

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO  
GALVANIZADO CON REVESTIMIENTOS DE POLIÉSTER EN SOLUCIONES  
CORROSIVAS MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA DE IMPEDANCIA  
ELECTROQUÍMICA.**

**CRISTIAN EDUARDO PÁEZ PÉREZ  
KELVIN ARMANDO ROA MONSALVE**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2017**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO  
GALVANIZADO CON REVESTIMIENTOS DE POLIÉSTER EN SOLUCIONES  
CORROSIVAS MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA DE IMPEDANCIA  
ELECTROQUÍMICA.**

**CRISTIAN EDUARDO PÁEZ PÉREZ  
KELVIN ARMANDO ROA MONSALVE**

**Trabajo de grado (modalidad: proyecto de investigación) para  
Optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**Director:  
DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS  
DOCTOR EN CORROSIÓN**

**Codirector:  
ANDERSON SANDOVAL AMADOR  
MAGISTER EN MATERIALES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

*Gracias a mi Dios por ser mi mayor apoyo, mi bastón y mi faro durante mi paso por la Universidad; por confiar y creer en mí, aun cuando ni yo lo hice; por demostrarme su amor incondicional.*

*A mi mama **Alicia Pérez Quintero**, por estar para mi cada instante de alegría, triunfo, tristeza y derrota; por cada palabra de ánimo y amor entregado; gracias porque aun en la distancia su voz, su fuerza y amor siempre permanecieron cerca.*

*A mi papa **José Danuil Páez Ortiz**, por enseñarme día a día a luchar por mis ideales y a no darme por vencido ante cualquier derrota o problema presente; su fortaleza y empeño son mi gran ejemplo a seguir.*

*A mi princesa **Kelly Páez Pérez**, por estar conmigo desde el inicio de este sueño y ayudarme a levantar y a no dudar de mí ante cualquier adversidad. Por enseñarme con su carácter que a pesar de cada derrota hay que mantener la cabeza en alto y la mirada positiva hacia lo desconocido. Te amo.*

*A mis abuelos (**Clodomiro, Aura Esther, Luis José y Ana Rosa**), por darme el privilegio de formar parte de su hogar y regalarme a los mejores padres en la faz de la tierra. Por educarme con los mejores valores y principios que me forjaron y me hacen ser la persona que soy hoy en día.*

*A mis mejores amigas, **Adela portillo y Adriana Álvarez**, por crecer conmigo y a pesar de la distancia continuar amándome y apoyándome en este largo recorrido. Las adoro*

*A mi compañero, y amigo de proyecto de grado, **Kelvin Roa Monsalve**, por cada momento de risa vivido en estos seis años compartidos; su fortaleza y forma de*

*ver la vida me enseñaron a afrontar cada problema con determinación. Gracias por acompañarme hasta el final de esta etapa. Te quiero.*

*A mi mejor compañía, **Erika Ruiz Melo**, por ser ese hombro, esas manos, esa sonrisa, y esos regaños, que estuvieron a mi lado y ayudaron a sentirme como en casa. Te convertiste en mi amiga, mi hermana, mi novia. Gracias por estar siempre ahí. Te quiero.*

*Y por último a mi amor **M.A.R.C.** por demostrarme que con amor todo es posible, gracias por permitirme conocerte y aprender a amar de una manera incondicional.*

**Cristian Eduardo Páez Pérez.**

*Gracias a Dios primeramente por darme las fuerzas necesarias para luchar y llegar hasta el final de esta meta ya que con el todo es posible.*

*A mi madre **Josefina Monsalve** por brindarme su apoyo incondicional, gracias por ser parte de mi vida y demostrarme tu amor infinito en cada momento e instante, te amo mamá.*

*A mi padre **Alfonso Roa García (Q.E.P.D)** por confiar en mí, por sus sabías palabras y consejos que me han servido para afrontar cada situación en mi vida con madurez y responsabilidad, por dejarme esa su herencia más valiosa (el estudio).*

*A mi hermana **Lina María Roa Monsalve** y sobrinos **Juan C y Sergio A. Martínez Roa** por ser parte de la motivación para cumplir con este propósito y estar acompañándome en mí día a día con la mejor actitud y disposición.*

*A mi compañero y amigo **Cristian Pérez** por estar en los buenos y malos momentos vividos y hacer parte de todo este camino de aprendizaje.*

*A **Kathas, Leidy y Vanesa** por acompañarme en esta nueva experiencia de mi vida, confiar en mis capacidades y estar siempre presente con una gran sonrisa y valiosa amistad.*

*A mis nuevos y grandes amigos **Isa, Gimena, Xiomara, Anderson, Erika, Andrés...** y a los demás que son un resto... muchas gracias por cada vivencia y experiencia compartida la cual ha sido única e irremplazable. Además que espero sigan siendo muchos años más de amistad.*

**Kelvin A. Roa Monsalve**

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la **Universidad Industrial de Santander** por darnos la formación requerida para ser de nosotros unos ingenieros con los mejores valores y principios, y por permitirnos ser parte de esta comunidad prestigiosa y reconocida.

Al **Grupo de Investigación en Corrosión (GIC)**, dirigido por el **Ph.D. Darío Yesid Peña** por darnos las herramientas necesarias para trabajar en nuestro proyecto de grado con el fin de alcanzar el título de Ingenieros Metalúrgicos.

A nuestro Codirector **Anderson Sandoval Amador**, por guiarnos durante este proceso de aprendizaje y educarnos aún más en el ámbito de la corrosión, por confiar en nosotros para asumir este reto y apoyarnos en nuestra elaboración del libro.

Al **lab. de Microscopia de la Universidad Nacional, sección Medellín**, y **Lab de Microscopía parque Guatiguara**, por su colaboración con la toma de datos e imágenes por SEM y EDS los cuales fueron de vital importancia para esta investigación.

A nuestras amigas **Astrid Xiomara, Angie Gimena, Edna Yelitza**, por estar con nosotros durante el paso vivido en la universidad, su compañía y formas de ser, hicieron de esta etapa una experiencia única, gracias por cada experiencia vivida a su lado.

A nuestros familiares por brindarnos ese apoyo constante y acompañarnos con palabras de ánimo en este largo recorrido.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	18
1. ANTECEDENTES.....	19
1.1 MECANISMO DE CORROSIÓN EN EL ACERO GALVANIZADO .....	21
1.1.1 Mecanismo anódico .....	21
1.1.2 Mecanismo catódico .....	22
2. OBJETIVOS.....	23
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	23
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	24
3.2 REACTIVOS IMPLEMENTADOS .....	25
3.3 CELDA ELECTROQUÍMICA.....	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	29
4.1 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y MAPPING .....	29
4.1.1 Caracterización de la lámina POLIÉSTER.....	29
4.1.2 Caracterización de la lámina SÚPER POLIÉSTER .....	31
4.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA DE TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR). .....	33
4.2.1 Espectroscopia FTIR para las láminas de Poliéster y SP .....	33
4.3 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) .....	35
4.3.1 Diagramas.....	36

4.3.1.1. Solución que simula Ambiente Tropical .....	36
4.3.1.2. Solución que simula Lluvia Ácida.....	40
5. CONCLUSIONES .....	47
6. RECOMENDACIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS.....	53

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Variables de los sistemas. ....	25
Tabla 2. Reactivos y concentraciones presentes en una solución que simula un ambiente tropical (salino). ....	25
Tabla 3. Reactivos y concentraciones presentes en una solución que simula un ambiente en lluvia ácida. ....	26
Tabla 4. Bandas características del polímero a) Poliéster, b) Súper poliéster. ....	35
Tabla 5. Valores de los elementos del circuito equivalente. 0 Días Ambiente Tropical Poliéster y Súper Poliéster. ....	37

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Dimensiones de la muestras empleadas. ....	24
Figura 2. Esquema de la celda electroquímica empleada en este estudio. ....	27
Figura 3. Montaje experimental empleado para los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica. ....	28
Figura 4. Microscopia electrónica de barrido, acero galvanizado con recubrimiento poliéster, estado inicial. ....	29
Figura 6. Microscopia electrónica de barrido, acero galvanizado con recubrimiento SP, estado inicial. ....	31
Figura 7. (Mapping) corte transversal acero galvanizado con recubrimientos de Súper Poliéster. ....	32
Figura 8. Espectro FTIR del recubrimiento de la lámina, a) Poliéster, b) Súper Poliéster. ....	33
Figura 9. Diagrama de Nyquist para un t = 0 días (0-1 hora) en un ambiente tropical. ....	36
Figura 10. Circuito equivalente ajustado para el sistema en Ambiente Tropical a un tiempo de 0 días ....	37
Figura 11. Diagrama de Nyquist para un t = 15 días (360 horas) en una solución de Ambiente Tropical. ....	38
Figura 12. Diagrama de Nyquist para un t = 30 días (720 horas) en una solución de Ambiente Tropical. ....	39

Figura 13. Diagrama de Nyquist para un $t = 0$ días (0-1 hora) en una solución de Lluvia Ácida.....	40
Figura 14. Diagrama de Nyquist para un $t = 15$ días (360 horas) en una solución de Lluvia Ácida .....	41
Figura 15. Diagrama de Nyquist para un $t = 30$ días (720 horas) en una solución de Lluvia Ácida. ....	42
Figura 16. Circuito equivalente ajustado para el sistema en Lluvia ácida a un tiempo de 30 días .....	44
Figura 17. Imágenes de la morfología superficial del recubrimiento para la lámina de (Súper Poliéster) a un tiempo de 30 días en un ambiente que simula lluvia ácida .....	45
Figura 18. Imágenes de la morfología superficial del recubrimiento para la lámina de Poliéster a un tiempo de 30 días en un ambiente que simula lluvia ácida .....	46

