

Evaluación de la corrosión de un duraluminio en mezclas de gasolina y bioetanol¹

Evaluation of the Corrosion of Duralumin in Gasoline and Bioethanol Blends²

Avaliação da corrosão de um duralumínio em misturas de gasolina e bioetanol³

Código SICI: 0123-2126(201206)16:1<9:ECDMGB>2.3.TX;2-J

Darío Yesid Peña-Ballesteros⁴
Hugo Armando Estupiñán-Durán⁵
Custodio Vásquez-Quintero⁶

¹ Fecha de recepción: 17 de febrero de 2011. Fecha de aceptación: 21 de octubre de 2011. Este artículo se deriva de un proyecto financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, llevado a cabo por el Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales y por el Grupo de Investigaciones en Corrosión de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, y la Universidad Industrial de Santander.

² Submitted on February 17, 2011. Accepted on October 21, 2011. Developed by the research groups Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia; and Grupo de Investigaciones en Corrosión, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. This article was funded by the Vicerrectoría de Investigaciones y Extensión, Universidad Industrial de Santander.

³ Data de recepção: 17 de fevereiro de 2011. Data de aceitação: 21 de outubro de 2011. Este artigo deriva de um projeto financiado pela Pró-reitoria de Pesquisas e Extensão da Universidade Industrial de Santander, Bucaramanga, Colômbia, realizado pelo Grupo de Pesquisa em Ciência e Tecnologia de Materiais e pelo Grupo de Pesquisas em Corrosão da Universidade Nacional da Colômbia, sede Medellín, e a Universidade Industrial de Santander.

⁴ Ingeniero metalúrgico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Magíster en Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander. Doctor en Corrosión, University of Manchester Institute of Science and Technology, Inglaterra. Profesor asociado, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: dypena@uis.edu.co.

⁵ Ingeniero metalúrgico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Magíster en Ingeniería, Universidad Industrial de Santander. Doctor en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander. Profesor asistente de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: haestupinand@unal.edu.co.

⁶ Ingeniero metalúrgico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Magíster en Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander. Profesor titular, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: custodio@uis.edu.co.

Resumen

Actualmente, diversos países utilizan el etanol como combustible de automoción. Sin embargo, este biocombustible resulta nocivo para las piezas metálicas del sistema de combustible de un automotor. En el presente trabajo se determinó la velocidad de corrosión del duraluminio, material usado para fabricar pistones de motores, en mezclas de bioetanol-gasolina con concentraciones del 5% al 20%, mediante espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), polarización tafel y gravimetría. Se demostró que el proceso de corrosión fue de control mixto con tendencia a la corrosión localizada. En general, se observó que la velocidad de corrosión del duraluminio disminuye con el tiempo de exposición.

Palabras clave

Electroquímica-técnicas, mezclas, gases de combustión-medición, duraluminio, anomalías gravimétricas, corrosión en aleaciones-pruebas.

Abstract

Nowadays, different countries use ethanol as a self-propulsion fuel. However, this biofuel is aggressive for metal parts in the fuel system of an automobile. In this study, we determined the corrosion rate of duralumin, a material used in the production of piston engines, in ethanol-gasoline blends at concentrations of 5 to 20%, through electrochemical impedance spectroscopy (EIS), Tafel polarization and Gravimetry. It was shown that the corrosion process control was mixed with a tendency towards localized corrosion. It is generally observed that the corrosion rate of duralumin decreases during the exposure time.

Keywords

Electrochemistry - technical, mixtures, combustion gases - mensuration, duralumin, gavity anomalies, alloys corrosion.

Resumo

Atualmente, diversos países utilizam o etanol como combustível de auto-moção. Porém, este biocombustível é nocivo para as peças metálicas do sistema de combustão de um automotor. No presente trabalho determinou-se a velocidade de corrosão do duralumínio, material usado para fabricar pistões de motores, em misturas de bioetanol-gasolina com concentrações de 5% a 20%, mediante espectroscopia de impedância electroquímica (EIE), polarização tafel e gravimetria. Demonstrou-se que o processo de corrosão foi de controle misto com tendência à corrosão localizada. Em geral, observou-se que a velocidade de corrosão do duralumínio diminui com o tempo de exposição.

Palavras chave

Eletroquímica-técnicas, misturas, gases de combustão-medição, duralumínio, anomalias gravimétricas, corrosão em ligas-provas.

Introducción

En condiciones normales de uso, los materiales metálicos están siempre sujetos a corroerse. Por esto, los componentes metálicos que trabajan con combustibles son fabricados en metales resistentes o adecuadamente protegidos para garantizar o extender su vida útil (Horta, 2004). Particularmente con relación al *gasohol*, término empleado para definir la mezcla entre alcohol y gasolina, los metales considerados en riesgo de dañarse por degradación son: el acero, las aleaciones para fundición por presión (tipo Zamac) y las aleaciones de aluminio (Owen y Coley, 1995).

La adición de etanol a la gasolina acelera la velocidad de corrosión del acero y demás materiales que componen el automotor que están en contacto con la mezcla, principalmente debido a la presencia de agua y ácidos orgánicos en la mezcla. Los problemas también pueden agravarse si se da una separación de fases del gasohol, que produce una fase acuosa con algún contenido alcohólico, que tiende a ser más corrosiva que el propio gasohol. Por otra parte, se ha determinado que la corrosividad de mezclas de etanol y gasolina es directamente proporcional a la concentración alcohólica (Horta, 2004).

El etanol, obtenido a partir de biomasa, surge como la mayor fuente de energía renovable y se espera que esta tendencia continúe en el futuro, dados los condicionantes de precios relativamente bajos de los granos y el aumento de los precios del petróleo y la gasolina. Al evaluar la corrosión de los materiales expuestos a las mezclas, se puede evitar impactos negativos de la mezcla en el parque automotor con el fin de aumentar su vida útil y no afectar a los usuarios, y de esta manera garantizar el éxito y confirmar la viabilidad del uso de las mezclas especificadas en los automóviles.

