

## Comparativo anticorrosivo de los acabados de alquidálico y poliuretano en pinturas ricas en zinc sobre acero al carbono

GARCÍA-NAVARRO, Norma\*†, PÉREZ-HERNÁNDEZ, Erik, LUGO-ISLAS, Gabriela, GALLARDO-CASTÁN, Ernesto

*Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, campus Poza Rica*

Recibido 11 de Julio 2017; Aceptado 16 de Septiembre, 2017

### Resumen

Los costos por corrosión son difíciles de calcular, pero abundan pruebas que muestran que son tan altos que usualmente impactan a todos los sectores de la sociedad, desde el patrimonio familiar hasta la infraestructura productiva que mantiene la economía de cualquier país (Castañeda-Valdéz & Rodríguez-Rodríguez, 2014). Se aplicaron recubrimientos galvanizados en frío con acabados de esmalte alquidálico y poliuretano sobre placas de acero al carbono (preparadas por la empresa Metalyzinc). Se expusieron a la atmósfera en Poza Rica Veracruz y se evaluaron con técnicas electroquímicas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE). La exposición de las placas recubiertas se realizó en un panel de exposición ajustable a 45 grados, con dirección hacia los vientos dominantes, a diferentes periodos de exposición. Se comprobó que los recubrimientos estudiados protegen al acero de la corrosión por el incremento de la impedancia, conforme se hidrata la película polimérica, posiblemente debido a la activación de pigmentos de zinc, que sellan los poros y las heterogeneidades del recubrimiento, siendo una alternativa para contrarrestar los daños ocasionados por la corrosión atmosférica en ambientes industriales y marinos.

### Galvanizado, esmalte, corrosión

### Abstract

Corrosion costs are difficult to calculate, but there is plenty of evidence to show that they are so high that they usually impact all sectors of society, from the family patrimony to the productive infrastructure maintained by the economy of any country (Castañeda-Valdéz & Rodríguez - Rodríguez, 2014). Cold galvanized coatings were applied with alquidalic enamel and polyurethane finishes on carbon steel plates (prepared by Metalyzinc). They were exposed to the atmosphere at Poza Rica Veracruz and were evaluated with electrochemical techniques of Resistance to Linear Polarization (RPL) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). Exposure of the coated plates was done in an adjustable exposure panel at 45 degrees, directed towards the prevailing winds, at different periods of exposure. It was verified that the coatings studied protect the steel from corrosion by increasing the impedance, as the polymer film hydrates, possibly due to the activation of zinc pigments, which seal the pores and the heterogeneities of the coating, being an alternative to counteract the damages caused by atmospheric corrosion in industrial and marine environments.

### Galvanized, enamel, corrosion

**Citación:** GARCÍA-NAVARRO, Norma, PÉREZ-HERNÁNDEZ, Erik, LUGO-ISLAS, Gabriela, GALLARDO-CASTÁN, Ernesto. Comparativo anticorrosivo de los acabados de alquidálico y poliuretano en pinturas ricas en zinc sobre acero al carbono. *Revista de Innovación Sistemática* 2017. 1-3:53-62

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: gbauza@uv.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

La atmosfera es uno de los entornos o ambientes más comunes a los que se encuentra expuesto un material metálico, en este entorno es prácticamente inevitable el proceso de corrosión ya que la presencia de agua (electrolito) y oxígeno (oxidante) hacen que se lleve a cabo dicho proceso por ello es importante el uso de recubrimientos anticorrosivos para los metales expuestos en este medio (Ramirez Parquet & otros, 2006).

Un estudio del gobierno de Veracruz reveló que 41 por ciento de los accidentes relacionados con ductos se deben a la corrosión en las líneas que atraviesan por al menos 140 de los 212 municipios que conforman la entidad (Nava, 2010). Por tal motivo, ha sido de suma importancia estudiar el comportamiento de estos materiales en diferentes medios y condiciones, con el fin de poder determinar su susceptibilidad a la corrosión en los diferentes ambientes a los que se enfrentan, y partir de ahí para mejorar sus propiedades aumentando su vida útil.

