

Resistencia a la corrosión de recubrimientos orgánicos por medio de espectroscopía de impedancia electroquímica¹

Corrosion Resistance of Organic Coatings Through Electrochemical Impedance Spectroscopy²

Resistência à corrosão de revestimentos orgânicos por meio de espectroscopia de impedância eletroquímica³

Código SICI: 0123-2126(201206)16:1<43:RCROEI>2.3.TX;2-3

Jairo Olaya-Flórez⁴
Magda Marcela Torres-Luque⁵

¹ Fecha de recepción: 20 de mayo de 2011. Fecha de aceptación: 18 de noviembre de 2011. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado *Estudio comparativo del proceso de corrosión en recubrimientos cerámicos, metálicos y orgánicos mediante técnicas electroquímicas*, desarrollado por el grupo de investigación Análisis de Fallas, Integridad y Superficies, de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

² Submitted on May 20, 2011. Accepted on November 18, 2011. This article is the result of the research project *Comparative Study of the Corrosion Process in Ceramic, Metallic, and Organic Coatings Using Electrochemical Techniques*. Developed by the research group Análisis de Fallas, Integridad y Superficies, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

³ Data de recepção: 20 de maio de 2011. Data de aceitação: 18 de novembro de 2011. Este artigo deriva de um projeto de pesquisa denominado *Estudo comparativo do processo de corrosão em revestimentos cerâmicos, metálicos e orgânicos mediante técnicas eletroquímicas*, desenvolvido pelo grupo de pesquisa Análise de Falhas, Integridade e Superfícies, da Universidade Nacional da Colômbia, Bogotá, Colômbia.

⁴ Ingeniero metalúrgico, Universidad Libre, Bogotá, Colombia. Maestría en Materiales y Procesos de Manufactura, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Profesor, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: jjolayaf@unal.edu.co.

⁵ Ingeniera física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Maestría en Materiales y Procesos, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Estudiante del Doctorado en Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Investigadora, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: mtorresluque@gmail.com.

Resumen

Se ha estudiado el comportamiento frente a la corrosión electroquímica de recubrimientos orgánicos industriales usando pinturas tipo epóxica, mediante la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica. Con el objetivo de determinar los mecanismos de protección y de falla de estos recubrimientos, se han correlacionado los resultados de resistencia a la polarización, en el tiempo, con la morfología del recubrimiento. Para ello, los recubrimientos se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido y espectroscopía infrarrojo. Los recubrimientos mostraron una ligera degradación en el tiempo de ensayo, debido a los defectos presentes en su microestructura; sin embargo, el mecanismo de protección y, por lo tanto, el de falla dependen del tiempo de ensayo. Estos detalles son discutidos en esta investigación.

Palabras clave

Corrosión y anticorrosivos, revestimientos protectores, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de infrarrojos.

Abstract

We have studied the electrochemical corrosion behavior of epoxy paint coatings through the electrochemical impedance spectroscopy technique. In order to determine the protection and failure mechanisms of these coatings, we correlated the polarization resistance in the immersion time function and in the morphology. In order to do this, we characterized the microstructure of the coatings by scanning electron microscopy and X-ray infrared spectroscopy. The coatings show degradation during the immersion time due to defects in their microstructure; however, the protective and failure mechanisms depend on the immersion time. These details are discussed in this research.

Keywords

Corrosion and anti-corrosives, protective coatings, scanning electron microscopy, infrared spectroscopy.

Resumo

Estudou-se o comportamento diante da corrosão eletroquímica de revestimentos orgânicos industriais usando pinturas tipo epóxi, mediante a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica. Com o objetivo de determinar os mecanismos de proteção e de falha destes revestimentos, foram correlacionados os resultados de resistência à polarização, no tempo, com a morfologia do revestimento. Para isso, os revestimentos foram caracterizados mediante microscopia eletrônica de varrido e espectroscopia infravermelha. Os revestimentos mostraram uma leve degradação no tempo do teste, devido aos defeitos presentes em sua microestrutura; porém, o mecanismo de proteção e, portanto, os de falha dependem do tempo do teste. Estes detalhes são discutidos nesta pesquisa.

Palabras chave

Corrosão e anticorrosivos, revestimentos protetores, microscopia eletrônica de varrido, espectroscopia de infravermelhos.

Introducción

El desarrollo histórico de la evolución industrial de los materiales para fabricar elementos estructurales o en instalaciones industriales ha buscado mejorar sus propiedades a través de los adelantos tecnológicos que se han ido presentando. Ahora bien, se ha observado que la durabilidad de un material, sometido a diferentes tipos de atmósferas, depende principalmente de sus propiedades superficiales. En el caso particular de los aceros se ha notado que la corrosión origina su degradación y pérdida de dimensiones, que reducen su desempeño para una determinada aplicación (Qian et ál., 2009; Torres y Olaya, 2010). Por ello, se ha visto la necesidad de mejorar las propiedades de los materiales, entre ellas las superficiales, para así aumentar su durabilidad. Una alternativa económica y competitiva ha sido la aplicación de recubrimientos orgánicos, los cuales son empleados ampliamente en el sector industrial, porque incrementan la resistencia a la corrosión de los materiales metálicos que se encuentran sometidos a ambientes agresivos como el agua salina (Martin, 2006).