Actualmente, en Colombia y el resto del mundo se están utilizando mezclas de gasolina-bioetanol hasta el 10%, a excepción de Brasil. La principal razón para esta tendencia se basa en la incompatibilidad de las mezclas de bioetanol con los materiales de los motores diseñados exclusivamente para gasolina. Con relación

a otras partes del motor, se presentan problemas de corrosión en el carburador, la bomba de combustible, las mangueras de conducción de combustible, el filtro y el tanque de combustible (Corte y Solano, 1982).

Este trabajo pretendió aportar conocimiento sobre la corrosión de materiales, específicamente para diagnosticar factores influyentes en el comportamiento electroquímico del duraluminio presente en el automotor al contacto con diferentes mezclas de bioetanol-gasolina, también esperando evaluar la susceptibilidad a la corrosión intergranular o localizada, incrementada por la concentración de bioetanol en la mezcla.

1. Procedimiento experimental

Mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (EFR-X) con un equipo Shimadzu EDX 800 HS se determinó que la composición de la aleación de duraluminio empleada fue: 90,114% Al; 4,324% Zn; 3,501% Mg; 1,057% Cu; 0,496% Si; 0,208% Fe; 0,204% Cr, y 0,040% Mn. Los ensayos gravimétricos y electroquímicos fueron realizados según la norma ASTM D4806-09 (2009). Se prepararon mezclas de bioetanol-gasolina al 5%, 10%, 15% y 20% v/v de bioetanol, denominadas E-5, E-10, E-15 y E-20, respectivamente, y bioetanol puro (E-100).

Los ensayos gravimétricos se realizaron de acuerdo con el estándar ASTM G31-90 (1999), con un tiempo total de inmersión de veintiocho días a temperatura ambiente, reemplazando las mezclas de los ensayos cada cuatro días, para evitar variaciones de concentración. Cada siete días se monitoreó el peso de las probetas y la evaporación de la mezcla, para evitar también de esta forma que cambiara la concentración del medio. Todos los ensayos se realizaron por duplicado. Los ensayos electroquímicos se realizaron en una celda plana de vidrio sellada lo más herméticamente posible, utilizando un electrodo de Ag/AgCl, como electrodo de referencia, una lámina de platino y una varilla de platino de alta pureza como contraelectrodos.

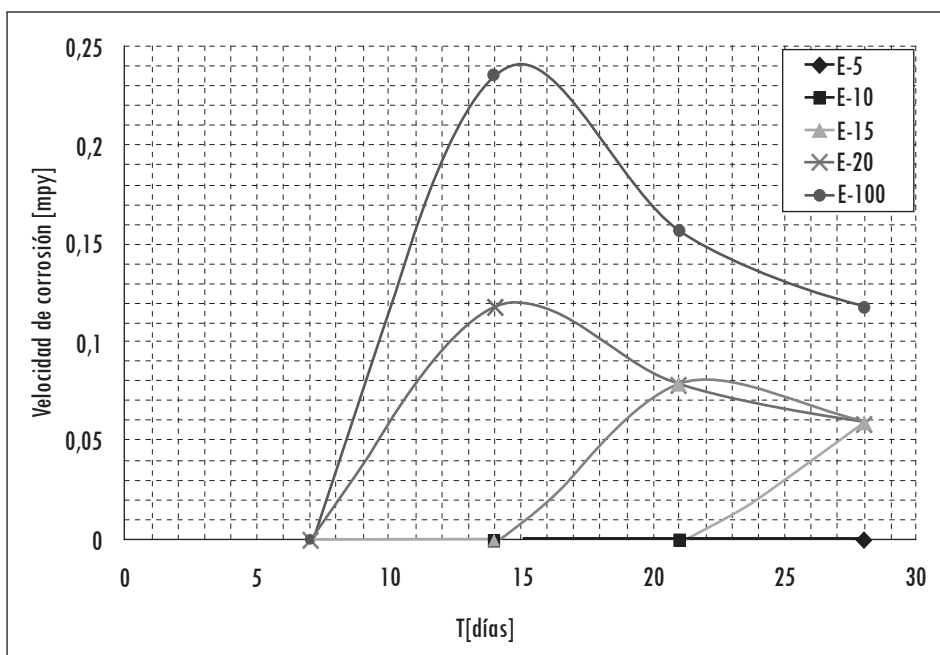
El área de exposición de las probetas fue de 1 cm². Para la obtención de datos, los electrodos fueron conectados a un potenciostato marca ACM GILL, con un *software* ACM versión 5.0 con secuenciador. Las técnicas electroquímicas empleadas fueron espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) en el rango de frecuencia de barrido de 30.000 Hz a 1 Hz, una amplitud de 10 mV y con un tiempo de estabilización de 300 s. Las curvas de polarización de Tafel se realizaron con un barrido de potencial desde -250 mV hasta 250 mV, respecto al potencial de corrosión (E_{corr}), a una velocidad de barrido de 60 mV/min.

La curva de polarización potenciodinámica fue obtenida polarizando desde -250 mV hasta 2500 mV con respecto al potencial libre de corrosión (E_{corr}) y a una velocidad de barrido de 100 mV/min.

2. Resultados experimentales

En la figura 1 se observa la pérdida de peso de las probetas de duraluminio durante el tiempo total de inmersión. Se observa que en la mayor concentración de bioetanol (E-100) existe un aumento significativo en la pérdida de peso al transcurrir el tiempo, en comparación con las otras mezclas de gasolina-bioetanol analizadas. Este comportamiento se debe a que el bioetanol, al ser higroscópico, absorbe mayor cantidad de agua, lo cual acelera los procesos de corrosión.