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. GRÁFICAS DE LOS DIAGRAMAS DE BODE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA .....	54
ANEXO B. DIAGRAMAS DE CIRCUITO EQUIVALENTES PARA LOS DEMÁS SISTEMAS ADJUNTOS LOS VALORES EXACTOS DE CADA UNO TABULADOS .....	57

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO GALVANIZADO CON REVESTIMIENTOS DE POLIÉSTER EN SOLUCIONES CORROSIVAS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.\*

**AUTORES:** CRISTIAN EDUARDO PÁEZ PÉREZ  
KELVIN ARMANDO ROA MONSALVE\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Acero Galvanizado, revestimientos poliméricos, Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

### DESCRIPCIÓN:

En la industria Colombiana se han venido aplicando pinturas tipo poliéster, y estas han ofrecido una excelente alternativa para mejorar la resistencia a la corrosión del acero galvanizado, sin embargo se continúan desarrollando materiales que permitan incrementar la vida útil de estos. Por tal motivo, en este trabajo de investigación se presenta una comparación del comportamiento frente a la corrosión de una pintura tipo poliéster y una pintura tipo superpoliéster, para ello las muestras de los dos materiales se evaluaron mediante espectroscopia de impedancia electroquímica expuesta a soluciones simuladas de ambiente tropical y lluvia ácida. El estudio se realizó a 0, 15 y 30 días de inmersión. Los resultados permitieron observar que la lámina de acero galvanizado con el recubrimiento de "Súper Poliéster" presentó mejor eficiencia ante el ataque corrosivo en ambas soluciones. La morfología de la estructura de las capas de las cuales están compuestas por las láminas de acero galvanizado se analizó por microscopia electrónica de barrido (SEM) mostrando mayor porcentaje de Ti en la lámina de Súper Poliéster, además se realizó un análisis de la composición elemental y estructural de la lámina de acero con la técnica espectroscópica de energía dispersiva (EDS) y espectroscopia de infrarrojo (FTIR) mostrando los grupos funcionales de la red polimérica. Se concluyó que quien presenta mejor resistencia a ataques corrosivos en ambas soluciones es la lámina Súper Poliéster, debido a su mayor porcentaje de Ti y Zn.

---

\* Proyecto de grado (Modalidad: proyecto de investigación)

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Ph.D. Darío Yesid Peña Ballesteros. Codirector: Anderson Sandoval Amador.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE RESISTANCE TO CORROSION OF A GALVANIZED STEEL WITH POLYESTER COATINGS IN CORROSIVE SOLUTIONS THROUGH ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY.\*

**AUTHORS:** CRISTIAN EDUARDO PÁEZ PÉREZ  
KELVIN ARMANDO ROA MONSALVE\*\*

**KEYWORDS:** Galvanized Steel, Polymer Coatings, Electrochemical Impedance Spectroscopy,

### DESCRIPTION:

Polyester paints have been applied in the Colombian industry, and these have offered an excellent alternative to improve the corrosion resistance of galvanized steel, however, materials are still being developed to increase their useful life. For this reason, this work presents a comparison of the behavior against corrosion of a paint type polyester and a paint super polyester type, for this the samples of the two materials were evaluated by electrochemical impedance spectroscopy exposed to simulated solutions of environment tropical and acid rain. The study was performed at 0, 15 and 30 days of immersion. The results showed that the galvanized steel sheet with the "Super Polyester" coating presented better efficacy against corrosive attack in both solutions. An analysis of the elemental composition of the sheet layer structure of the galvanized steel sheets was performed and analyzed by scanning electron microscopy (SEM) showing a higher percentage of Ti in the Super Polyester sheet and structural of the sheet of steel with the technique of dispersive energy spectroscopy (EDS) and (infrared spectroscopy (FTIR) showing the functional groups of the red polymerization). It was concluded that the one that presents better resistance to corrosive attacks in both solutions is the Super Polyester sheet, due to its high percentage of Ti and Zn.

---

\* Degree Project. (Modality: research Project)

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Adviser: Ph.D. Dario Yesid Peña Ballesteros. Coadviser: M.Eng. Anderson Sandoval Amador.

## INTRODUCCIÓN

Con el transcurrir del tiempo se han venido desarrollando diversos análisis y avances en los materiales utilizados para la infraestructura debido a que el comportamiento de estos debe ser cada vez mejor por su alta exposición al ambiente atmosférico, pues este es un factor corrosivo de gran efecto. Para esto se creó una capa de cinc sobre el acero (material de gran importancia en la elaboración de infraestructuras), denominado así acero galvanizado con el que se ayudó a la prevención de la corrosión en estas industrias<sup>1</sup>.

En la actualidad una de las industrias colombianas encargadas de elaborar este tipo de láminas, se encuentra implementando un desarrollo en la fabricación del acero galvanizado, adhiriendo a la capa de cinc un revestimiento de pintura polimérica con el objetivo de brindar mayor eficiencia y protección al acero en cuanto a los ataques corrosivos a los que este material se tiene expuesto. La industria a pesar de su variedad provee una lámina específica con una cantidad de acero galvanizado denominada Z180 con 180 g/cm<sup>2</sup> de cinc en su superficie y con esta se trabaja los diferentes tipos de recubrimientos que se han venido ofreciendo (poliéster y súper poliéster).

Con el siguiente trabajo de investigación se compara las láminas con los dos tipos diferentes de revestimiento y se predice cuál de estos dos presenta mejor eficiencia ante la corrosión que se obtiene de simular dos soluciones, ambiente tropical y lluvia ácida ya que las láminas presentan una gran exposición a estos dos ambientes. Con estos resultados la empresa tomara decisiones sobre cuál de los dos recubrimientos le generara una mejor eficiencia y una mayor venta por su excelente propiedades.

---

<sup>1</sup> CARRASCAL, Alexander; MARTINEZ Luis. Estudio electroquímico de un acero galvanizado pintado expuesto a diferentes medios de cloruros y sulfatos. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2015.

## 1. ANTECEDENTES

El galvanizado en caliente como vital importancia para el acero y su protección contra la corrosión es un proceso de gran aceptación para este efecto que causa en muchas industrias altos costos e inversiones. El acero galvanizado se ha utilizado de manera drástica en industrias químicas y de infraestructura para combatir los diferentes tipos de corrosión que puedan presentarse.<sup>2</sup>

Se han venido realizando diferentes estudios con respecto a los productos de corrosión formados en el acero galvanizado para observar la rapidez con que avanzan; es por eso que se realizó un estudio utilizando placas con atmosferas con menor salinidad en donde se establece que la atmosfera con baja concentración de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_2^-$  la capa de carbonato de Zn crece lentamente y disminuye la velocidad de penetración de la corrosión. Por otro lado las placas de galvanizado expuestas en atmosferas marinas a los pocos días de formación crean cloruros que van creciendo hasta unirse en toda la superficie.<sup>3</sup>

En el acero galvanizado se generan ciertos productos de corrosión con el Zn en ambientes atmosféricos, en donde se presenta humedad; midiéndose por EIS (Espectroscopia de Impedancia Electroquímica) se realizó un estudio en donde se concluyó que la corrosión del acero comienza cuando el recubrimiento de Zn no actúa como ánodo de sacrificio debido a la acumulación de productos de corrosión de Zn en la superficie de recubrimiento.<sup>4</sup>

---

<sup>2</sup> AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION, Galvanización en Caliente para la protección contra la corrosión de los productos de acero. [En línea]. 1996. Recuperado en 20 junio 2017. Disponible en <https://www.galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing>.

<sup>3</sup> DIAZ RODRIGUEZ, Francisco. Estudio de la corrosión atmosférica del cinc y el acero galvanizado. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ing. Físicoquímicas. 2001.

<sup>4</sup> ARENAS, M. A.; DE DAMBORENEA, J. J. Electrochemical corrosion and inhibition mechanisms of galvanized steel. [Base de datos en línea] 8 junio 2005. Revista de Metalurgia (Madrid), 42(3),

Con base a esto se ha realizado un enfoque al estudio del efecto de diferentes aplicaciones de recubrimientos base Zn en ambientes marinos, es por eso que en un ambiente marino costero tropical se exponen láminas de acero al carbono (AISI/SAE 1010) recubiertas de Zn en un periodo de 24 meses, concluyendo que la velocidad de corrosión en dicha atmosfera sobrepasa el valor máximo a la norma ISO 9223, donde los recubrimientos de Zn resultaron no adecuados en este medio ya que presento en todas las probetas corrosión-erosión. Se recomienda que estos recubrimientos se encuentren acompañados de revestimientos poliméricos, debido a que estos reducen la velocidad de corrosión.<sup>5</sup>

Se logró demostrar también que las láminas de acero galvanizado expuestas a soluciones de cloruros y sulfatos presentan un alto grado de corrosión en tiempos cortos de exposición. Los resultados arrojados predicen que en ambientes marinos-industriales las láminas de acero galvanizado no se deben emplear a menos que se sobreponga una capa superficial de pintura para aumentar la resistencia a la corrosión<sup>6</sup>. Más tarde se estudia el comportamiento de la lámina de acero galvanizado expuesto a diferentes concentraciones de cloruros y sulfatos tomando como variable el tiempo de inmersión de las láminas en dichas soluciones. Mediante Espectroscopia de Impedancia Electroquímica se determinó que para un tiempo de 15 días la velocidad de corrosión disminuyo; esto debido a que los productos de corrosión formados en ese tiempo actúan como barrera protectora en el acero. A pesar de que las láminas inmersas en la solución durante 30 días formaron productos de corrosión, la degradación de la capa de óxidos se

---

165-174. Recuperado en 10 julio 2017. Disponible en <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2006.v42.i3.16>

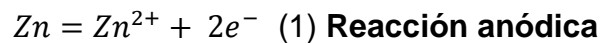
<sup>5</sup> SALAS, Orlando, et al. Desempeño de recubrimiento base Zn en un ambiente tropical de elevada agresividad. [En línea]. Maracaibo, Universidad del Zulia. 2008. Recuperado en 29 junio 2017. Disponible en [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702008000400008](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702008000400008).