En este contexto, el uso de recubrimientos orgánicos anticorrosivos constituye una excelente alternativa para aumentar la durabilidad y protección de los materiales utilizados en instalaciones industriales y que están sometidos a ambientes drásticos de corrosión. En la actualidad la investigación en este campo busca recubrimientos con versatilidad, alta eficiencia, bajo costo y de bajo impacto ambiental (Qian et ál. 2009; Torres y Olaya, 2010).

Los recubrimientos orgánicos se encuentran constituidos por solventes, un vehículo (resinas), pigmentos y aditivos. Los principales mecanismos de protección que estos tipos de recubrimiento utilizan son: efecto de barrera (agua, oxígeno e iones), alta resistencia dieléctrica (inhibición de reacciones anódicas y catódicas), pasivación del metal con pigmentos solubles y, en casos especiales, por protección catódica con pigmentos. Su desempeño, en general, está fuertemente influenciado por la naturaleza del vehículo utilizado, tipo de metal que se va a proteger, ambiente donde se va a usar, espesor y condiciones de aplicación (Martin, 2006).

Dentro de los recubrimientos orgánicos más importantes para mejorar la resistencia a la corrosión de los aceros se encuentran las pinturas, que tienen una resina tipo epóxica o epoxy. Las pinturas epóxicas consisten en dos componentes que reaccionan entre ellos para formar un recubrimiento duro e inerte. Estas dos partes, llamadas A y B, conforman una resina epóxica con pigmentos y extendedores y un agente curante, llamado endurecedor, respectivamente. Estos recubrimientos son muy utilizados como recubrimientos primarios en tuberías, barcos y cualquier estructura que se encuentre inmersa en agua de mar (Forsgren, 2004; Zhang et ál., 2004), debido a que tienen buena resistencia química y al desgaste, excelente adhesión, buena impermeabilidad y resistencia a los álcalis.

Además, las pinturas epóxicas son conocidas por su susceptibilidad a la degradación por rayos UV, los cuales tienen la energía suficiente para romper los enlaces de la estructura polimérica. En este caso, el resultado inicial de la degradación es la pérdida del brillo de la pintura, seguida por la liberación de partículas de pigmento y posterior degradación del recubrimiento. Debido a esto, en la industria es común el uso de uretanos que protegen al epóxico de los rayos UV (Torres y Olaya, 2010; Martin, 2006; Forsgren, 2004).

Ahora bien, en los últimos años se ha estado implementando con éxito la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) para evaluar la resistencia a la corrosión de materiales. Estas pruebas se caracterizan por ser aceleradas, no destructivas e indicar cambios en el sistema antes de que sean visibles. Para el caso específico de recubrimientos, es posible estudiar el deterioro de estos por acción de un electrolito y el incremento de la velocidad de corrosión en el sustrato, ya sea por el deterioro del recubrimiento o por el ataque del electrolito. Además, con la técnica EIS, se puede observar y medir la estabilidad del recubrimiento en el tiempo, teniendo en cuenta que este se comporta como una resistencia eléctrica que interfiere, tanto en el intercambio de electrones como en el de masa.

El análisis de EIS se realiza mediante simulaciones de circuitos eléctricos, en las cuales cada componente del circuito debe representar algún fenómeno físico-químico del proceso corrosivo del material en estudio, brindando gran cantidad de información sobre estos y su variación respecto al tiempo de inmersión.

Debido a la importancia en el ámbito industrial de los recubrimientos tipo epoxy, esta investigación se ha centrado en evaluar las propiedades protectoras de recubrimientos anticorrosivos orgánicos epóxicos, relacionando los parámetros electroquímicos (propiedades aislantes como la capacitancia del recubrimiento y la resistencia de la película de pintura) mediante EIS y la identificación de los mecanismos de protección y falla con ayuda de técnicas de caracterización microestructural.

1. Desarrollo experimental

1.1. Producción de recubrimientos

La pintura epóxica fue suministrada y aplicada por la empresa SIKA S. A. de Colombia. Dicho recubrimiento se aplicó mediante rociado (espray) hasta lograr un espesor aproximado de 100 μm sobre sustratos de acero al carbono ASTM A36 e inoxidable AISI 304 con grado de preparación superficial SP2 (limpieza manual) y SP5 (limpieza con chorro abrasivo), respectivamente. Así se obtuvieron perfiles de anclaje entre 50 y 60 μm . Todas las probetas fueron preparadas bajo las mismas condiciones de temperatura ($\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$) y humedad relativa ($\sim 70\%$).

1.2. Pruebas electroquímicas

A fin de evaluar la resistencia a la corrosión se realizaron ensayos de EIS. Para ello se utilizaron las recomendaciones dadas en la norma ASTM G5 y se empleó un contraelectrodo de grafito de alta pureza y un electrodo de referencia de calomel saturado (SCE, de las sigla en inglés *saturated calomel electrode*). El área de exposición de la muestra fue de 0,8 cm^2 . Los ensayos se hicieron con un electrolito de NaCl al 3% en peso y se manejó un rango de frecuencias entre 10 y 1 MHz, midiendo diez puntos por década, para diferentes tiempos de inmersión: 1, 24, 48, 72 y 168 horas.