La ciudad de Poza Rica se encuentra ubicada en la zona norte del estado de Veracruz a 30 Km de la costa del Golfo de México, presenta una humedad relativa regularmente por encima del 80%, con una temperatura y precipitación pluvial promedio anual de 30°C y 1180 mm respectivamente.

Los recubrimientos actúan como una barrera que aísla al material metálico del medio agresivo por lo cual se retarda la corrosión. La gran variedad de tipos de pinturas con diferentes características y resistencias, de sencilla aplicación, diversidad de colores, costo relativamente bajo y posibilidad de combinación con recubrimientos metálicos (por ejemplo, los galvanizados) son, entre otras, las principales ventajas que inducen a este tipo de protección contra la corrosión (Orozco, 2011).

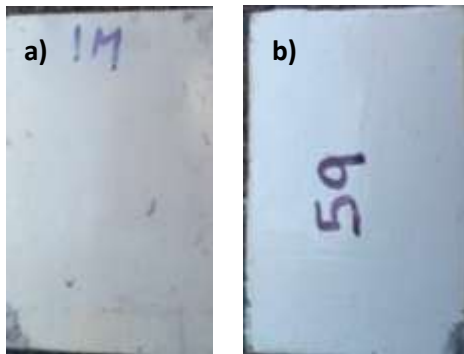
El uso de los recubrimientos es muy amplio ya que abarca desde grandes estructuras metálicas expuestas en ambientes industriales fuertemente agresivos hasta diminutos componentes electrónicos. Se ha escrito que por cada 100 m<sup>2</sup> de superficie metálica expuesta a la corrosión, unos 85-90 m<sup>2</sup> están protegidos por revestimientos de pintura (González Hernández, 1984).

El corto periodo de prueba, su alta confiabilidad y posibilidad de analizar el proceso de corrosión son algunas de las ventajas de las técnicas electroquímicas (Genescá, 2002). Las más utilizadas para la evaluación de recubrimientos son la resistencia a la polarización lineal (RPL), la cual es una técnica de corriente directa y la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), que es una técnica de corriente alterna.

## Metodología

### Preparación de la superficie

Los sistemas de recubrimientos galvanizado en frío mas esmalte alquidálico y galvanizado en frío más poliuretano, fueron aplicados sobre placas de acero al carbón con dimensiones de 7.5 cm de ancho por 10 cm de largo. Para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico, la placa fue debastada con papel lija de carburo de silicio 320 (SiC). Posteriormente fue limpiada con acetona, se aplicó el recubrimiento galvanizado en frío y se dejó secar durante 2 horas aproximadamente y al final se recubrió con el esmalte alquidálico (figura 1a), aplicando ambas capas con brocha (Codelpa, 2015). Para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más poliuretano (figura 1b), el recubrimiento fue aplicado industrialmente por la empresa Metalyzinc.



**Figura 1** a) Recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico y b) Recubrimiento galvanizado en frío poliuretano sobre acero al carbono

Fuente: *Elaboración propia*

### Exposición de los recubrimientos

Las placas de acero al carbono con los sistemas de recubrimientos fueron expuestas en la Facultad de Ciencias Químicas (Campus Poza Rica-Tuxpan), donde se instaló un panel de exposición en la azotea (Figura 3.3), el cual fue ajustado a 45 grados con dirección hacia los vientos dominantes en la ciudad, de acuerdo a la normatividad vigente (ISO, 1992).

Las placas fueron expuestas un total de 6 meses, las cuales fueron caracterizadas mediante técnicas electroquímicas en periodos comprendidos de 0,2,4,5,6 meses.

### Preparación de la celda electroquímica

Una de las esquinas de las placas de carbono fue adaptada para utilizarla como conexión para el electrodo de trabajo, desprendiendo de ella la pintura por ambos lados en forma de rectángulo, posteriormente se fijó un tubo de PVC de aproximadamente  $9\text{cm}^2$  de área de exposición al electrolito por 6cm de altura, el cual es sellado a la base para evitar fugas.

El arreglo experimental de la celda (Figura 2) se llevó a cabo colocando la placa a evaluar o electrodo de trabajo, llena con el electrolito  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0.1M, utilizando grafito como electrodo auxiliar para medir la intensidad de corriente eléctrica y como electrodo de referencia calomel/saturado ( $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ) que evalúa diferencia de voltaje.



