfo.
- OSBORNE, J. H. (2001). "Inorganic/organic hybrid coatings for aircraft aluminum alloy substrates". *Progress in Organic Coatings*. Vol. 41(4). pp. 217-225.
- REYNOLDS, L.B.; TWITE, R. (1997). "Preliminary evaluation of the anticorrosive properties of aircraft coatings by electrochemical methods". *Progress in Organic Coatings*. Vol. 32(3). pp. 31-34.
- SANCHEZ-AMAYA, J.M.; OSUNA, R.M. (2007). "Monitoring the degradation of a high solids epoxy coating by means of EIS and EN". *Progress in Organic Coatings*. Vol. 60 (4). pp. 248–254.
- SATHIYANARAYANAN, S.; AZIM, S. (2008). "A new corrosion protection coating with polyaniline–TiO₂ composite for steel". *Electrochimica Acta*. Vol. 53(6). pp. 2087–2094.
- TWITE, R.L.; BIERWAGEN, G. P. (1998) "Review of alternatives to chromate for corrosion protection of aluminum aerospace alloys". *Progress in organic coatings*. Vol. 33 (2), pp. 91-100.