Por otro lado, teniendo en cuenta la alta resistividad de los recubrimientos poliméricos, estos sistemas permiten aplicar un voltaje más amplio, sin sacrificar la linealidad del sistema electroquímico, e igualando el límite de linealidad con el de los otros recubrimientos, por esta razón se aplicó una amplitud de voltaje de 50 mV, como lo recomendado por estudios como el de Martin (2006). El análisis de los resultados de todas las pruebas electroquímicas se hicieron utilizando el programa Gamry Echem Analyst versión 5.3.

1.3. Caracterización superficial

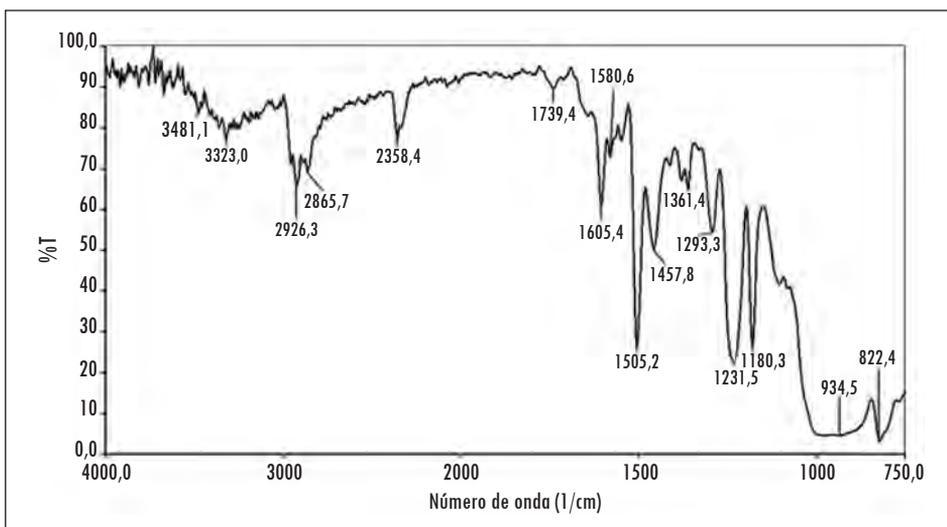
La morfología de la superficie de los recubrimientos y de los productos de corrosión se estudió a través de microscopía electrónica de barrido (MEB), con un equipo FEI QUANTA 200 en alto vacío y un voltaje de 30 kV; mientras que el estudio químico se realizó antes y después del ataque químico con el mismo equipo usando la técnica *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), con un voltaje de 20 kV. El estudio de la estructura de los recubrimientos se realizó mediante espectroscopía infrarroja, en un equipo IR Perkin Elmer Paragon 500. Las muestras se prepararon en pastillas de bromuro de potasio (KBr), grado espectroscópico y seco.

2. Resultados y discusión

2.1. Caracterización superficial

La caracterización química del recubrimiento epóxico mediante espectroscopía infrarroja se presenta en la figura 1, en la cual se puede observar la presencia del grupo funcional éter (C-O-C) por la absorción fuerte localizada entre 1150 cm^{-1} y 1085 cm^{-1} , dada por el estiramiento asimétrico de dicho grupo. Además, la banda en 1231 cm^{-1} es debida al estiramiento del enlace C-O. Por otro lado, las bandas en 1605 cm^{-1} , 1505 cm^{-1} y 1457 cm^{-1} son debidas al estiramiento de los enlaces C=C de los anillos aromáticos, cuyos enlaces C-H causan la absorción en las bandas ubicadas en 3323 cm^{-1} y 3481 cm^{-1} (Creswell, Runquis y Campbell, 1972; Dyer, 1973). Asimismo, los enlaces C-H de carbonos alifáticos generan la absorción en las bandas 2865 cm^{-1} y 822 cm^{-1} , debido al estiramiento y doblamiento de dicho enlace fuera del plano, respectivamente (Creswell, Runquis y Campbell, 1972; Dyer, 1973; Silverstein, Webster y Kiemle, 2005).

Figura 1. Espectro de FTIR del recubrimiento epóxico libre de sustrato



Fuente: presentación propia de los autores.