**Figura 2** Arreglo experimental de la celda electroquímica

Fuente: *Elaboración propia*

### Evaluación electroquímica

El estudio electroquímico se realizó empleando un potenciostato ACM instruments, el cual fue conectado a los electrodos correspondientes en el arreglo de la celda. El experimento se monitoreó con las técnicas electroquímicas resistencia a la polarización lineal (RPL) y Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), en una secuencia programada de la siguiente manera:

1. Seguimiento del  $E_{\text{corr}}$  por 5 minutos
2. Prueba de Resistencia de Polarización lineal (+/- 15 mV alrededor de  $E_{\text{corr}}$ )

3. Prueba de Impedancia Electroquímica (+/- 10 mV y de 10000- 0.1 Hz)

**Resultados**

El potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) es un parámetro que proporciona información termodinámica del proceso de corrosión, entre más electronegativo sea  $E_{corr}$  significa mayor tendencia a que la corrosión se presente a nivel interface, sin embargo, la cinética de corrosión puede proporcionar la velocidad de las reacciones electroquímicas (Calderón & Rossa Mattos, 2006). Los valores obtenidos con la técnica electroquímica RPL son inversamente proporcionales a la velocidad de corrosión, mientras que la intensidad de corriente es directamente proporcional a la velocidad de corrosión.

**Galvanizado en frío más esmalte alquidálico**

Este sistema presenta (Tabla 1) un aumento en sus valores de  $R_p$  que se encuentran entre  $1.2E7$  y  $4.0E8 \text{ Ohm-cm}^2$ , demostrando así que el sistema protege al material metálico de la corrosión. Puesto que  $E_{corr}$  se incrementa durante el tiempo de exposición; aplicado a recubrimientos indica que este otorga protección al sustrato metálico (Genescá, 2002). Sin embargo, cuando el  $E_{corr}$  comience a descender habrá terminado el tiempo de vida útil del sistema de pintura.

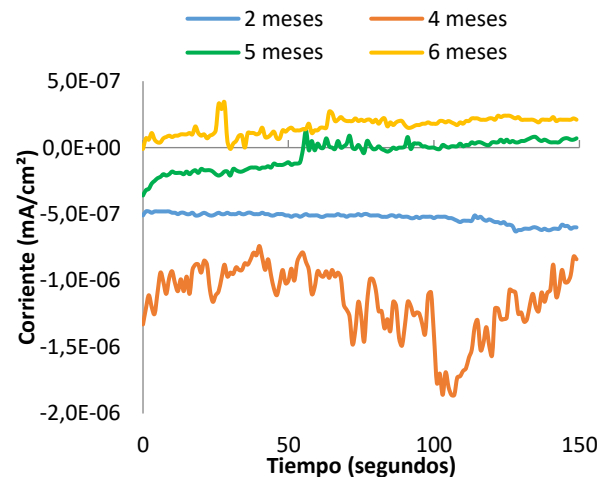
| Tiempo (meses) | $E_{corr}$ | $R_p$ ( $\text{Ohm-cm}^2$ ) |
|----------------|------------|-----------------------------|
| 0              | -----      | $1.2 \times 10^7$           |
| 2              | -3200      | $4.2 \times 10^5$           |
| 4              | -3420      | $1.3 \times 10^5$           |
| 5              | -1700      | $5.3 \times 10^3$           |
| 6              | 25         | $4.1 \times 10^8$           |

**Tabla 1** Resultados obtenidos para el sistema galvanizado en frío más esmalte alquidálico mediante la técnica RPL

Fuente: Elaboración propia

Un incremento en la corriente indica que se ve favorecido el proceso de corrosión ya que no se presenta una resistencia que impida el paso de corriente desprendida por los átomos metálicos al convertirse en cationes (Ramirez Parquet & otros, 2006).