<sup>6</sup> ARIAS MALDONADO, Chehin. Estudio del comportamiento de un ambiente corrosivo con cloruros y sulfatos sobre una lámina de acero galvanizado. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica Ciencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2011.

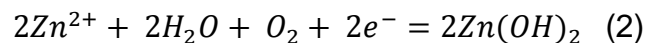
ve afectada por la presencia de cloruros quienes penetran dicha capa hasta llegar al metal base provocando una corrosión localizada.<sup>7</sup>

## 1.1 MECANISMO DE CORROSIÓN EN EL ACERO GALVANIZADO

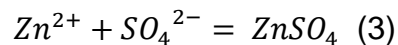
**1.1.1 Mecanismo anódico.** Para que se lleve a cabo la reacción anódica en el acero galvanizado es necesario la presencia de los iones  $SO_4^{2-}$  y los iones  $Cl^-$  los cuales reaccionan dando lugar a los electrones.<sup>8</sup>



La principal reacción es la (1), la cual se presenta al combinarse con los iones  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$  permitiendo que el Zn entre a formar parte del electrolito como ion y reaccione con el agua produciendo la primera capa de hidróxido.<sup>9</sup>



Dicha capa presenta porosidad permitiendo el paso continuo de iones  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$  quienes siguen reaccionando debido a la diferencia del tamaño de las moléculas, donde el primero que reacciona es el ion  $SO_4^{2-}$ .<sup>10</sup>



---

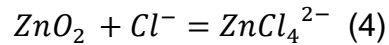
<sup>7</sup> SIERRA FAJARDO, Deisy; QUINTERO ASCANIO, Leidy. Estudio del comportamiento de la corrosión de un acero galvanizado que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. 2012

<sup>8</sup> RAMIREZ JEREZ, Julieth; VALERO ALVARADO, Mario. Influencia del tamaño del cristal de cinc en el comportamiento electroquímico de láminas de acero galvanizadas, expuestas a diferentes concentraciones de cloruros y sulfatos. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. 2014.

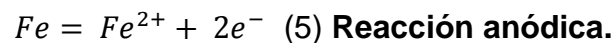
<sup>9</sup> Ibíd.

<sup>10</sup> Ibíd.

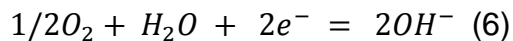
La capa de ZnSO<sub>4</sub> proporciona cierta estabilidad al sistema hasta el momento en que se combina el Cl<sup>-</sup> con el Zn por su tamaño, difundiendo a través de la capa de ZnSO<sub>4</sub> dando lugar a:



Produciendo ZnCl<sub>4</sub><sup>2-</sup> que es un compuesto soluble el cual se va acumulando debajo de las capas de hidróxido de Zn y sulfatos de Zn, hasta que termina por romperla y en conjunto con el agua se disuelve formando cráteres en la capa protectora del acero, provocando la concentración de corrosión localizada en estos puntos, dando como resultado.<sup>11</sup>



**1.1.2 Mecanismo catódico.** La reacción catódica es presentada por la reducción del oxígeno disuelto.<sup>12</sup>



Dependiendo de las características del electrolito en contacto con la superficie metálica la reacción de descarga de hidrogeno puede ser.<sup>13</sup>

---

<sup>11</sup> Ibíd.

<sup>12</sup> Ibíd.

<sup>13</sup> Ibíd.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la resistencia a la corrosión de láminas galvanizadas pintadas con diferentes poliésteres en soluciones corrosivas simuladas mediante espectroscopia de impedancia electroquímica.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las láminas galvanizadas y pintadas mediante ensayos de SEM, EDS y espectroscopia de infrarrojo.
- Analizar el comportamiento electroquímico de las láminas galvanizadas y pintadas mediante espectroscopia de impedancia electroquímica después de exponer las muestras a soluciones que simulan ambientes tropicales y lluvia ácida.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación se procede a explicar de forma detallada la metodología requerida para llevar a cabo el proyecto realizado.

#### Preparación de probetas

Se cortaron láminas de acero galvanizado y pintado de 10 x 6 cm. El área de trabajo para los ensayos electroquímicos se fijó a 4 cm<sup>2</sup>, para ello, se cortaron trozos de papel adhesivo con una sección cuadrada en el centro que permitió delimitar el área de exposición de las muestras (ver Figura 1). En cada muestra preparada, se genera un pequeño rapado en la zona pintada que permitirá realizar el contacto eléctrico necesario para el registro de datos de las pruebas electroquímicas.

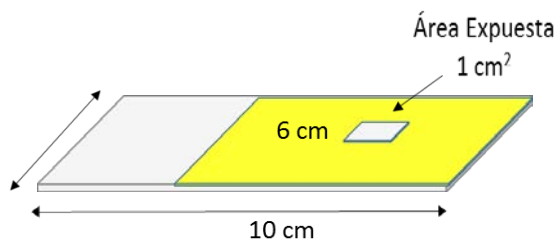


Figura 1. Dimensiones de la muestras empleadas<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> EMPRESA ACESCO. CIA.SA. Manual Técnico del Acero Galvanizado, Empresa Acesco. Barranquilla. ACESCO.0-53 pp. 2013.

### 3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

En la Tabla 1 se muestra el diseño de experimentos que se empleó para realizar este trabajo. Con el presente diseño se pudo determinar el efecto del tiempo de exposición en la resistencia a la corrosión de las láminas de acero galvanizado y pintado, además fue posible evaluar el efecto del electrolito en el desempeño del material.

Tabla 1. Variables de los sistemas.

PRUEBA	LÁMINA	TIEMPO 0 días	TIEMPO 15 días	TIEMPO 30 días	AMBIENTE TROPICAL	LLUVIA ÁCIDA
1	Poliéster	X	x	x	x	
2	Súper poliéster	X	x	x	x	
3	Poliéster	X	x	x		x
4	Súper poliéster	X	x	x		x

### 3.2 REACTIVOS IMPLEMENTADOS

A continuación se presentan las composiciones de cada uno de los dos electrolitos empleados para el presente trabajo.

Tabla 2. Reactivos y concentraciones presentes en una solución que simula un ambiente tropical (salino).

COMPUESTO	CONCENTRACIONES (g /L)
Sulfato de sodio	59,64
Cloruro de sodio	10,51

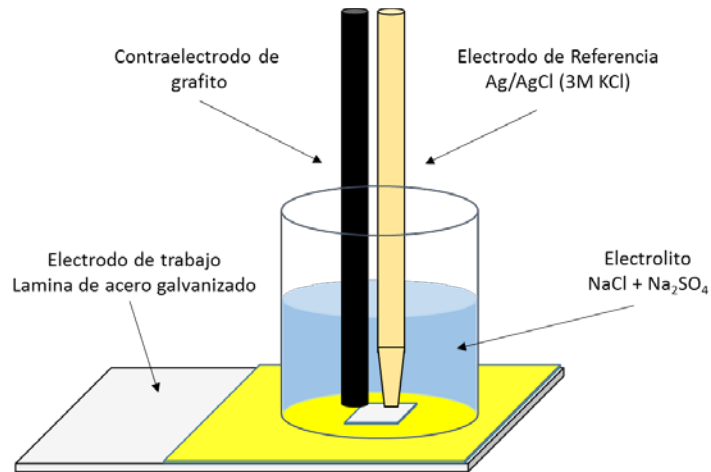
Tabla 3. Reactivos y concentraciones presentes en una solución que simula un ambiente en lluvia ácida.

<b>COMPUESTO</b>	<b>CONCENTRACIONES (g/L)</b>
Ácido sulfúrico (96%)	0,03185
Ácido nítrico (70%)	0,01575
Nitrato de sodio	0,02125
Sulfato de amonio	0,04620
Sulfato de sodio	0,03195
Cloruro de sodio	0,08485

### **3.3 CELDA ELECTROQUÍMICA.**

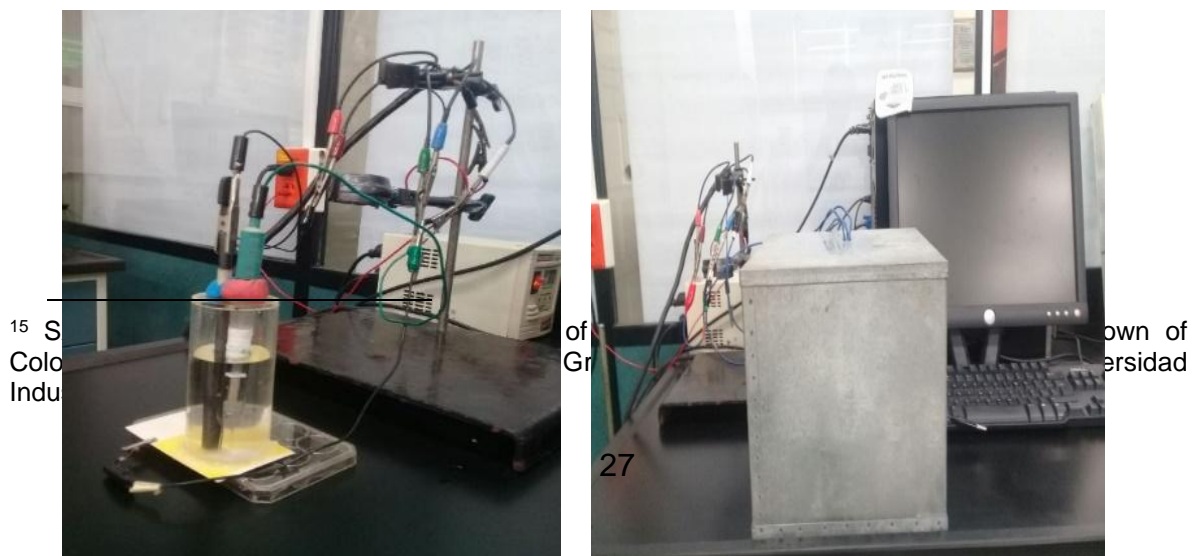
Para los ensayos electroquímicos se empleó una celda compuesta por un cilindro acrílico y la muestras de acero galvanizado. El cilindro tiene un diámetro externo 4,9 cm, diámetro interno 4,4 cm y una altura de 11 cm. Este cilindro se adhiere a la lámina galvanizada mediante silicona líquida para conformar la celda electroquímica (ver esquema en la Figura 2).