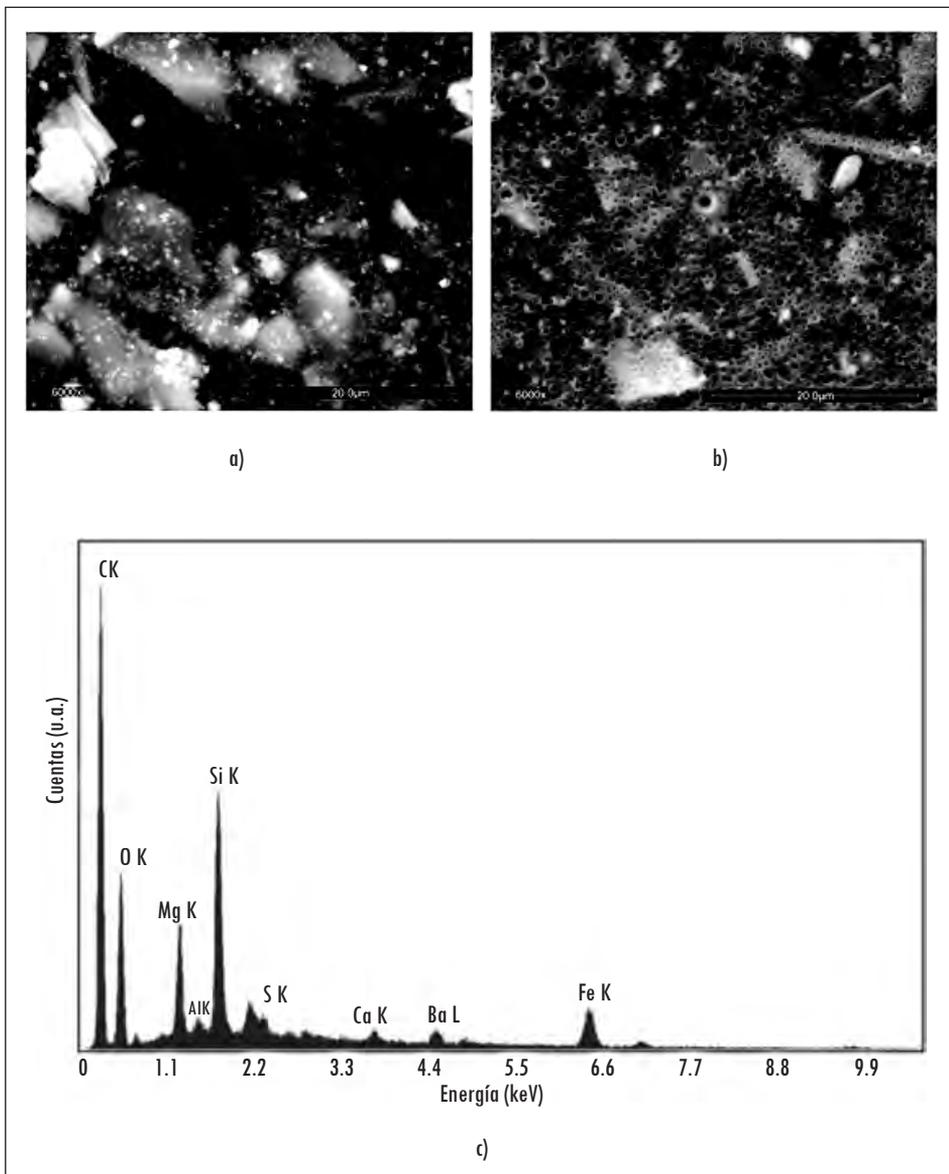
Por otra parte, la absorción en 1361 cm^{-1} se debe al doblamiento en el plano del enlace OH, cuya banda más significativa se encuentra entre 3550 cm^{-1} y 3200 cm^{-1} ; sin embargo, la aparición de esta banda fuerte depende del estado en el

que se encuentre el componente en estudio. De este modo, si se encuentra en fase vapor es fuertemente observada; pero si, por el contrario, se encuentra en soluciones muy diluidas o con solventes no polares el enlace OH no se muestra igual de fuerte (Silverstein, Webster y Kiemle, 2005). Por esta razón, es probable que la banda ancha que se observa en el espectro a la izquierda de 3000 cm^{-1} sea la correspondiente al enlace OH; además, esta observación coincide con los resultados mostrados por Evtushenko et ál. (2003) en su trabajo sobre la determinación de los grupos epoxi e hidroxilo en resinas epóxicas mediante IR.

En dicho trabajo, la banda más representativa del enlace OH aparece de forma débil, debido principalmente a que el solvente utilizado es acetona, que es un compuesto orgánico no polar. Esto coincide con la teoría descrita. Así, de estos resultados se puede pensar que el componente B de la pintura epóxica utilizada para este trabajo es un compuesto no polar.

La morfología superficial de los recubrimientos (figura 2) muestra una notoria porosidad, que se convierte en regiones para que el electrolito se pueda difundir hasta el sustrato. Además, mediante EDS también se detectó la presencia de Si, Ba, Ca, Mg y Fe, que son debidos a pigmentos propios de esta pintura, como silicatos, baritas y óxido de hierro (figura 2c).