Figura 1. Pérdida de peso de las probetas a diferentes tiempos de exposición



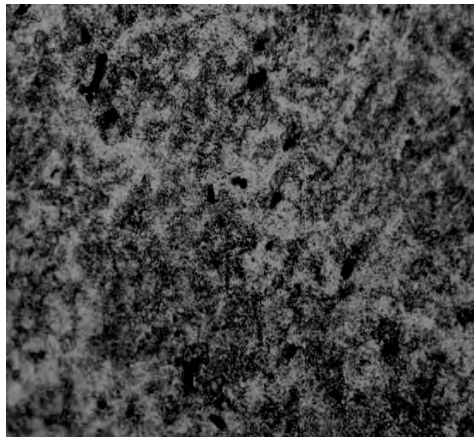
Fuente: presentación propia de los autores.

Para las mezclas E-15 y E-20 se observa que, a tiempos de inmersión de veintiún y catorce días existe poca pérdida de peso. Esto se debe a que la capa protectora y pasiva que se forma en esta aleación se ha podido consolidar suficientemente a estos tiempos de exposición, pues presenta una protección

suficiente para que no se degrade significativamente el material (Vega et ál., 2007). Las velocidades más bajas de corrosión se presentaron en las mezclas al E-5 y E-10, que se mantienen casi constantes, desde el séptimo día y hasta el final del experimento. Ello indica una importante protección de los productos de corrosión a estas concentraciones. Las curvas demuestran que no hubo una linealidad con el tiempo, lo cual indica que la cinética de la corrosión del material en estudio fue prácticamente dependiente del crecimiento de los productos de corrosión en la superficie expuesta.

En la figura 2 se observa que la microestructura del duraluminio presenta unos granos de forma irregular. También se observan otras fases de un color oscuro situadas en las fronteras de grano y dentro de los granos, precipitados de $MgZn_2$, que confirman lo revisado en la bibliografía (Ruiz, 1993). Esto fue confirmado mediante análisis de un microscopio electrónico de barrido-espectroscopía de energía dispersiva (SEM-EDS, por su sigla en inglés) (figura 3).

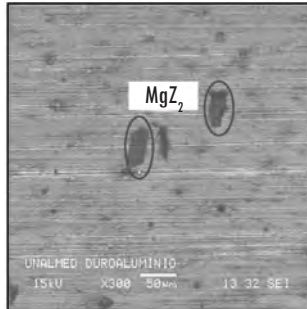
Figura 2. Microestructura del duraluminio a 1000X



Fuente: presentación propia de los autores.

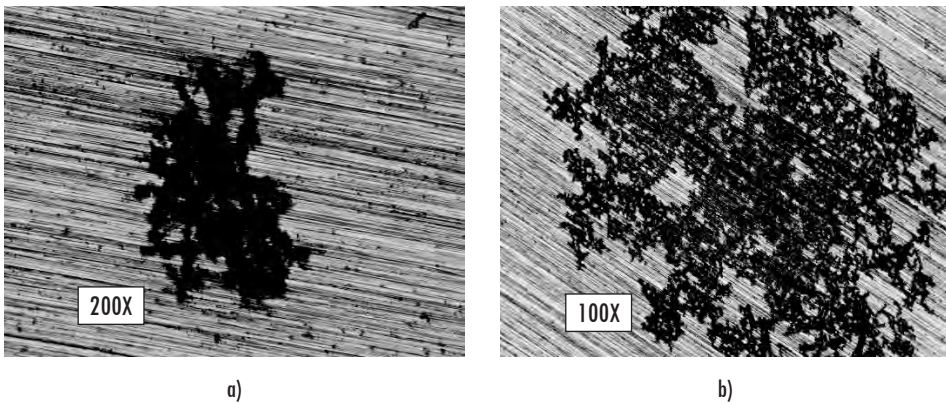
Para el duraluminio en contacto con las mezclas E-5, E-10 y E-15 no se observó ningún cambio en la microestructura; sin embargo, para las mezclas E-20 y E-100 aparecieron indicios de corrosión (figura 4), originados por la presencia de varias fases, de las cuales el $MgZn_2$ se comporta como una zona anódica que hace susceptible al material a presentar corrosión localizada intergranular (Picas et ál., 2006; Mears, 1948).

Figura 3. Morfología de la superficie del duraluminio tomada por SEM, donde se observan los precipitados de MgZ_2



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 4. Micrografía del duraluminio expuesto durante veintiocho días a las mezclas: a) E-20 y b) E-100



Fuente: presentación propia de los autores.

Mediante análisis SEM se encontró que una mayor cantidad de productos de corrosión se presentaron sobre la superficie de las probetas expuestas a E-100 (figura 5). El análisis con EDS permitió determinar la composición de estos productos (tabla 1).

Figura 5. Morfología tomada mediante SEM del duraluminio a veintiocho días en E-100 donde se observaron los productos de corrosión



Fuente: presentación propia de los autores.