Figura 2. Esquema de la celda electroquímica empleada en este estudio.<sup>15</sup>



Las medidas de impedancia electroquímica se llevaron a cabo en un potenciostato Gamry 750 (ver Figura 4). Para ello, la celda de trabajo se introdujo en una jaula de Faraday la cual permite desarrollar las medidas electroquímicas aislando el sistema de posibles fuentes electromagnéticas que causen corrientes parásitas que pueden afectar el registro de datos. Las medidas de impedancia se llevaron a cabo aplicando 10 Mv rms vs el OCP, en un rango de frecuencias de 1 a 100K Hz, tomando 7 puntos por década.

Figura 3. Montaje experimental empleado para los ensayos de espectroscopia de



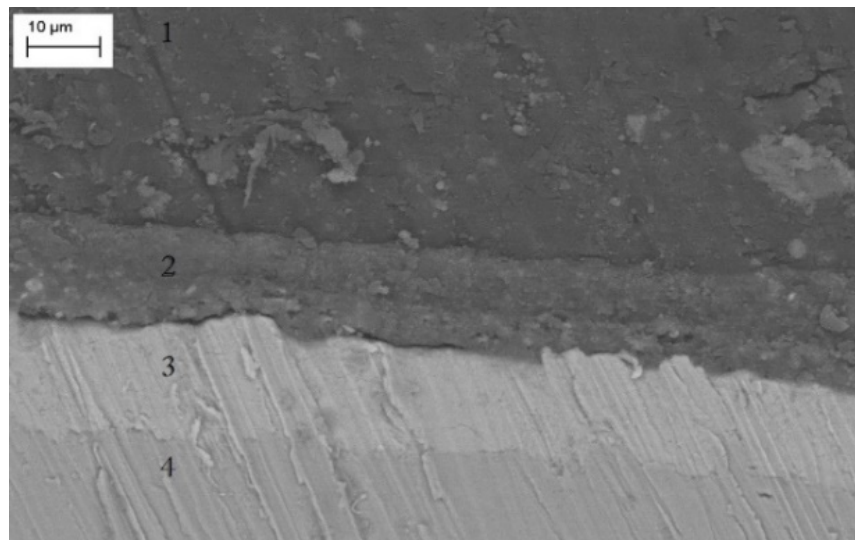
impedancia electroquímica.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y MAPPING

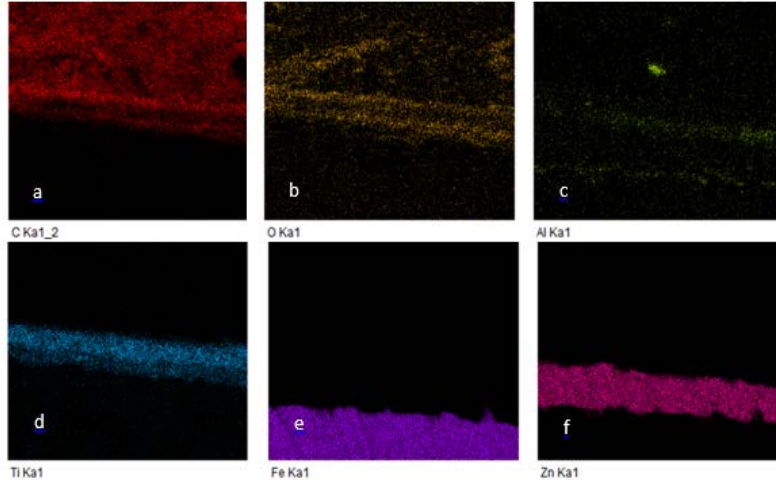
**4.1.1 Caracterización de la lámina POLIÉSTER.** En la micrografía de la Figura 4 se pueden apreciar las diferentes capas presentes en la lámina de acero galvanizado y pintado con súper poliéster. En la capa 4 se aprecia el sustrato de acero al carbono, en la capa 3 se observa la zona del galvanizado con un espesor aproximado de 17,25  $\mu\text{m}$ , mientras que en la capa 2 se observa la pintura polimérica con un espesor promedio de 15,05  $\mu\text{m}$  y en la zona 1 se aprecia la capa de la resina en la cual se encapsulo la muestra para realizar el análisis de sección transversal.

Figura 4. Microscopia electrónica de barrido, acero galvanizado con recubrimiento poliéster, estado inicial.



ELEMENTO	%
	PESO

Figura 5. (Mapping) corte transversal acero galvanizado con recubrimientos de Poliéster.



a)C	46,99
b)O	12,87
c)Al	0,46
d)Ti	1,70
e)Fe	18,19
f)Zn	17,73

Por otra parte en la Figura 5 se puede apreciar el mapa de composición elemental de la muestra de poliéster. La Fig.5.a, muestra una zona rica en carbono, esta zona se asocia a la resina en la cual se montaron las probetas y a la capa de pintura. La figura 5b se asocia al oxígeno presente tanto en la resina y en la pintura polimérica con la cual se recubrió el acero galvanizado. El aluminio que se puede observar en la Fig.5.c, se encuentra presente en la interfase del primer y el cinc, ayudando a la mayor adherencia de la capa galvanizada a la lámina, gracias a la formación del compuesto generado entre el Fe y el Al. Según LATIZA<sup>16, 17</sup>, el porcentaje en peso normal para un excelente adherencia en un baño de Zn está entre 0,15 y 0,17%, analizando la tabla obtenida en el estudio este porcentaje sobrepasa los datos estándares y es debido a la gran afinidad que posee el Al con

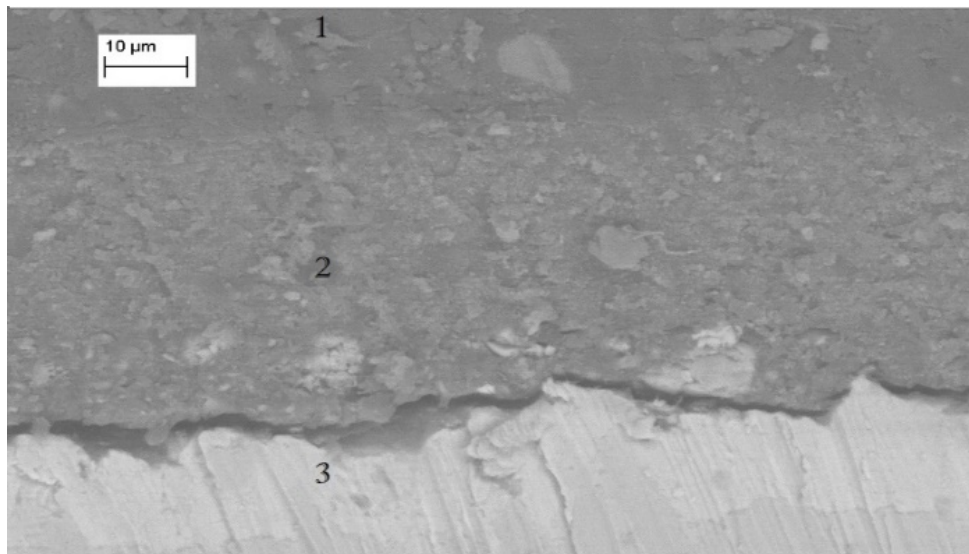
<sup>16</sup> ALMEYDA, David; MARIN, Yesid. Evaluación de la Resistencia a la corrosión de un acero galvanizado y pintado con polyester en soluciones que simulan ambiente tropical y lluvia ácida. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. 2017.

<sup>17</sup> ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA, LATIZA. El Rol del Aluminio en el Galvanizado Continuo Por Inmersión en Caliente. GalvInfoNote 2.4, 0, 1-5. 2007

el Fe<sup>18</sup>. Adicionalmente, la presencia de aluminio en la capa de pintura se puede deber a la presencia de óxido de aluminio en la pintura lo cual suele usarse para mejorar las propiedades anticorrosivas de algunas pinturas. En la Fig.5.d), se puede observar titanio, situado en la capa de pintura, este elemento suele ser utilizado como elemento anticorrosivo en forma de óxido de titanio. Por ultimo encontramos la presencia de hierro la cual se asocia al sustrato metálico (Fig.5.e) y la presencia de zinc la cual se asocia a la capa de galvanizado (Fig.5.f).