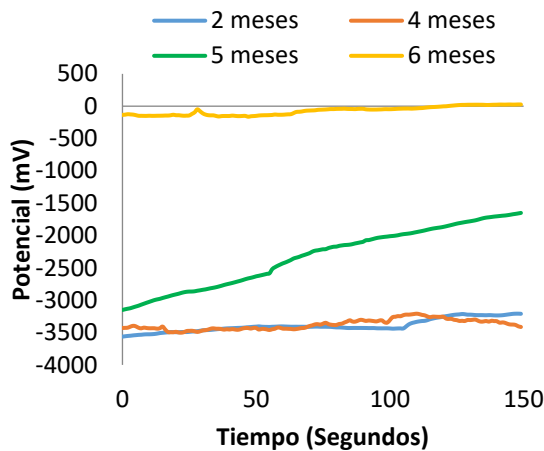
En la grafica 1 Corriente vs Tiempo se muestra la variación de corriente que presento el acero con respecto al tiempo, obteniendo como resultado que a los 6 meses de exposición hay un aumento en la corriente, que se puede relacionar con la hidratación de la película alquidálica.



**Gráfico 1** Diagrama corriente vs tiempo para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico

Fuente: Elaboración propia

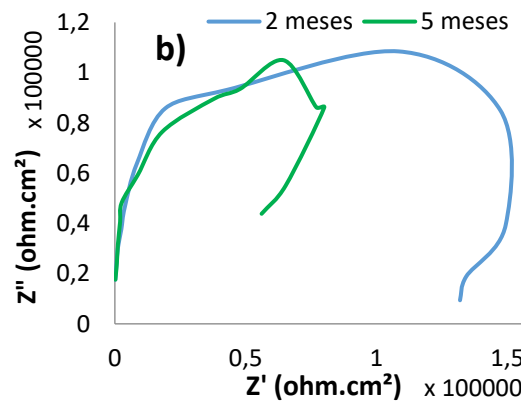
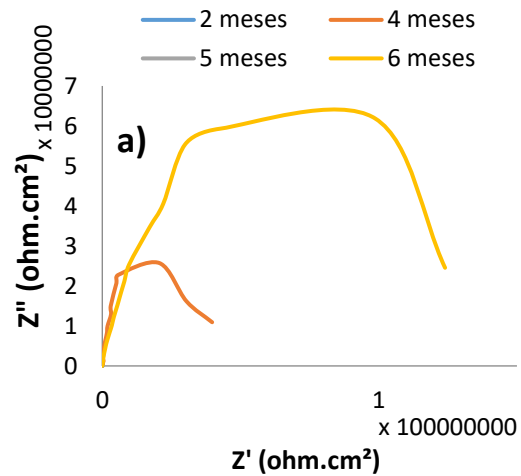
De acuerdo a Walter G.W. (1986). la vida útil de un recubrimiento se puede relacionar cuando el voltaje o potencial se vuelve más electropositivo en función del tiempo. Sin embargo, cuando este empieza a disminuir significa que el recubrimiento se ha hidratado y no protege satisfactoriamente al sustrato metálico. En la gráfica 2 se aprecia un incremento de la diferencia de voltaje a circuito abierto, lo que es indicativo de la protección de la corrosión del acero y la estabilidad del recubrimiento.



**Gráfico 2** Diagrama potencial vs tiempo para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico

Fuente: *Elaboración propia*

En la gráfica 3 se muestra el diagrama de Nyquist para el recubrimiento galvanizado en frío mas esmalte alquidálico a 2, 4, 5 y 6 meses de exposición, este recubrimiento es resistente a la humedad y ambientes agresivos. Al hidratarse la película del alquidálico se presenta un incremento en los valores de impedancia real e imaginaria para los 4 y 6 meses de exposición (Gráfica 3a), ya que la impedancia es una oposición al paso de señal eléctrica, el aumento demuestra una mejor protección del recubrimiento contra la corrosión, debido a la activación de pigmentos de zinc (RZC), que sellan los poros e imperfecciones de la película. La interface resistiva transita a una interface capacitiva, lo que es indicativo de la formación de óxidos protectores (4, 5 y 6 meses de exposición).