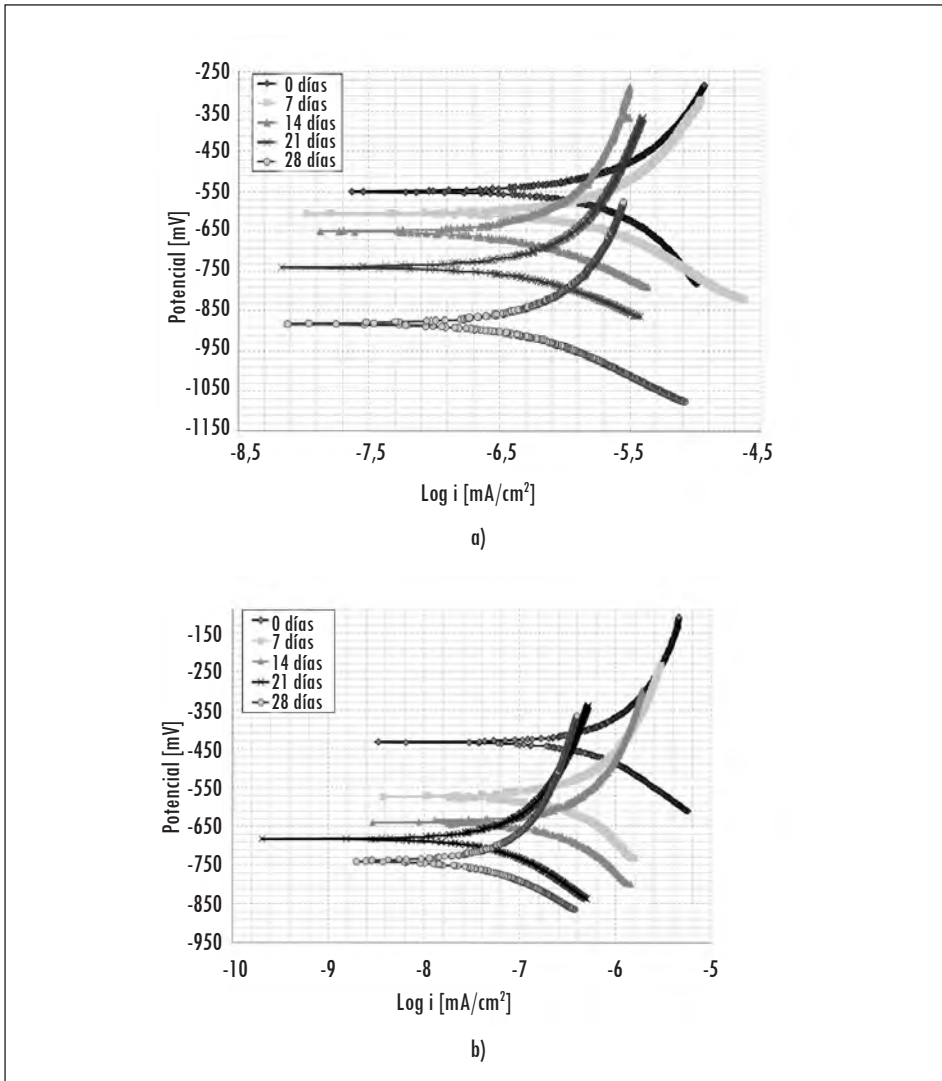
Tabla 1. Composición de los productos de corrosión detectados sobre el duraluminio expuesto a E-100 durante veintiocho días, mediante análisis SEM-EDS

Elemento	Porcentaje peso	Porcentaje atómico
C	8,41	17,37
O	2,75	4,26
Mg	1,73	1,77
Al	80,72	74,18
Zn	6,38	2,42

Fuente: presentación propia de los autores.

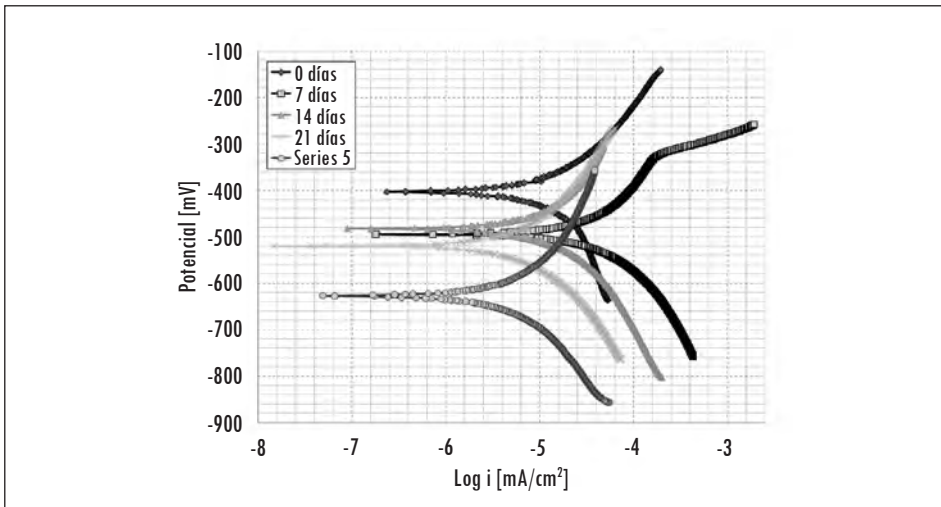
Según se observa en la tabla 2 y en las figuras 6 y 7, el ataque corrosivo se incrementó con la disminución en la concentración de gasolina en las mezclas, pero decreció con el tiempo de exposición de las probetas en el electrolito. Por otra parte, el potencial de corrosión se hizo más negativo con el tiempo de exposición y decayó hacia la región de potenciales activos, lo cual aumentó la tendencia termodinámica a la corrosión. La densidad de corriente disminuyó con el tiempo, fenómeno atribuido a componentes tensoactivos del electrolito que hacen que el sistema resultante tienda a presentar una disminución de la corriente.

Figura 6. Curvas de Tafel para el duraluminio en mezclas bioetanol-gasolina a diferentes tiempos de inmersión en a) E-15 y b) E-20



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 7. Curva de Tafel para el duraluminio en E-100 para diferentes tiempos de inmersión



Fuente: presentación propia de los autores.

La tabla 2 presenta los datos obtenidos mediante la técnica de Tafel y según la norma ASTM G102-89 (1999). Los resultados muestran una influencia fuerte de la variable tiempo en la formación de la película de óxido que protege la superficie del duraluminio haciéndolo más resistente a la corrosión.