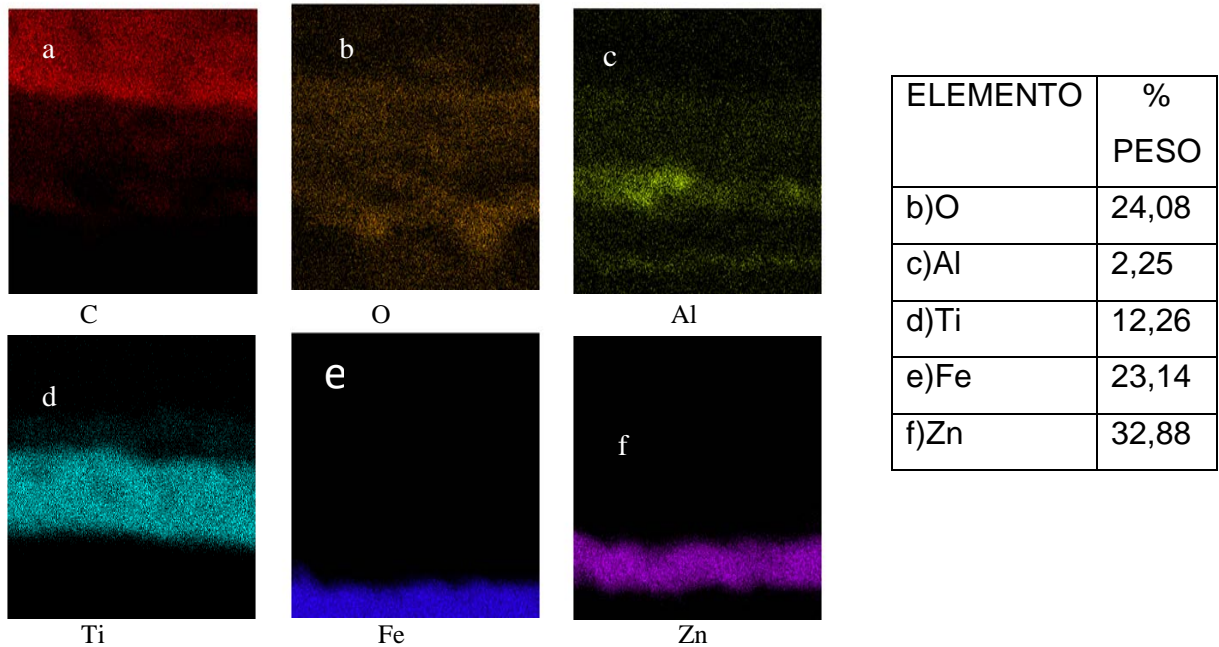
**4.1.2 Caracterización de la lámina SÚPER POLIÉSTER.** En la Fig.6. Se pueden observar las capas presentes en la lámina denominada poliéster. En la zona 1 se encuentra la resina en la cual se montaron las probetas. En la zona 2 se observa la capa de pintura con un espesor de 42,24 µm, en la zona 3 se aprecia la capa de galvanizado con un espesor aproximado de 18,10 µm y en la zona 4 tenemos el acero como material base.

Figura 6. Microscopia electrónica de barrido, acero galvanizado con recubrimiento SP, estado inicial.



<sup>18</sup> POLO, José Luis, et al. Estudio de la impedancia de la corrosión del acero inoxidable AISI 316L en las regiones pasivas y de picadura. En Gestión: Revista Metalúrgica Madrid, 1999.

Figura 7. (Mapping) corte transversal acero galvanizado con recubrimientos de Súper Poliéster.



En la Fig.7 se pueden observar el mapa de composición elemental de la lámina de acero galvanizado y pintado con súper poliéster. En la Fig.7.a). Se observa la presencia de carbono de la resina y de la pintura añadida, en la Fig.7.b) se presenta el oxígeno proveniente de la pintura con la que se recubrió el galvanizado. Para el estudio del aluminio en el acero galvanizado se puede ver en la Fig.7.c). La presencia de dicho elemento está en la fase intermedia entre la pintura polimérica y la capa de Zn debido a que este elemento ayuda a la mejor adhesión de la superficie pues genera la formación de un compuesto ( $Fe_2Al_5$ ) que hace que retarde la reacción del Fe y el Zn que hace que la lámina sea frágil<sup>19,20</sup>. En la Fig.7.d). Se encuentra el elemento Ti, disperso uniformemente en

<sup>19</sup> ALMEYDA, David; MARIN, Yesid. Op. Cit.

<sup>20</sup> ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA, LATIZA. Op. Cit.

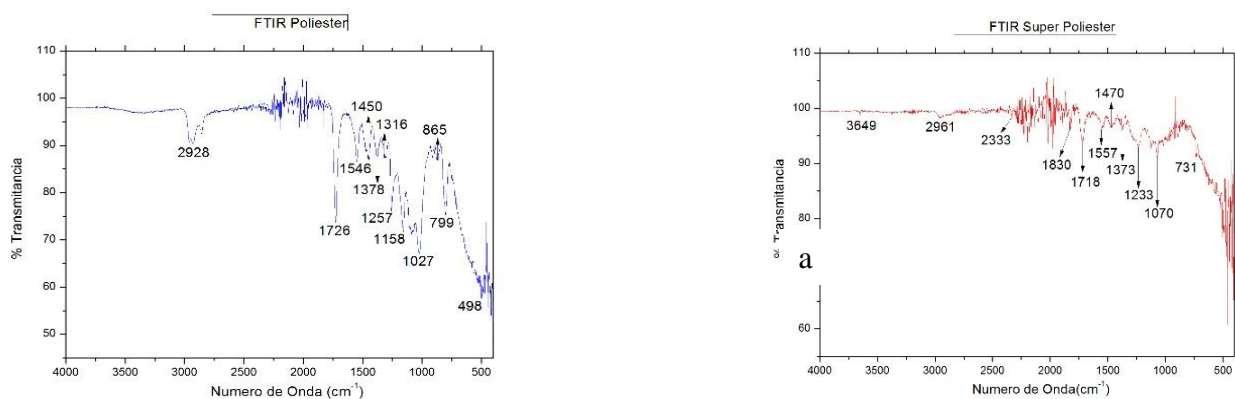
toda la capa de pintura polimérica, ya que este ayuda al efecto retardante de la corrosión en el acero galvanizado. En la Fig.7.e).f), se analiza la presencia de Fe presente en el acero base y el cinc que se obtiene en la capa del galvanizado.

## 4.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA DE TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).

Se realizó la caracterización de las dos láminas mediante la técnica de espectroscopia de infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR) con el fin de realizar un análisis más detallado del recubrimiento del acero galvanizado. Con ésta técnica se determinaron los compuestos que conforman cada pintura y con base en esto se realizó una correlación con su eficiencia ante la corrosión.

### 4.2.1 Espectroscopia FTIR para las láminas de Poliéster y SP:

Figura 8. Espectro FTIR del recubrimiento de la lámina, a) Poliéster, b) Súper Poliéster.



En la Tabla 4, se resumen los principales modos vibracionales de los grupos funcionales presentes en el Poliéster y el Súper poliéster. Para el súper poliéster,

la banda de baja intensidad en  $3649\text{ cm}^{-1}$ , supone una vibración de tensión del enlace oxígeno-hidrógeno del grupo hidroxilo en el polímero que indica la adhesión y reticulación en la pintura por su fuerte enlace<sup>21</sup>; las bandas en la región de  $1537$  a  $1373\text{ cm}^{-1}$  son características de vibraciones de flexión de carbono-hidrógeno, y las bandas en  $1233$  y  $1070\text{ cm}^{-1}$  indican bandas de tensión carbono-oxígeno. El conjunto de señales entre  $2500$ - $1800\text{ cm}^{-1}$  se consideran parte del ruido químico generado por el equipo de FTIR<sup>22,23,24</sup>. Para las bandas del producto poliéster, se pueden observar en la región de  $2928\text{ cm}^{-1}$ , bandas de intensidad media de la vibración de tensión de carbono-hidrógeno, y en  $1726\text{ cm}^{-1}$ , una banda intensa de vibración de tensión del enlace carbonilo carbono-oxígeno (C=O) relacionado con la adhesión del recubrimiento y el sustrato metálico<sup>25</sup>; la región entre  $1546$ - $1378\text{ cm}^{-1}$  se encuentran las vibraciones de flexión de carbono-hidrógeno, y las bandas de  $1257\text{ cm}^{-1}$  y  $1158\text{ cm}^{-1}$  corresponden a vibraciones de tensión de carbono-oxígeno-carbono, asimétrica y simétrica, respectivamente que supone la mayor concentración de pintura polimérica en esa zona característico de una resina de poliéster.<sup>26,27,28,29</sup>

---

<sup>21</sup> RAMESH, K., et al. Studies on electrochemical properties and FTIR analysis of epoxy polyester hybrid coating system. Malaysia. University of Malaya. Department of Physics, Faculty of Science. International Journal of Electrochemical Science, 8(6), 8422–8432. 2013.

<sup>22</sup> CONLEY, R. T. Espectroscopía infrarroja. (2da Edición). 1972.

<sup>23</sup> KUPTSOV, A. H.; ZHIZHIN, German Nikolaevich. Handbook of Fourier transform Raman and infrared spectra of polymers. Elsevier, 1998.

<sup>24</sup> MADDAMS, W. F., & BOWER, D. I. The vibrational spectroscopy of polymers. (23rd ed.). Cambridge University Press. 2006.

<sup>25</sup> RAMESH, K., et al. Studies on electrochemical properties and FTIR analysis of epoxy polyester hybrid coating system. Malaysia. University of Malaya. Department of Physics, Faculty of Science. International Journal of Electrochemical Science, 8(6), 8422–8432. 2013.

<sup>26</sup> CONLEY, R. T. Op. Cit.

<sup>27</sup> KUPTSOV, A. H.; ZHIZHIN, German Nikolaevich. Op. Cit.

<sup>28</sup> MADDAMS, W. F., & BOWER, D. I. Op. Cit.

<sup>29</sup> RAMESH, K., et al. Op. Cit.