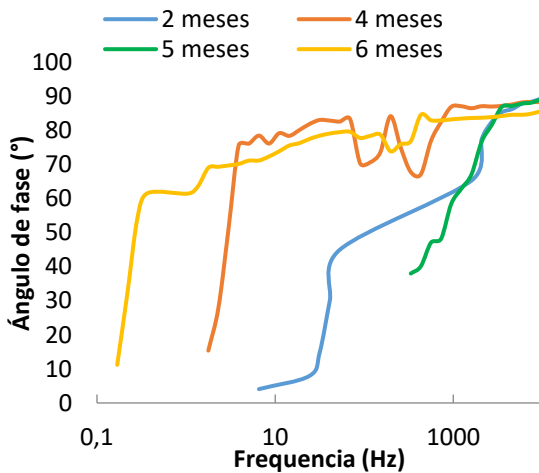


**Gráfica 3.** Diagrama de impedancia en Nyquist para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico en la atmosfera de Poza Rica a) 2,4,5 y 6 meses de exposición b) zoom para 2 y 5 meses de exposición

Fuente: *Elaboración propia*

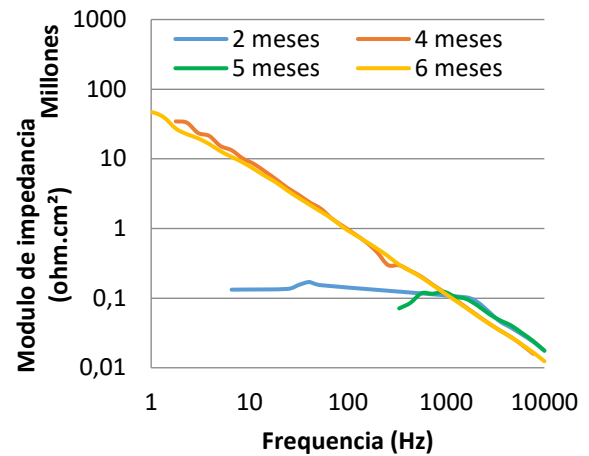
En el diagrama de Bode ángulo de fase vs impedancia para el recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico (Gráfica 4) en la región de alta frecuencia (1E02 a 1E04 Hz) es posible apreciar un incremento en el ángulo de fase a los 4 y 6 meses de exposición lo que indica una mayor resistencia de la película de dicho recubrimiento en este periodo de tiempo.

Este mismo incremento se mantiene en la media frecuencia (corrosión por activación, 1E0 a 1E02 Hz) y baja frecuencia (difusión limitada). El modulo de impedancia (Gráfica 5) también presenta un incremento a los 4 y 6 meses de exposición con valores cercanos a 1E+08 Ohm\*cm<sup>2</sup>, lo que se debe a que el recubrimiento al inicio de la evaluación forma una barrera que protege al metal, impidiendo el acceso al electrolito, esta barrera incrementa en función del tiempo de exposición.



**Gráfico 4** Diagrama de Bode ángulo de fase vs frecuencia para el sistema galvanizado en frío más esmalte alquidálico en la atmosfera de Poza Rica a 2,4,5 y 6 meses de exposición

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 5** Diagrama de Bode módulo de impedancia vs frecuencia para el sistema galvanizado en frío más esmalte alquidálico en la atmosfera de Poza Rica a 2,4, 5 y 6 meses de exposición

Fuente: Elaboración propia

### Galvanizado en frío poliuretano de dos componentes

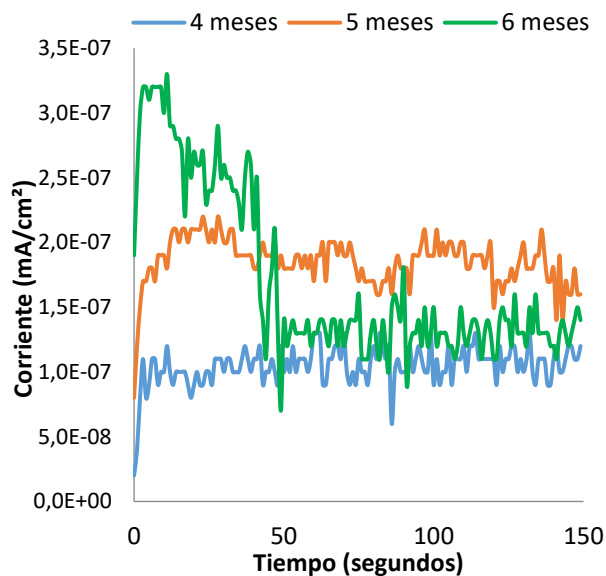
En la tabla 2 se presentan los valores de Ecorr y Rp para el sistema galvanizado en frío poliuretano de dos componentes, los valores de Rp se encuentran entre 8.9E7 y 3.3E8 Ohm-cm<sup>2</sup> este incremento demuestra que su comportamiento protector mejora conforme transcurre el tiempo de exposición, mientras que el Ecorr presenta un aumento en aumento en sus valores a los 4 meses de exposición, lo que indica que es cuando mayor tendencia a la corrosión presenta el material recubierto.