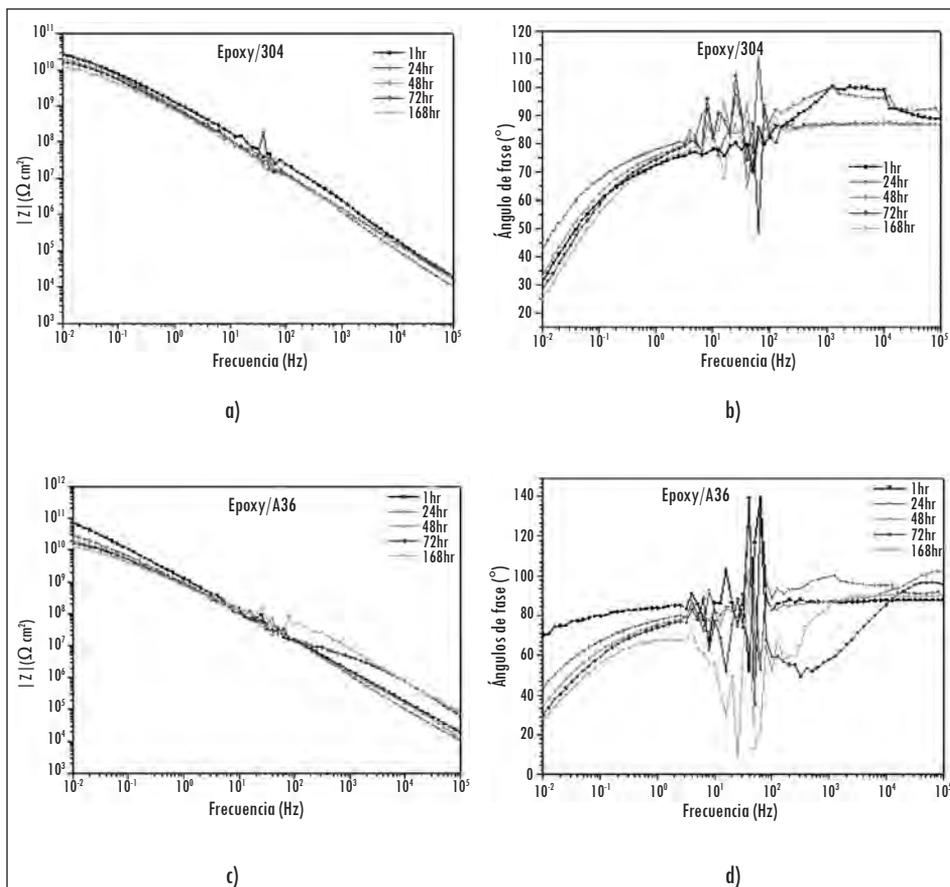
Figura 2. Micrografía SEM superficial de pintura tipo epoxy sobre a) ASTM A36, b) AISI 304 y c) espectro EDX de la superficie



Fuente: presentación propia de los autores.

La figura 3 muestra los diagramas de Bode para los dos sistemas epóxico-sustrato. En esta figura se puede observar, en los dos sistemas, que estos no presentan cambios significativos en sus propiedades protectoras, es decir, que aunque sí hay variación en los valores de la impedancia a bajas frecuencias, esta se mantiene aproximadamente constante en el tiempo. Además, se advierte la presencia de ruido en frecuencias entre 10^1 y 10^2 Hz, lo que indica, posiblemente, la interacción del electrolito con los pigmentos propios de la pintura, como lo señala Martin en su trabajo del 2006 y cuyos efectos también son observados en los trabajos de Hu et ál. (2009), en el cual también se presenta ruido en el mismo rango de frecuencias atribuido a la presencia de pigmentos metálicos en la pintura.

Figura 3. Diagramas de Bode para Epoxy/304 (a, b) y Epoxy/A36 (c, d): a y c) impedancia y b y d) ángulo de fase

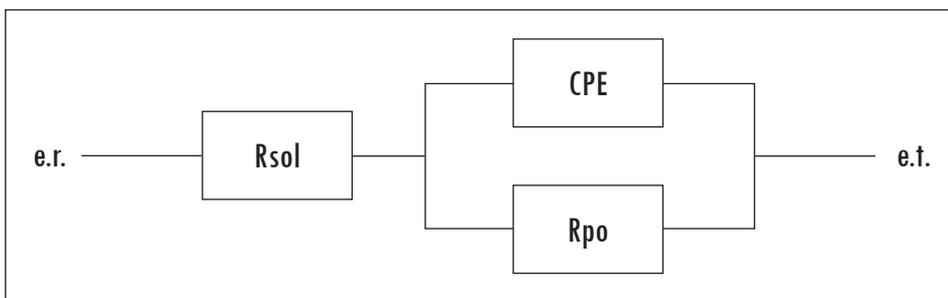


Fuente: presentación propia de los autores.

Dentro de los resultados del diagrama de Bode se observan valores de impedancia superiores a $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$, que permiten clasificar a estos recubrimientos en el rango de excelente protección, de acuerdo con la clasificación de Lee y Mansfeld (1999). Esto puede explicarse, debido a los altos valores de resistencia dieléctrica que reduce el acceso de materiales iónicos por medio del recubrimiento. El proceso de corrosión en estos recubrimientos se puede dar por una combinación de los siguientes factores (Itagaki et ál., 2006): 1) difusión de los iones del electrolito hacia el sustrato a través de zonas del recubrimiento que presentan enlaces moleculares débiles y 2) difusión del electrolito por defectos del recubrimiento como burbujas de aire, cráteres, poros, etc. De esta forma en el sustrato se forman sitios anódicos y catódicos, que con la entrada de oxígeno se aceleran las reacciones, lo que aumenta el pH y provoca la pérdida de adherencia en todo el sistema.

Los datos de impedancia de un sistema recubrimiento-sustrato, encontrados experimentalmente, pueden ser susceptibles a un análisis por medio de circuitos eléctricos equivalentes. En este caso, se debe considerar que el mecanismo de protección del recubrimiento tipo epóxico es de barrera y, además, se puede notar la ausencia de dos constantes de tiempo en los diagramas de Bode de las figuras 3b y 3d. El circuito eléctrico que se propone para los resultados experimentales se presenta en la figura 4, que es el mismo que sugieren Hu et ál. (2009) cuando investigaron recubrimientos orgánicos usando ensayos EIS a temperatura ambiente.