Tabla 2. Valores de los parámetros determinados mediante la técnica de polarización de Tafel

Mezcla	Tiempo	Densidad de I ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Veloc. corros. (mpy)
E-15	T_1	$8,0127 \times 10^{-4}$	$3,5564 \times 10^{-4}$
	T_2	$4,1344 \times 10^{-4}$	$1,8350 \times 10^{-4}$
	T_3	$3,1178 \times 10^{-4}$	$1,3838 \times 10^{-4}$
	T_4	$8,2178 \times 10^{-5}$	$3,6474 \times 10^{-5}$
	T_5	$7,6722 \times 10^{-5}$	$3,4053 \times 10^{-5}$
E-20	T_1	$2,3914 \times 10^{-3}$	$1,0614 \times 10^{-3}$
	T_2	$1,8984 \times 10^{-3}$	$8,4260 \times 10^{-4}$
	T_3	$5,2204 \times 10^{-4}$	$2,3171 \times 10^{-4}$
	T_4	$5,8559 \times 10^{-4}$	$2,5991 \times 10^{-4}$
	T_5	$2,5049 \times 10^{-4}$	$1,1118 \times 10^{-4}$
E-100	T_1	$1,4210 \times 10^{-2}$	$6,3071 \times 10^{-3}$
	T_2	$5,1383 \times 10^{-2}$	$2,2806 \times 10^{-2}$
	T_3	$1,3662 \times 10^{-2}$	$6,0638 \times 10^{-3}$
	T_4	$5,8830 \times 10^{-3}$	$2,6112 \times 10^{-3}$
	T_5	$6,6177 \times 10^{-3}$	$2,9373 \times 10^{-3}$

Fuente: presentación propia de los autores.

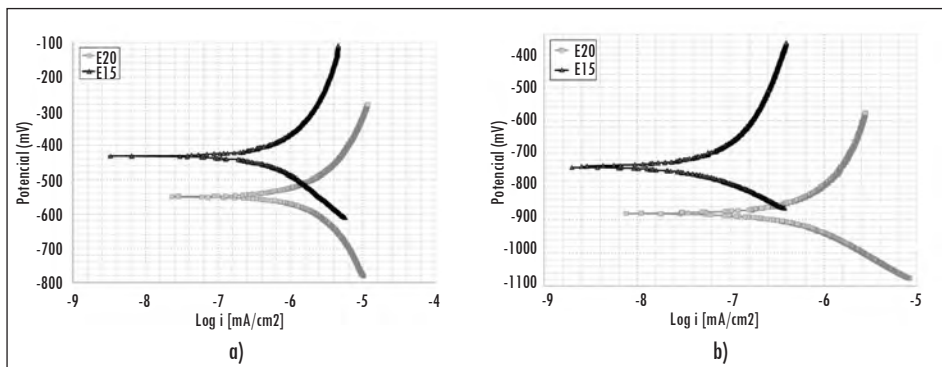
Para el cálculo de los valores de mpy se utilizó la ecuación 1 (ASTM, 1999):

$$CR = k_1 \frac{icorr}{\rho} EW (mpy) \quad (1)$$

Donde: CR : velocidad de corrosión
 k_1 : constante 0,1288 (mpy \times g/ μ A \times cm)
 ρ : 2,78 g/cm³
 icorr : densidad de corriente (μ A/cm²)
 EW : peso equivalente 9,58

En la figura 8a se observa que el proceso está controlado por difusión o transferencia de masa y por activación. La mezcla E-20 con la mayor velocidad de corrosión es la condición más agresiva, lo que supone la disolución de los productos de corrosión. En los resultados de la tabla 2 (figura 8b) se observa que para un tiempo de veintiocho días, el duraluminio en las mezclas de E-15 y E-20 tiende a ser más activo, lo cual indica que la capa pasiva es termodinámicamente inestable.

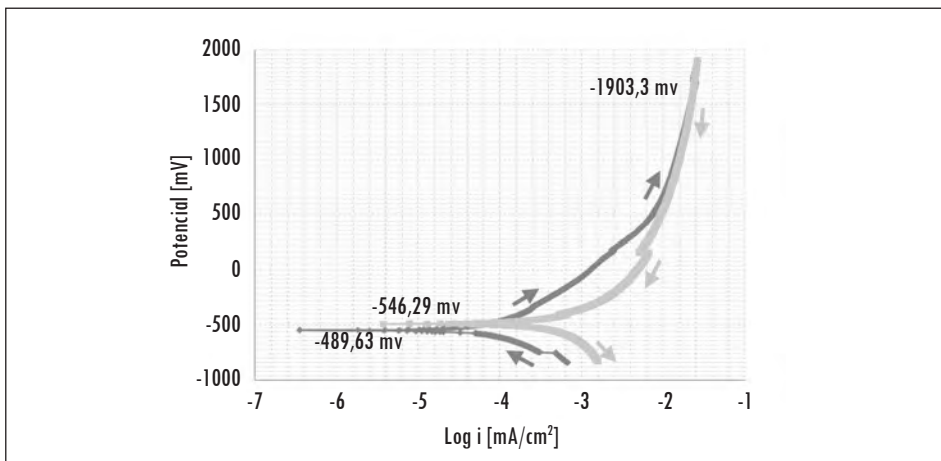
Figura 8. Curvas de Tafel para el duraluminio a diferentes concentraciones de bioetanol: a) T₁ y b) T₅



Fuente: presentación propia de los autores.