Tabla 4. Bandas características del polímero a) Poliéster, b) Súper poliéster.

a) Poliéster				b) Súper Poliéster		
#	$\lambda$ (cm <sup>-1</sup> )	Enlace	Tipo de Vibración	$\lambda$ (cm <sup>-1</sup> )	Enlace	Tipo de Vibración
1	2928	C-H	Tensión	3649	O-H	Tensión
2	1726	C=O	Tensión	2961	C-H	Tensión
3	1546	C-H	Flexión	1718	C-H	Flexión
4	1450	C-H	Flexión (Asimétrica)	1557	C-H	Flexión
5	1378	C-H	Flexión (Simétrica)	1470	C-H	Flexión (Asimétrica)
6	1316	C-O	Tensión	1373	C-H	Flexión (Simétrica)
7	1257	C-O-C	Tensión (Asimétrica)	1233	C-O	Flexión
8	1158	C-O-C	Tensión (Simétrica)	1070	C-O	Tensión
9	1027	C-O	Tensión	731	C-H	Deformación de balanceo
10	799	C-C	Flexión	-	-	-

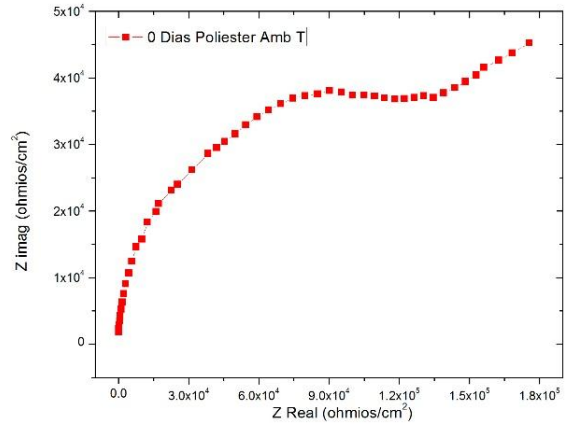
### 4.3 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS)

Una vez realizado el análisis SEM-EDS se procede a el análisis electroquímico, para esto se le aplico impedancia a las dos distintas láminas de acero galvanizado, y se tomó como referencia para la comparación mismo tiempo y misma solución.

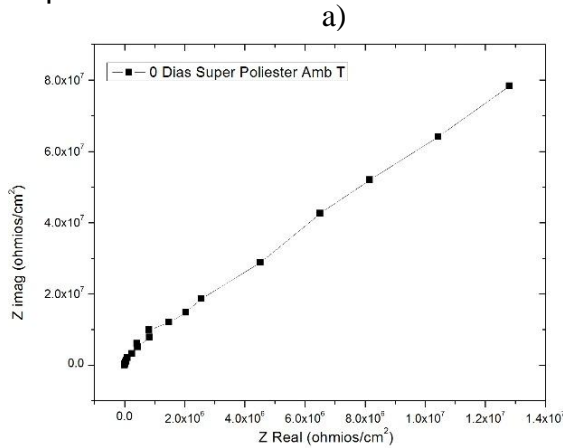
### 4.3.1 Diagramas:

#### 4.3.1.1. Solución que simula Ambiente Tropical:

Figura 9. Diagrama de Nyquist para un  $t = 0$  días (0-1 hora) en un ambiente



tropical.



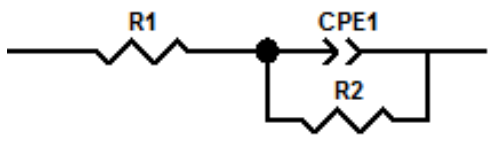
b)

En la Fig.9.a. Se puede observar para un tiempo de exposición de cero días en solución de ambiente tropical que la lámina de Poliéster presenta una baja impedancia frente a los valores obtenidos de la lámina de Súper Poliéster quien presenta mejor comportamiento frente a la corrosión. En la Fig.10.b. Se muestra el diagrama para la lámina de Súper Poliéster, corroborando lo antes mencionado donde es evidente que la curva generada presenta un comportamiento lineal lo que indica un comportamiento capacitivo ya que el ángulo de fase para la lámina

de súper poliéster varía entre 80 y 90 grados (anexos A). A continuación se presenta el circuito equivalente que mejor se ajusta a este diagrama, donde consta de una R1 que me indica la resistencia a la solución, seguido de un CPE (elemento de fase constante), que me indica que hay una pseudocapacitancia de la doble capa formada iones del electrolito acumulados en la superficie de la lámina<sup>30</sup>, Por ultimo tenemos una resistencia R2 o Rp (resistencia a la polarización) o resistencia que presenta el recubrimiento en paralelo al CPE. (Ver Fig. 10). La mayoría de los sistemas presentaron una similitud en cuanto al circuito equivalente que mejor se ajustaba, a diferencia del sistema de 15 y 30 días en lluvia acida (Ver Fig. 16.).

Confirmando los resultados del SEM, se podría decir que la presencia de Ti en la adhesión del galvanizado con el recubrimiento es óptimo en la lámina Súper Poliéster debido a su mayor cantidad.

Figura 10. Circuito equivalente ajustado para el sistema en Ambiente Tropical a un



tiempo de 0 días.

Tabla 5. Valores de los elementos del circuito equivalente. 0 Días Ambiente Tropical Poliéster y Súper Poliéster.

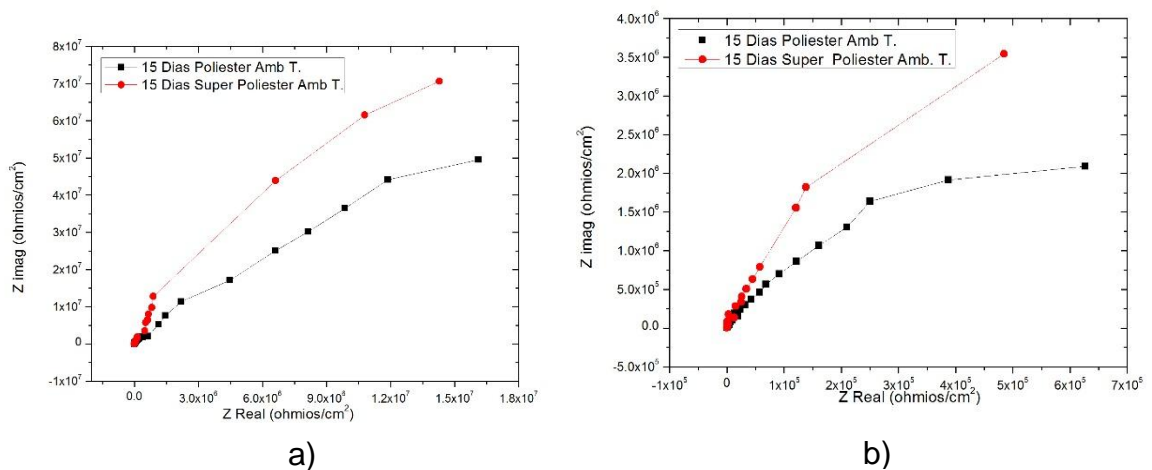
Componentes	Magnitud
-------------	----------

<sup>30</sup> MORALES, Ulises; LOPEZ, Enrique; OTALORA, Cesar. Aspectos Básicos en la interpretación de diagramas de impedancia electroquímica. [En línea]. Medellín Dyna. 2010. Recuperado en 15 agosto 2017. Disponible en <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:BASIC+ASPECTS+IN+THE+INTEPRETATION+OF+THE+DIAGRAMS+OF+ELECTOCHEMICAL+IMPEDANCE#0>

R1	216,6
CPE1-T	1,837E-9
CPE1-P	0,97026
R2	5,230E8

(Los demás circuitos equivalentes con sus respectivos valores tabulados se pueden encontrar en Anexos B).

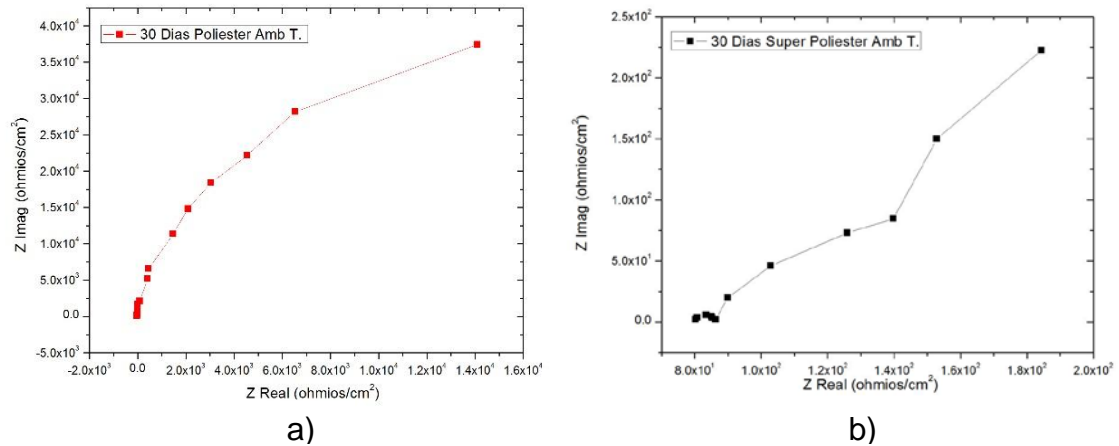
Figura 11. Diagrama de Nyquist para un t = 15 días (360 horas) en una solución de Ambiente Tropical.