Figura 4. Circuito equivalente para recubrimiento tipo epóxico



Fuente: presentación propia de los autores.

En general, los estudios sobre pinturas se realizan con condensadores ideales en lugar de elementos de fase constante (CPE, por su sigla en inglés) (Martin, 2006; Itagaki et ál., 2006; Marchebois et ál., 2002); sin embargo, al tener dos sustratos diferentes, es mejor utilizar estos elementos, que permiten aproximar

de mejor forma los efectos del proceso sobre la intercara recubrimiento-sustrato. En este caso, se evalúa la el sustrato por medio de la resistencia de transferencia de carga de la superficie (R_{ct}), en tanto que las propiedades del recubrimiento se evalúan mediante la resistencia del poro (R_{po}) y un CPE. Asimismo, la ausencia de dos constantes de tiempo se puede atribuir a que no existe interacción entre el electrolito y el sustrato, lo que comprueba la eficiencia del recubrimiento protector (Martin, 2006; Hu et ál., 2009). No obstante, es posible que después de un tiempo de exposición el agua, iones y oxígeno puedan arribar al sustrato y darse la formación de sitios de corrosión electroquímica en la interfase.

Ahora bien, el empleo de los elementos de CPE en pinturas puede representar condensadores no ideales que permiten que el circuito equivalente sea más aproximado a lo que se obtiene en los experimentos electroquímicos, ya que presentan los procesos de transferencia de carga y de difusión de masa que dependen del área real expuesta al medio, que es diferente al área nominal, debido a la rugosidad del recubrimiento (Liu, Bi, Leyland y Matthews, 2006; Flores et ál., 2006). La impedancia de un CPE puede ser expresada por:

$$Z = Y_0^{-1}(j\omega)^{-\alpha} \quad (1)$$

Donde Y_0 es equivalente a C, la capacitancia de un capacitor ideal, y α es una constante empírica y en realidad no tiene una interpretación física. Si $\alpha = 1$, entonces el CPE se comportará como un capacitor ideal (Flores et ál., 2006).

En la tabla 1 se presentan los datos de la simulación con el CE respectivo para los sistemas recubrimiento orgánico-sustrato que, como se observa, existe una gran estabilidad del recubrimiento en el tiempo. Además, también se puede observar que el elemento de fase constante tiende a comportarse como capacitor ideal con $\alpha \rightarrow 1,0$ y valores de admitancia del orden de 10^{-10} S/cm² durante los siete días de ensayo, para ambos sistemas.

Tabla 1. Parámetros de la simulación de EIS para recubrimientos epóxicas

Epoxy/304						
TIEMPO (hr)	OCP (mV)	R_{po} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{sol} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE (S/cm ²)	α	R_p^* ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
1	-1144,0	7,19E+10	5,53E-01	4,19E-10	0,95	7,19E+10
24	-357,9	2,81E+10	1,65E-02	1,88E-10	0,98	2,81E+10
48	-242,7	2,01E+10	9,37E-02	2,22E-10	0,93	2,01E+10
72	-137,3	1,59E+10	1,96E-01	2,26E-10	0,93	1,59E+10
168	-206,2	1,08E+10	4,14E-01	2,58E-10	0,92	1,08E+10
Epoxy/A36						
1	-200,0	2,21E+11	4,27E+00	1,52E-10	0,95	2,21E+11
24	-277,1	2,75E+10	7,53E-01	1,99E-10	0,97	2,75E+10
48	-256,4	1,83E+10	1,43E-01	2,25E-10	0,93	1,83E+10
72	-112,6	2,48E+10	3,29E-02	3,09E-10	0,80	2,48E+10
168	-194,1	1,65E+10	6,63E-02	3,01E-10	0,78	1,65E+10