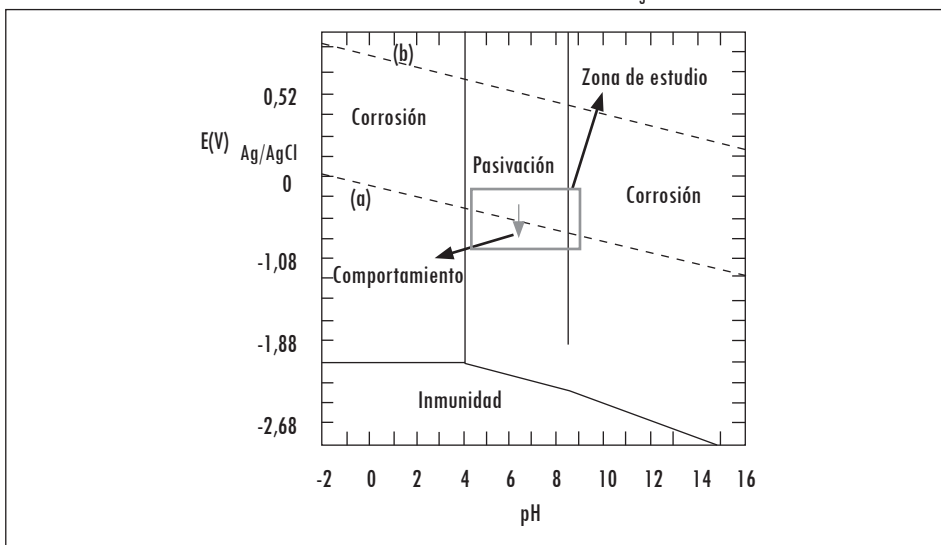
Es difícil determinar los potenciales de picadura de la curva de polarización cíclica (figura 9), debido a que prevalece la estabilidad en la película pasiva en la superficie del material. Con ayuda del diagrama de Pourbaix (figura 10), se pudo determinar una zona de pasivación, teniendo en cuenta la variación de los potenciales de las curvas de polarización y el rango de pH de las mezclas, donde a medida que aumenta el tiempo de exposición, los potenciales de las mezclas se desplazan a valores más negativos, menos nobles, pero más cerca de la zona de inmunidad.

Figura 9. Curva potenciodinámica para la concentración E-100



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 10. Diagrama de Pourbaix con las regiones de corrosión, pasivación e inmunidad, asumiendo pasivación por una película $Al(OH)_3$



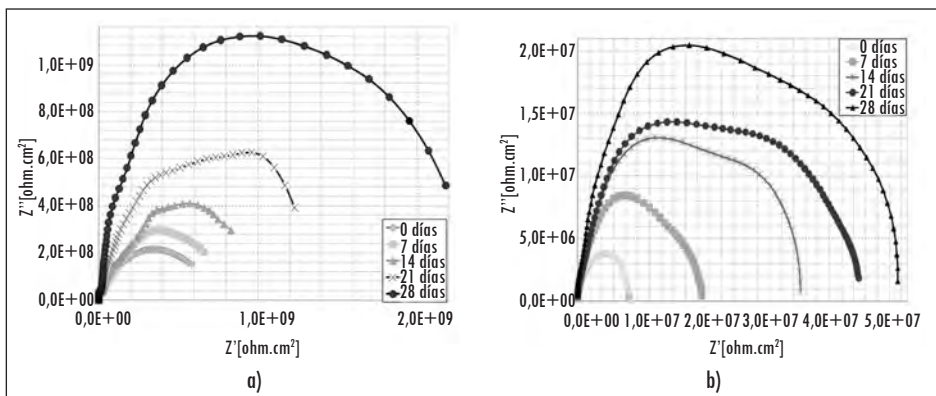
Fuente: presentación propia de los autores.

La figura 11 muestra los espectros de Nyquist obtenidos en la mezcla E-5 y E-20 a diferentes tiempos de exposición. Estos indican que la interface de duraluminio-mezcla presentó un comportamiento electroquímico diferente en las mezclas, en función del tiempo de inmersión. De esta manera, el espectro

obtenido en el tiempo inicial, cero días para ambas mezclas, muestra valores de impedancia inferiores a los obtenidos con los demás tiempos de inmersión, que favorecen el proceso de corrosión, debido a la presencia de una capa pasiva inestable y de baja porosidad al inicio de la corrosión. Ello permite el intercambio de iones. Esta capa pasiva, principalmente de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Díaz et ál., 2009), es más resistente en el material, con el aumento del tiempo de exposición.

En los espectros de Nyquist de la figura 11b se observan semicírculos en forma irregular, con un aumento en su diámetro (mayor resistencia a la polarización) con el tiempo de exposición. Un mayor contenido de bioetanol en la mezcla presentó una disminución notable en la resistencia a la polarización. Una importante característica de estas curvas de impedancia es que corroboran las medidas potenciodinámicas, en las cuales a mayores tiempos de exposición, se observa la formación de una capa de óxido más compacta, de baja conductividad iónica que representa una velocidad de corrosión baja.

Figura 11. Diagrama de Nyquist para el duraluminio a diferentes tiempos de inmersión a) E-5 y b) E-20

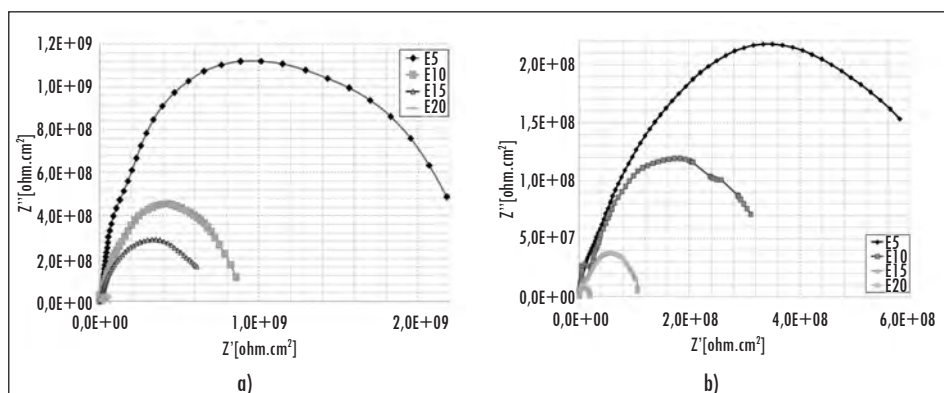


Fuente: presentación propia de los autores.