En la Fig.11.a. Para un análisis de 15 días en la solución de ambiente tropical, se continua evidenciando un mayor valor de impedancia en la lámina de Súper Poliéster con respecto a la lámina de poliéster, lo que nos indica que presenta una mejor resistencia ante los ataques corrosivos formados por los iones  $\text{Cl}^-$  y iones  $\text{SO}_4^-$  adheridos en la superficie provenientes de dicha solución. Para un valor cercano a ( $10^6$  Ohm/cm<sup>2</sup>) se presenta una leve formación de arco capacitivo en ambas láminas. En la Fig.11.b. Aumentamos el diagrama a estos valores de impedancia para verificar dicha formación, afirmando que si hay este comportamiento en la curva, lo que sugiere que se generaron pequeños poros por

el ataque corrosivo y que estos fueron bloqueados por los productos de corrosión presentando una reducción en el movimiento iónico del revestimiento.

Figura 12. Diagrama de Nyquist para un  $t = 30$  días (720 horas) en una solución de Ambiente Tropical.



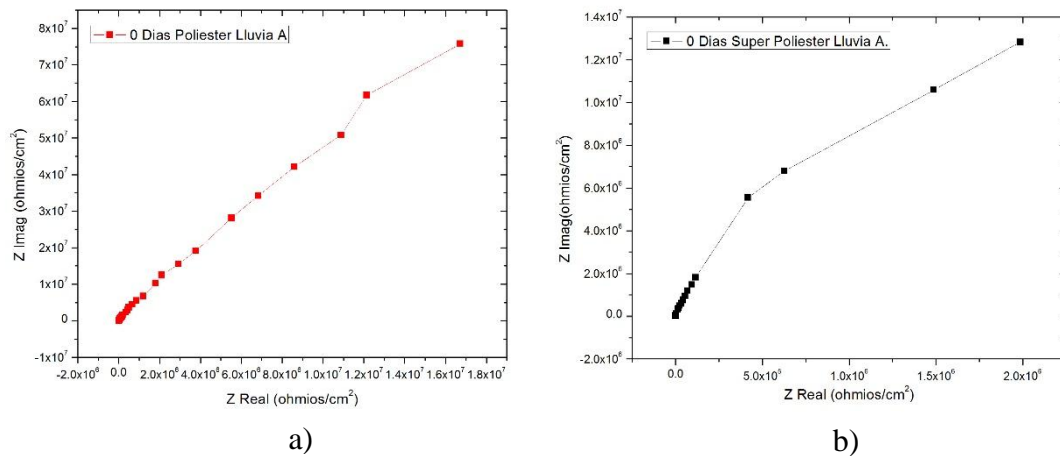
Al transcurrir el tiempo de exposición de 30 días de las láminas sumergidas en la solución de ambiente tropical, en la Fig.11.b. Se puede ver un descenso en el valor de impedancia de la lámina Súper Poliéster, lo que indica que al pasar el tiempo perdió la eficiencia del recubrimiento ante la corrosión, esto se debe posiblemente a la penetración de electrolito a través de los poros formados, en donde se encuentra la presencia de iones  $\text{SO}_4^-$  que hacen el papel de protector en la superficie, pero al poseer morfología porosa permite que el ion  $\text{Cl}^-$  penetre y ocurra un movimiento de las especies en la capa del recubrimiento<sup>31</sup>. En la

<sup>31</sup> RAMESH, K., et al. Studies on electrochemical properties and FTIR analysis of epoxy polyester hybrid coating system. Malaysia. University of Malaya. Department of Physics, Faculty of Science. International Journal of Electrochemical Science, 8(6), 8422–8432. 2013.

Fig.11.a. Para la lámina de Poliéster también se presenta una disminución de la resistencia a la corrosión, pero un mejor comportamiento anticorrosivo frente a la solución de ambiente tropical en la cual está inmerso, esto se corrobora con los valores obtenidos en R2 o resistencia del poro para ambas láminas, donde el valor de la resistencia del poliéster es mayor en comparación a la de Súper Poliéster (Ver en Anexos B).

#### 4.3.1.2. Solución que simula Lluvia Ácida:

Figura 13. Diagrama de Nyquist para un t = 0 días (0-1 hora) en una solución de Lluvia Ácida.

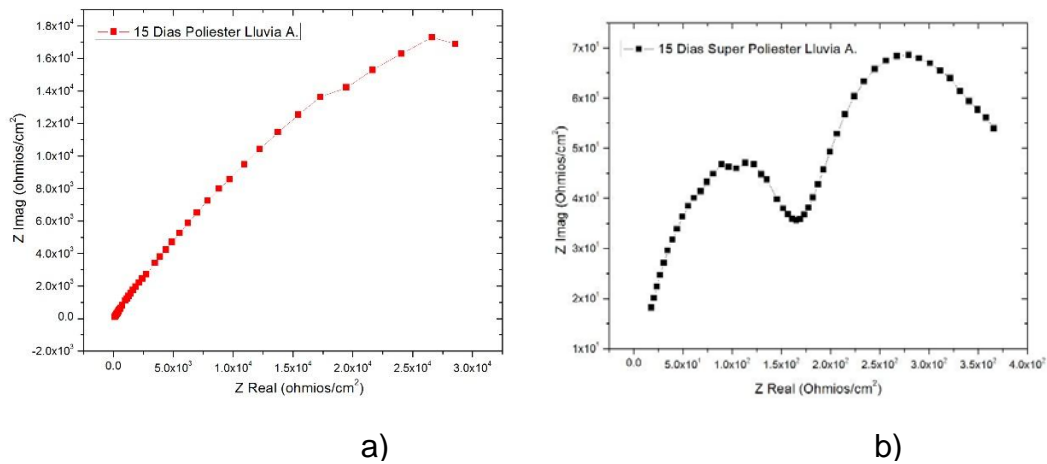


En la Fig.13.a. Se puede observar una tendencia lineal de la gráfica en la lámina de Poliéster característico de un comportamiento capacitivo, luego de que en los valores aproximados entre (0 y 1.5x10<sup>6</sup> Ohm/cm<sup>2</sup>) tiende a la formación de una curva o arco característico de un recubrimiento protector que no ha sido afectado por ningún agente externo<sup>32</sup>. A pesar de esto se sigue evidenciando que en este medio inicialmente quien posee mejor resistencia a ataques corrosivos en la lámina de Súper Poliéster. En la Fig.13.b. Se muestra que la lámina de Súper

<sup>32</sup> ALMEYDA, David; MARIN, Yesid. Evaluación de la Resistencia a la corrosión de un acero galvanizado y pintado con polyester en soluciones que simulan ambiente tropical y lluvia ácida. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. 2017.

Poliéster solo presenta una leve curvatura pero esta no me indica la formación de ningún arco capacitivo, esto se verifica con el valor de su ángulo de fase el cual mantiene poca variación entre (80-90°). Contrario a la disminución que presenta el ángulo de la lámina de Poliéster al iniciar el barrido del rango de frecuencias implementado lo cual indica menor resistencia de la misma. (Ver Anexos A).

Figura 14. Diagrama de Nyquist para un t = 15 días (360 horas) en una solución de Lluvia Ácida.

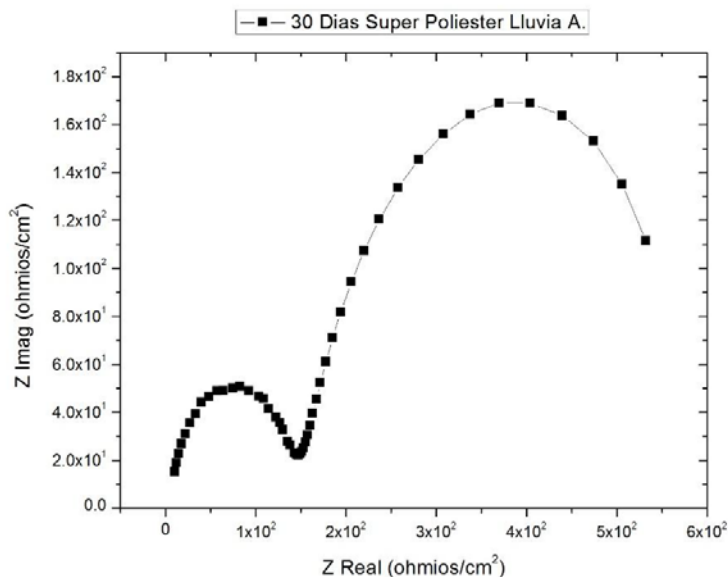


En la Fig.14.b. Se observa de manera notoria, como la lámina de Súper Poliéster, presento una disminución de su resistencia; esto se puede corroborar en el diagrama con la presencia de una curva capacitiva con una ligera formación de dos domos o semicírculos a bajos valores de impedancia lo que nos indica que la solución a dicho tiempo ya ha empezado a penetrar la primera capa de galvanizado por los iones de cloruro presentes en el electrolito el cual ha iniciado la formación de micro poros. Donde en el primer arco se haría referencia a la acumulación de iones y difusión de estos a través de la capa del recubrimiento, para luego atacar la capa de galvanizado. En la Fig.14.a. La resistencia en la lámina de Poliéster, presenta una continuidad en el aumento de los valores de impedancia hasta ( $2.7 \times 10^4$  Ohm/cm<sup>2</sup>). Después de este valor la resistencia comienza un descenso prediciendo la penetración a las capas protectoras de la lámina.

Se presenta la gráfica de ángulo de fase (Ver Anexo A) donde se observa que la lámina de Poliéster aumenta su ángulo durante todo el barrido del rango de frecuencia entre (40-50°) esto se debe a una mejor adhesión entre el sustrato metálico y la capa de galvanizado por elementos presentes como el titanio.<sup>33</sup>

Contrario a esto la lámina de Súper Poliéster esta en descenso ya que inicialmente los productos de corrosión bloquearon la superficie de los poros hasta cierto momento, donde después se inició la formación de nuevos productos corrosivos provocando que los iones del electrolito combinados con los de la red polimérica formaran nuevos poros por donde continuara la penetración del mismo.<sup>34</sup>

Figura 15. Diagrama de Nyquist para un t = 30 días (720 horas) en una solución de Lluvia Ácida.