| Tiempo (meses) | Ecorr | Rp (Ohm-cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|-------|---------------------------|
| 0              | ----- | 8.9x10 <sup>7</sup>       |
| 2              | ----- | 6.6 x10 <sup>7</sup>      |
| 4              | -5475 | 2.2 x10 <sup>7</sup>      |
| 5              | -1500 | 4.7 x10 <sup>8</sup>      |
| 6              | e     | 3.3 x10 <sup>8</sup>      |

**Tabla 2.** Resultados obtenidos para el sistema galvanizado en frío poliuretano mediante la técnica de Resistencia a la polarización lineal

Fuente: Elaboración propia

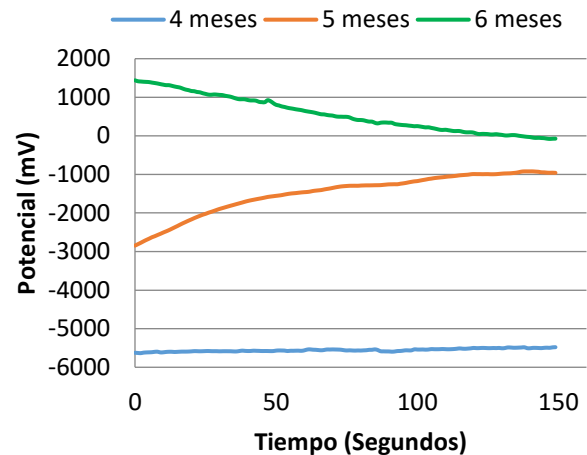
En la Gráfica 6 se muestra la variación de corriente con respecto al tiempo que presenta el acero recubierto con galvanizado en frío poliuretano de dos componentes al ser expuesto a la atmosfera de la ciudad de Poza Rica, Ver; la película es hidratada por lo que se presenta un incremento de corriente de acuerdo al tiempo de exposición.



**Gráfico 6** Diagrama corriente vs tiempo para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío poliuretano

Fuente: Elaboración propia

Un incremento de la diferencia de voltaje a circuito abierto indica que el acero es protegido de la corrosión, en este caso por el recubrimiento galvanizado en frío poliuretano de dos componentes como se muestra en la gráfica 7.