$$*R_p = R_{po} + R_{sol}$$

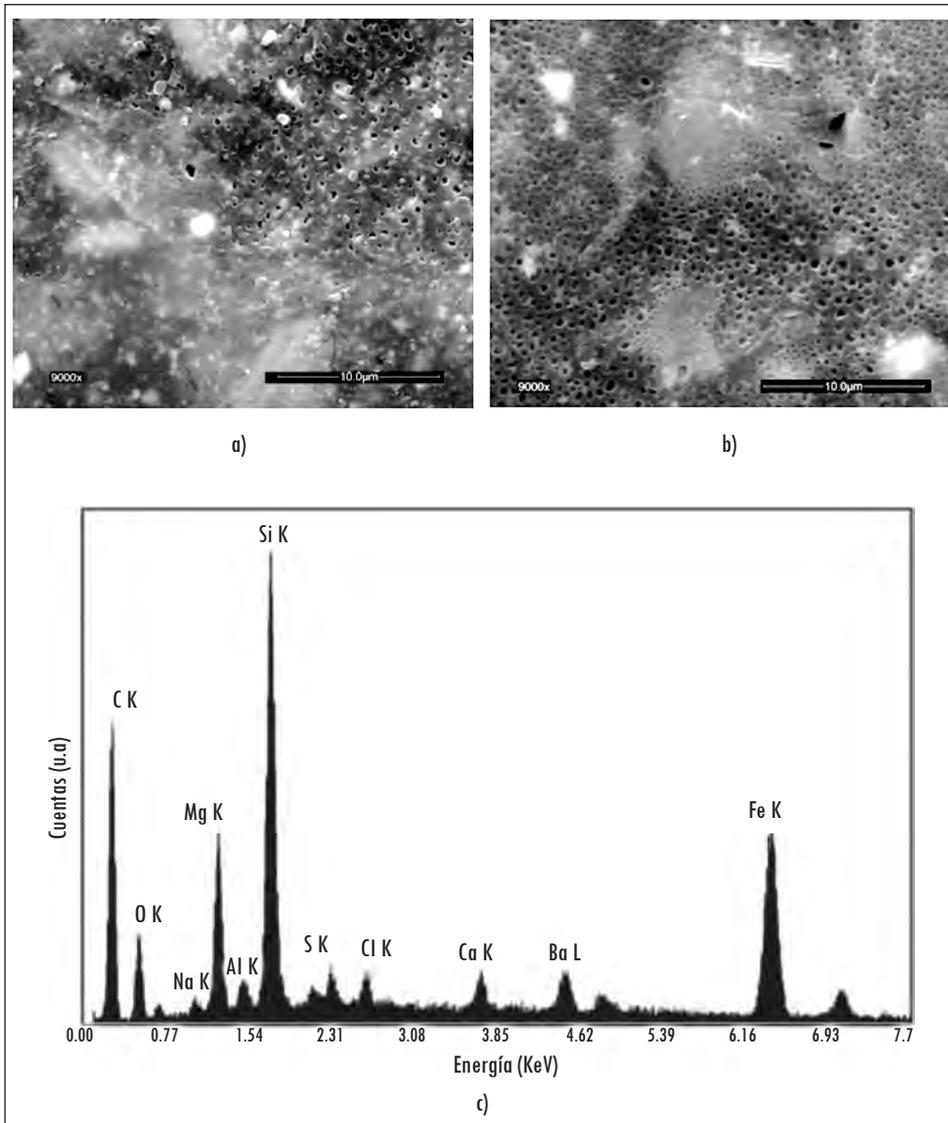
Los datos son normalizados por el área aparente superficial
Fuente: presentación propia de los autores.

De igual forma, comparando estos resultados con los expuestos por Hu et ál. (2009), por Oliveira y Ferreira (2003) y por Akbarinezhad et ál. (2009), se nota una gran coherencia, ya que se presentan valores de resistencia a la polarización del orden de 10^{10} - $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$, las cuales son estables en el tiempo mientras la temperatura no varíe.

De igual forma, haciendo la comparación de las mediciones para Epoxy/A36 y Epoxy/304, se nota que los valores no difieren significativamente en el tiempo, salvo el de la primera hora de inmersión. Esto puede ser debido a posibles fallas en el recubrimiento aplicado sobre el acero inoxidable, como lo expone Martin (2006), al obtener valores de resistencia a la polarización del orden de $10^5 \Omega / \text{cm}^2$ para la primera hora de inmersión.

Las micrografías SEM de las superficies expuestas, presentadas en las figuras 5a y 5b, muestran la ausencia de defectos por corrosión sobre las superficies de las pinturas; no obstante, sí se nota un aumento de tamaño en sus poros, si se compara con las micrografías antes del ensayo de la figura 2. Además, al analizar el espectro EDS de la figura 5c, los únicos elementos que se encuentran son los propios de los pigmentos agregados a estas pinturas, como O, C, Fe, Ca, Si y Ba y trazas de Na y Cl provenientes del electrolito.

Figura 5. Micrografía SEM de la a) Epoxy/A36, b) Epoxy/304 y c) Espectro EDX, luego de siete días de inmersión en electrolito de NaCl al 3%



Fuente: presentación propia de los autores.

El aumento de la resistencia a la corrosión se correlaciona bien con resultados obtenidos en ensayos de polarización potenciodinámica en un ambiente ácido (Torres et ál., 2010). Sin embargo, en este caso, los valores de densidades de corrosión fueron $55,4 \times 10^{-6}$ A/cm² en el sistema epoxy/A36 y $37,0 \times 10^{-9}$ A/cm²

para el sistema epoxy/304. Se logró observar en el sistema epoxy/304 bajos valores de densidad de corriente de corrosión y los valores más positivos en el potencial de corrosión, es decir, este sistema tiene la mejor resistencia a la corrosión. Este buen comportamiento frente a la corrosión del sistema es explicado por la combinación de las buenas propiedades dieléctricas del recubrimiento de naturaleza orgánica y de la capa pasiva que se forma sobre la superficie del acero inoxidable (Flores et ál., 2006; Torres et ál., 2010), lo cual concuerda bien con estudios de pinturas epóxicas frente a medios agresivos realizados por Forsgren (2006) y Wicks (2007).

3. Conclusiones

El sistema orgánico epóxico muestra un desempeño excelente cuando está expuesto a ambientes salinos que puedan causar deterioro de la película y generación de procesos farádicos, es decir, se puede recomendar su uso para ambientes marinos, industriales y urbano-industriales.