En la figura 12 se muestra el diagrama de Nyquist para el duraluminio en mezclas de bioetanol-gasolina a cero y veintiocho días. En estas condiciones se observa que los diámetros de los semicírculos se hacen menores, tendencia a formar un círculo completo a rango de frecuencias menores (z real); esto indica que la adición de bioetanol a la mezcla aumenta la velocidad de corrosión y que se presenta una disminución de la resistencia a la transferencia de carga. Según lo anterior, los productos de corrosión son inestables y ocurre la misma tendencia en los demás tiempos de inmersión.

En general, los espectros de las mezclas E-15 y E-20 presentaron una tendencia a formar un semicírculo, lo cual está relacionado con un proceso controlado por transferencia de carga, donde se presentan procesos de intercambio electrónico en la doble capa entre el electrodo de trabajo duraluminio y la mezcla bioetanol-gasolina (Torres et ál., 2009); mientras que los espectros de las mezclas E-5 y E-10 presentaron una mayor amplitud y tendencia a un círculo no ideal, lo cual indica que la película de óxido tiende a ser más capacitiva con mayor resistencia a la polarización. La presencia de dos arcos para el E-10 (figura 12b) muestra que el primero a altas frecuencias está relacionado con la carga de la doble capa eléctrica en paralelo con la resistencia de transferencia de carga y el segundo como un arco capacitivo a bajas frecuencias relacionado con procesos de absorción de especies.

Figura 12. Diagrama de Nyquist para el duraluminio en las diferentes mezclas de bioetanol-gasolina a) cero días y b) 28 días

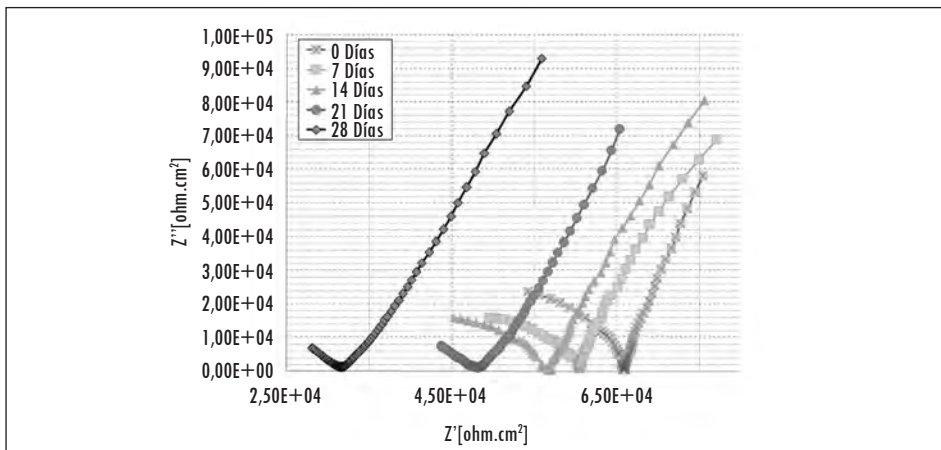


Fuente: presentación propia de los autores.

En la figura 13 se observan los diferentes espectros de impedancia para E-100, donde se presenta un pequeño semicírculo a alta frecuencia y una línea recta a baja frecuencias, que corresponde a un comportamiento típico de una reacción controlada por difusión. El semicírculo pequeño puede indicar que la reacción de transferencia de carga electroquímica anódica y catódica a través de la capa de óxido puede ocurrir fácilmente y donde la velocidad de dicha transferencia no es limitante para el proceso de difusión. Para tiempos de inmersión mayores (veintiún días y veintiocho días) se observa un desplazamiento del semicírculo pequeño a rangos de frecuencias menores sobre el eje real que indica una disminución en la resistencia a la solución y que el duraluminio

presenta una corrosión rápida debido a la formación de una capa de óxido, la cual pierde su capacidad protectora (Torre et ál., 2009).

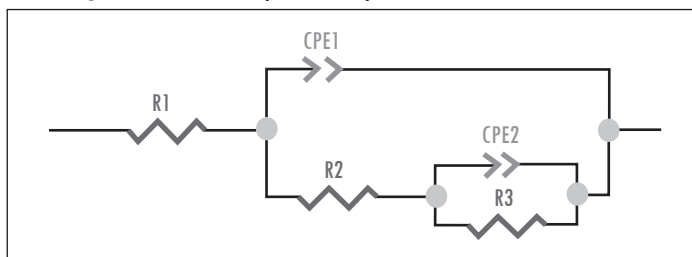
Figura 13. Diagrama de Nyquist para el duraluminio en E-100 a diferentes tiempos de inmersión



Fuente: presentación propia de los autores.

Tomando como base el análisis anterior, se propuso un modelo de circuito equivalente para tratar de interpretar el significado del sistema electroquímico, el cual fue válido para todos los espectros de impedancia. La figura 14 muestra el circuito equivalente que consta de R_1 , que es la resistencia de la solución (mezcla bioetanol-gasolina); un elemento de fase constante $(CPE)_1$, que es la capa externa de la capacitancia e incluye la capa pasiva de los productos de corrosión y que está en paralelo con R_2 , que es la resistencia de la capa pasiva. $(CPE)_2$ es la capacitancia y R_3 es la resistencia a la transferencia de carga (Mendoza et ál., 2002). Este modelo del circuito equivalente fue usado para ajustar los espectros EIE experimentales del sistema electroquímico bioetanol-gasolina.

Figura 14. Circuito equivalente para los sistemas estudiados



Fuente: presentación propia de los autores.

En la tabla 3 se muestran los valores de resistencia y capacitancia obtenidos de los circuitos.