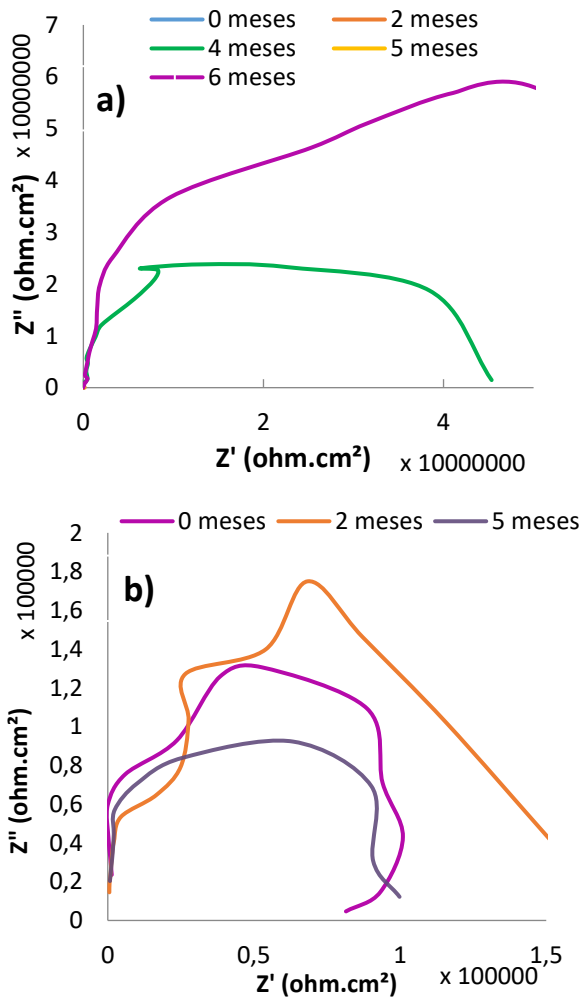


**Gráfico 7** Diagrama potencial vs tiempo para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío poliuretano

Fuente: Elaboración propia

El sistema de recubrimiento galvanizado en frío poliuretano de dos componentes presenta un incremento en la impedancia real e imaginaria a los 4 ( $4.5E7$ ,  $2.3E7$  Ohm-cm<sup>2</sup>) y 6 ( $4.9E7$ ,  $5.8E7$  Ohm-cm<sup>2</sup>) meses de exposición en la atmosfera de poza rica (gráfica 8a) lo que demuestra que el recubrimiento está protegiendo al acero de la corrosión, mientras que en la gráfica 8b se muestra el comportamiento para 0,2 y 5 meses de exposición, presentando una disminución a los 5 meses de exposición ( $9.9E4$ ,  $9.2E4$  Ohm-cm<sup>2</sup>), esto se debe a la absorción de agua por parte de la película, lo cual favorece las reacciones de corrosión debido al transporte iónico a nivel interface.

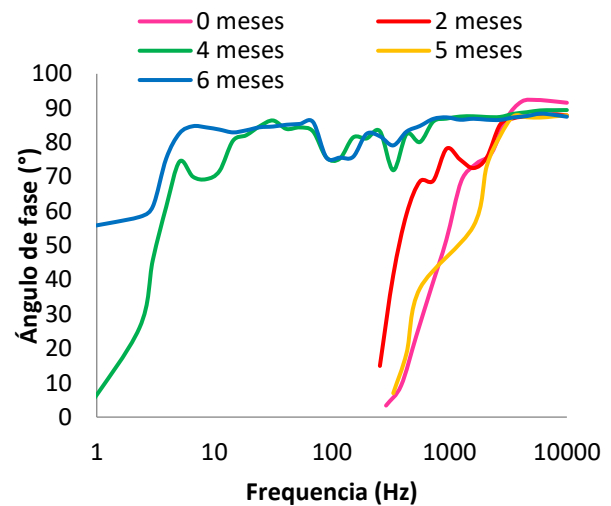




**Gráfico 8** Diagrama de impedancia en Nyquist para a) sistema galvanizado en frío poliuretano en la atmósfera de Poza Rica b) zoom para 0, 2 y 5 meses de exposición

Fuente: Elaboración propia

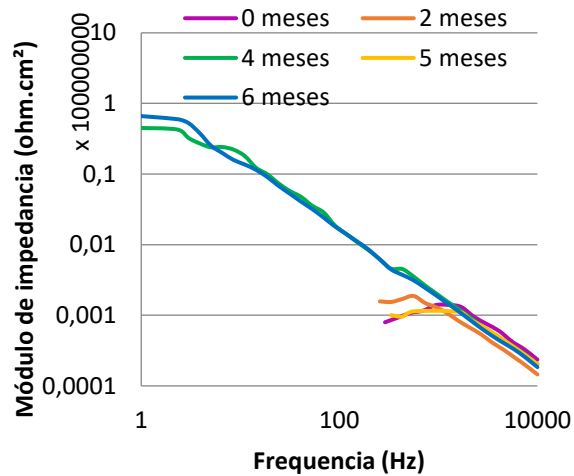
En el diagrama de Bode ángulo de fase vs frecuencia para el sistema galvanizado en frío poliuretano de dos componentes (gráfica 9) se presenta un incremento a los 4 y 6 meses de exposición en la región de alta frecuencia este incremento se mantiene en la media y baja frecuencia, lo que muestra que en este periodo de tiempo es cuando mayor resistencia presenta el recubrimiento y se desarrolla la formación de la película, así como una mayor resistencia a la transferencia de carga. El módulo de impedancia (gráfica 10) al principio de la evaluación se encuentra en el rango de  $7.9E4 \text{ ohm.cm}^2$ , mismo que aumenta hasta  $5.9E7 \text{ ohm.cm}^2$  a los 6 meses de exposición.