La técnica de la espectroscopía de impedancia electroquímica es una excelente herramienta para monitorear el desempeño de recubrimientos orgánicos anticorrosivos, pues permite describir los fenómenos físico-químicos que puedan estar ocurriendo sobre el recubrimiento y estimar su desempeño o degradación con el tiempo.

La capacidad dieléctrica de los recubrimientos orgánicos utilizados en esta investigación es estable con el tiempo, sin presencia de productos de corrosión en la superficie o formación de nuevos defectos.

Los recubrimientos epóxicos mejoran resistencia a la corrosión, ya que muestran valores de resistividad del mismo orden de magnitud ($10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$) tanto para los aceros al carbono A36 como para los inoxidables AISI 304. En este caso, el recubrimiento se convirtió en una buena barrera que no permitió la difusión del electrolito corrosivo a la interface recubrimiento-sustrato.

Referencias

- AKBARINEZHAD, E.; BAHREMANDI, M.; FARIDI, H.R. y REZAEI, F. Another approach for ranking and evaluating organic paint coatings via electrochemical impedance spectroscopy. *Corrosion Science*. 2009, vol. 51, núm. 2, pp. 356-363.
- CRESWELL, C.; RUNQUIS, O. y CAMPBELL, M. *Análisis espectral de compuestos orgánicos*. México: Diana, 1972.
- DYER, J. *Aplicaciones de espectroscopía de absorción en compuestos orgánicos*. New Jersey: Prentice Hall International, 1973.

- EVTUSHENKO, Y. M.; IVANOV, V. M. y ZAITSEV, B. E. Determination of epoxide and hydroxyl groups in epoxide resins by IR spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*. 2003, vol. 58, núm.4, pp. 347-350.
- FLORES, J. F.; OLAYA, J. J.; COLAS, R.; RODIL, S. E.; VALDEZ, B. S. y FUENTE, I. G. Corrosion behaviour of TaN thin PVD films on steels. *Corrosion Engineering, Science & Technology*. 2006, vol. 41, núm. 2, pp. 168-176.
- FORSQREN, A. *Corrosion control through organic coatings*. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2006.
- HU, J.; LI, X.; GAO, J. y ZHAO, Q. Uv aging characterization of epoxy varnish coated steel upon exposure to artificial weathering environment. *Materials & Design*. 2009, vol. 30, núm. 5, pp. 1542-1547.
- ITAGAKI, M.; ONO, A.; WATANABE, K.; KATAYAMA, H. y NODA, K. Analysis on organic film degradation by dynamic impedance measurements. *Corrosion Science*. 2006, vol. 48, núm. 11, pp. 3802-3811.
- LEE, C. y MANSFELD, F. Automatic classification of polymer coating quality using artificial neural networks. *Corrosion Science*. 1999, vol. 41, núm. 3, pp. 439-461.
- LIU, C.; BI, Q.; LEYLAND, A. y MATTHEWS, A. An electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behaviour of PVD coated steels in 0.5 N NaCl aqueous solution: Part I. Establishment of equivalent circuits for EIS data modelling. *Corrosion Science*. 2003, vol. 45, núm. 6, pp. 1243-1256.
- MARCHEBOIS, H.; JOIRET, S.; SAVALL, C.; BERNARD, J. y TOUZAIN, S. Characterization of zinc-rich powder coatings by EIS and Raman spectroscopy. *Surface and Coatings Technology*. 2002, vol. 157, núms. 2-3, pp. 151-161.
- MARTIN, S. y ÁNGELES, M. E. *Efecto de la temperatura en la evaluación de recubrimientos anticorrosivos*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de México, México D. F., México, 2006.
- OLIVEIRA, C. G. y FERREIRA, M. G. S. Ranking high-quality paint systems using EIS. Part I: intact coatings. *Corrosion Science*. 2003, vol. 45, núm. 1, pp. 123-138.
- QIAN, M.; SOUTAR, A.; TAN, X.; ZENG, X. y WIJESINGHE, S. Two-part epoxy-siloxane hybrid corrosion protection coatings for carbon steel. *Thin Solid Films*. 2009, vol. 517, núm. 17, pp. 5237-5242.
- SILVERSTEIN, R.; WEBSTER, F. y KIEMLE, D. *Spectrometric identification of organic compounds*. 7th Ed. New York: Wiley, 2005.
- TORRES, M. y OLAYA, J. J. *Estudio comparativo del proceso de corrosión en recubrimientos cerámicos, metálicos y orgánicos mediante técnicas electroquímicas*. M. S. tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2010.
- TORRES, M.; CHIPATECUA, Y.; MARULANDA, D. M. y OLAYA, J. J. Estudio comparativo de la evaluación a la corrosión de recubrimientos de CrN y CrN/Cr con recubrimientos de cromo electrodepositado y pinturas tipo epoxy. *Ingeniería e Investigación*. 2010, vol. 30, núm. 3, pp. 8-15.

WICKS, Z. Epoxy and phenolic resins. *Organic Coatings*. 2007, pp. 271-294.

ZHANG, J.; HU, J.; ZHANG, J. y CAO, C. Studies of water transport behavior and impedance models of epoxy-coated metals in NaCl solution by EIS. *Progress in Organic Coatings*. 2004, vol. 51, núm. 2, pp. 145-151.