Tabla 3. Valores de resistencia y capacitancia para el modelo de los sistemas estudiados

Mezcla	R_1 ($\text{Ohm} \cdot \text{cm}^2$)	CPE (F) CPE_1		R_2 ($\text{Ohm} \cdot \text{cm}^2$)	CPE (F) CPE_2		R_3 ($\text{Ohm} \cdot \text{cm}^2$)
		CPE -T CPE_{1T}	CPE -P CPE_{1P}		CPE -T CPE_{2T}	CPE -P CPE_{2P}	
E-5	$3,83E^{05}$	$1,8731E^{-11}$	0,96026	$8,3926E^{07}$	$1,7946E^{-10}$	0,65423	$6,2744E^{08}$
E-10	$3,53E^{05}$	$1,7957E^{-11}$	0,97038	$1,5498E^{08}$	$5,7181E^{-11}$	0,75909	$5,8101E^{08}$
E-15	$2,62E^{05}$	$2,3114E^{-11}$	0,9773	$1,7398E^{08}$	$5,2976E^{-11}$	0,79827	$5,0138E^{08}$
E-100	10026	$2,6009E^{-10}$	0,8808	46676	$2,3684E^{-06}$	0,88391	$1,6742E^{06}$

Fuente: presentación propia de los autores.

Los valores de velocidad de corrosión (mpy) por la técnica gravimétrica mostraron valores similares a los dados por las técnicas electroquímicas. La técnica de extrapolación de Tafel y EIE tiende a mostrar resultados de velocidad de corrosión más bajos que los obtenidos por la técnica gravimétrica. Esto se puede atribuir en cierta parte por la resistencia óhmica que ejerce la gasolina en las mezclas.

3. Conclusiones

El duraluminio mostró una susceptibilidad a presentar corrosión intergranular. La velocidad de corrosión es inversamente proporcional a la concentración de bioetanol y al tiempo de exposición. El proceso corrosivo del duraluminio tiende a pasivarse, hecho que se demuestra en las curvas de pérdida de peso y en las pruebas electroquímicas donde la intensidad de corriente es una variable determinante y es relativamente pequeña. La máxima velocidad de corrosión calculada fue de $2,28 \times 10^{-2}$ mpy, lo cual permite clasificar las mezclas como un medio corrosivo bastante bajo. La misma corrosión se corrobora al examinar las densidades de corriente, cuyo límite máximo corresponde a $5,1383 \times 10^{-2}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

El factor predominante para la existencia de corrosión fue la presencia de impurezas provenientes del bioetanol como el ácido acético y el envejecimiento de la mezcla que al generar ácidos orgánicos aceleran la corrosión del duraluminio; además, por ser el bioetanol altamente higroscópico, al sobrepasar la tolerancia de agua en la mezcla, se genera una fase rica en alcohol y agua altamente agresiva.

Referencias

- ALBÍSTUR, G. y BERLANGA, L. Corrosión bajo tensión de un acero al carbono en mezclas de bioetanol y gasolina. *Anales de la Mecánica de la Fractura*. 2008, vol. 1, pp. 34-35.
- ASTM G102-89 (reapproved 1999). *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
- ASTM G31-90 (Reapproved 1999). *Standard Practice for Laboratory Immersion corrosion testing of Metals*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
- ASTM G4806-09. *Standard Specification for Denatured Fuel Ethanol for Blending with Gasolines for Use as Automotive Spark-Ignition Engine Fuel*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- CORTÉS, A. y LOZANO, J. *Estudio preliminar de las propiedades corrosivas de las mezclas etanol-gasolina-agua, metanol-gasolina-agua*. Bucaramanga: UIS, 1982.
- DÍAZ, L.; LÓPEZ, J. F.; MALDONADO, L. et ál. Corrosion behavior of aluminum exposed to a biodiesel. *Electrochemistry Communications*. 2009, vol. 11, núm. 1, pp. 41-44.
- GARCÍA, J. M. y GARCÍA, J. A. *Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol*. Madrid: Fundación para el Conocimiento-CEIM, 2006.
- HORTA NOGUEIRA, L. *Aspectos complementarios para la definición de un programa de bioetanol en América Central*. México, DF: CEPAL/República Federal de Alemania, 2004.
- MEARS, R. B. *Aluminum and Aluminum Alloys*. New York: John Wiley & Sons, 1948.
- MENDOZA, J.; ROMERO, R. y LLONGUERAS, J. *Espectroscopía de impedancia electroquímica en corrosión*. México: Universidad Nacional de México, Facultad de Química, 2002.
- OWEN, K. y COLEY, T. *Automotive Fuels Reference Book*. 2nd ed. New York: Society of Automotive Engineers, 1995.
- PICAS, J. A.; GUASCH, J.; FORN, A. y et ál. Nuevos materiales base aluminio para moldes de inyección de plásticos. *Anales de Mecánica de la Fractura*. 2006, vol. I, pp. 311-316.
- RUIZ, J. *Corrosión fatiga en aleaciones ligeras de Al-Zn-Mg*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 1993.
- SORGO, M. y LADWEIN, T. Investigation of the pitting Corrosion behaviour of stainless steels in ethanol containing fuels. *NACE International*. 2009, vol. 09535, pp. 1-8.
- TORRES, A.; GARCÍA, E.; SERNA, S. et ál. Aplicación de las técnicas de EIE y RPL al estudio de la corrosión de polvos de FeAl en suspensión. *Revista de la Sociedad Química*. Perú. 2009, vol. 75, núm. 2, pp.185-193.
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM). Capítulo 5. En: *Materiales y diseño de equipos e instalaciones*. Madrid: UPM, 2009.
- VEGA, S. H.; AXOTLA, J. C. y LEÓN RODRÍGUEZ, F. M. Efecto de la contaminación atmosférica de la ciudad de México en la degradación de la aleación de zn-21wt%Al-2wt%Cu. En: *Federación Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. Perú, octubre 2007.