**Gráfico 9** Diagrama de Bode ángulo de fase vs frecuencia para sistema galvanizado en frío poliuretano en la atmósfera de Poza Rica a 0,2,4,5 y 6 meses de exposición

Fuente: Elaboración propia





**Gráfico 10** Diagrama de Bode modulo de impedancia vs frecuencia para sistema galvanizado en frío poliuretano en la atmosfera de Poza Rica a 0,2,4,5 y 6 meses de exposición

Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

Se demostró mediante el uso de técnicas como la RPL y EIE el comportamiento que presentó cada sistema de recubrimiento al ser expuesto en la atmosfera de Poza Rica, Ver; en diferentes periodos de tiempo.

A través de estas técnicas, se logró definir que tanto el recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico y el recubrimiento galvanizado en frío poliuretano presentaron un comportamiento similar a los 4 y 6 meses de exposición. Mediante el diagrama de Nyquist se observó un aumento en los valores de impedancia para ambos recubrimientos ya que, en ese periodo de tiempo, se activaron sus pigmentos de zinc ofreciendo una mejor protección contra la corrosión. Mientras que el diagrama de Bode demuestra un aumento en la resistencia de la película para el mismo periodo de tiempo en ambas pinturas.

Por otro lado, los resultados obtenidos de la grafica voltaje contra tiempo mediante la técnica de Resistencia a la polarización indican que un aumento en la diferencia de voltaje para ambas pinturas significa una buena protección contra la corrosión del acero y estabilidad del recubrimiento.

Se demostró que ambos recubrimientos, presentan un comportamiento similar en sus respectivas evaluaciones electroquímicas, siendo a los 4 y 6 meses el periodo de tiempo en que ambas pinturas presentan mayor actividad protectora, debido a las condiciones atmosféricas a las que fueron expuestas.

## Referencias

- Calderón, J., & Rossa Mattos, O. (2006). Análisis de la evolución del potencial del circuito abierto del cobalto en medio levemente alcalino. *Revista Facultad de Ingeniería*(38).
- Castañeda-Valdéz, A., & Rodriguez-Rodriguez, M. (2014). Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. *CENIC Ciencias Químicas*, 45, 52-59.
- Codelpa. (octubre de 2015). *Galvanizado en frío*. Obtenido de [www.codelpa.cl/content/download/.../TDS%20GALVANIZADO%20EN%20FRIO.pdf](http://www.codelpa.cl/content/download/.../TDS%20GALVANIZADO%20EN%20FRIO.pdf)
- Genescá, J. (2002). *Técnicas electroquímicas para el estudio de la corrosión*. México: Programa universitario de materiales UNAM.
- González Hernández, J. (1984). *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*. Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas.

ISO. (1992). Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres –Determination of corrosion rate standard specimens for the evaluation of corrosivity. En *ISO 9226:1992*.

Nava, L. (2010). *Análisis del uso de la lámina galvanizada en vivienda social en México. Costos y beneficios*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.

Orozco, R. (2011). *Universidad Veracruzana*. Recuperado el 29 de agosto de 2017, de Recubrimientos anticorrosivos: <https://www.uv.mx/personal/rorozco/files/2011/05/6-UNIDAD-4-RECUBRIMIENTOS-ANTICORROSIVOS-INICIO.pdf>

Ramirez Parquet, R., & otros. (2006). Rodrigo A. Ramirez Parquet Evaluación a la resistencia a la corrosión de revestimientos orgánicos a través de técnicas electroquímicas. En *Congreso LATINCORR2006* (pág. 36). Fortaleza-Brasil: LATINCORR2006.

Walter, G. (1986). A critical review of the protection of metals by paints. *Corrosion Science*, 26(1), 27-38.