<sup>33</sup> RAMESH, K., et al. Op. Cit.

<sup>34</sup> Ibíd.

Para un análisis de 30 días se obtuvo que la lámina de Súper Poliéster fue la única que permitió que se le aplicara impedancia electroquímica debido a la formación de la capa protectora por parte de los productos corrosivos hicieran que la corrosión no avanzara hasta dañar el recubrimiento; en cambio la lámina de Poliéster al cabo de un tiempo aproximado de 25 días presento daño en sus superficie posiblemente al aumento de la velocidad de ataque por parte de los iones impidiendo realizar el ensayo de EIS ara su respectivo análisis.

En la Fig.15. Se puede observar que se presenta dos domos o semicírculos bien formados, uno a bajas frecuencias que me indica un proceso de difusión iónica entre la capa superficial a través de los productos de corrosión formados<sup>35</sup>. Es decir ocurrió un intercambio iónico entre los iones del electrolito y los de la red polimérica provocando porosidad por donde hubo penetración<sup>36</sup>. Y otro semicírculo capacitivo a altas frecuencias que indica que está ocurriendo un proceso de transferencia de carga a través de la interfase recubrimiento-sustrato metálico<sup>37,38,39</sup>. Aquí los iones sulfato más el azufre proveniente del ácido sulfúrico comienzan la formación de iones FeS el cual genero degradación del sustrato metálico. En la Fig.18. (Ver más adelante); se presenta la morfología superficial que toma la lámina al cabo de este tiempo, en donde se puede corroborar la presencia de ataque corrosivo en el recubrimiento provocando fisuras en ciertas regiones por donde el electrolito penetra y continua avanzando hacia el sustrato metálico, soplando dicho recubrimiento y formando

---

<sup>35</sup> CONLEY, R. T. Espectroscopía infrarroja. (2da Edición). 1972.

<sup>36</sup> RAMESH, K., et al. Studies on electrochemical properties and FTIR analysis of epoxy polyester hybrid coating system. Malaysia. University of Malaya. Department of Physics, Faculty of Science. International Journal of Electrochemical Science, 8(6), 8422–8432. 2013.

<sup>37</sup> CONLEY, R. T. Op. Cit.

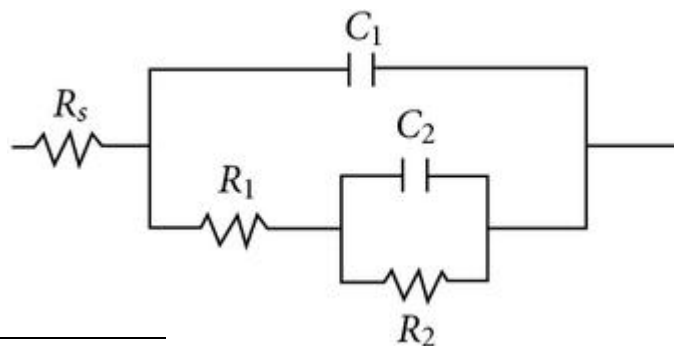
<sup>38</sup> CHENG, Y. L., et al .A study of the corrosion of aluminum alloy 2024-T3 under thin electrolyte layers. [En línea]. Hangzhou, China. Zhejiang University. Department of Chemistry. 2004. Corrosion Science, vol. 46, no. 7, pp. 1649–1667. (Recuperado en 5 Septiembre 2017). Disponible en <http://download.xuebalib.com/xuebalib.com.26847.pdf>.

<sup>39</sup> SHUAN, L, et al. The degradation of tetracycline in a photo-electro-Fenton system. [En línea]. China. China Three Gorges University. 2013. Chemical Engineering Journal, 231, 441–448. (Recuperado en 6 Septiembre 2017). Disponible en <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2013.07.057>

ampollamiento<sup>40</sup>, causado posiblemente por la concentración de ion cloruro y sulfuro debajo de la capas de Hidróxido de Cinc y Sulfato de Cinc. En pocas palabras el primer semicírculo explica las características de barrera del recubrimiento intacto y el segundo representa el proceso de corrosión que ocurre en la interfaz sustrato metálico- revestimiento en las partes dañadas de la pintura<sup>41</sup>.

El sistema de 30 días en lluvia acida, fue uno de los que presento un cambio en el circuito equivalente ajustado a él, debido a la morfología que se presenta en la gráfica de Nyquist (Ver en Anexos A), pues al presentar dos semicírculos nos indica que habrá dos elementos de fase constante. Por ende  $R_1$  nos indica la resistencia a la solución,  $C_1$  me indica la capacitancia formada en la interfase electrolito-superficie, paralelo a él se encuentra la  $R_2$  que es la resistencia del recubrimiento; seguido sigue otro circuito en serie que me representa la otra fase o semicírculo formado en el diagrama, en donde se forma otro elemento de fase constante  $C_2$  y una segunda resistencia  $R_3$  que me indica la resistencia el sustrato metálico. (Ver Fig. 16).

Figura 16. Circuito equivalente ajustado para el sistema en Lluvia ácida a un tiempo de 30 días.



<sup>40</sup> CONLEY, R. T. Op. Cit.

<sup>41</sup> GONZÁLEZ-GARCÍA, Y., GONZÁLEZ, S., SOUTO, R. M. Electrochemical and structural properties of a polyurethane coating on steel substrates for corrosion protection. [En línea] Tenerife, España. Universidad de la Laguna. Departamento de Física, Química. 2007. Corrosion Science, 49(9), 3514–3526. (Recuperado en 22 Septiembre 2017). Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.018>

Figura 17. Imágenes de la morfología superficial del recubrimiento para la lámina de (Súper Poliéster) a un tiempo de 30 días en un ambiente que simula lluvia ácida.



Debido que al cabo de 30 días se presentó corrosión acelerada en la lámina de Poliéster, no fue posible el análisis por espectroscopia de impedancia. En la Fig.19, se presenta la morfología del recubrimiento en donde es notorio el daño causado en la capa de pintura en la que hay presencia de una grieta o fisura de gran tamaño por el que el electrolito atravesó hasta llegar al sustrato metálico. Esto es provocado por la presencia de iones cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) en los que por su diferencia de tamaño molecular (baja), penetra en la capa formada por los iones sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ) e Hidróxido de cinc ( $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ), formando un nuevo compuesto (cloruro de cinc ( $\text{ZnCl}_4^{2-}$ )) el cual se acumula en las interfaces de éstas, hasta que termina por romperlas y en presencia de agua se forman cráteres en donde hay una concentración de productos de corrosión lo que genera una corrosión localizada.

Figura 18. Imágenes de la morfología superficial del recubrimiento para la lámina de Poliéster a un tiempo de 30 días en un ambiente que simula lluvia ácida.



## 5. CONCLUSIONES

En cuanto a comparación de los análisis por SEM de cada lámina se puede determinar que ambos poseen similares estructuras pero en cuanto a porcentajes de peso posee mayor cantidad de cada elemento la lámina de Súper Poliéster. Así por ejemplo, comparando al Zn y el Ti en cada lámina, la de Súper Poliéster posee 32,88%W y 12,26%W respectivamente, y la de Poliéster contiene 17,73%W y 1,70%W. En cuanto a este análisis se puede deducir que quien presenta mayor propiedades anticorrosivas al ataque de las dos soluciones es la lámina de Súper Poliéster.

Mediante espectroscopia de impedancia electroquímica se pudo determinar un comportamiento similar del Poliéster y Súper Poliéster en una solución de ambiente tropical, pero quien presenta mejor eficiencia es el Poliéster esto se evidencia en los valores de mayor resistencia obtenidos. En cuanto al comportamiento en la solución de lluvia ácida se pudo concluir que la lámina de Súper Poliéster presento mejor resistencia al ataque corrosivo además fue la única que en este ambiente resistió la inmersión.

En medios expuestos de ambiente tropical y lluvia ácida hay formación de iones  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  los cuales generan un tipo de corrosión localizada (pitting), no solo en el sustrato metálico sino además en las diferentes capas o recubrimientos adheridos a este para reducir la velocidad del ataque corrosivo debido a la reacción ocurrida entre los iones del electrolito y los elementos compuestos del recubrimiento.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la empresa, realizar las pruebas con el método de cámara de niebla para corroborar los datos obtenidos en la investigación.
- Se recomienda hacer un mantenimiento frecuente al potencióstato Gamry 750 del laboratorio del grupo de investigación en corrosión GIC, con el fin de obtener mayor precisión en los resultados.

## BIBLIOGRAFÍA

ALMEYDA, David; MARIN, Yesid. Evaluación de la Resistencia a la corrosión de un acero galvanizado y pintado con polyester en soluciones que simulan ambiente tropical y lluvia ácida. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. 2017.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION, Galvanización en Caliente para la protección contra la corrosión de los productos de acero. [En línea]. 1996. Recuperado en 20 junio 2017. Disponible en <https://www.galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing>.

ARENAS, M. A.; DE DAMBORENEA, J. J. Electrochemical corrosion and inhibition mechanisms of galvanized steel. [Base de datos en línea] 8 junio 2005. Revista de Metalurgia (Madrid), 42(3), 165-174. Recuperado en 10 julio 2017. Disponible en <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2006.v42.i3.16>

ARIAS MALDONADO, Chehin. Estudio del comportamiento de un ambiente corrosivo con cloruros y sulfatos sobre una lámina de acero galvanizado. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica Ciencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2011.

ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA, LATIZA. El Rol del Aluminio en el Galvanizado Continuo Por Inmersión en Caliente. GalvInfoNote 2.4, 0, 1-5. 2007

CARRASCAL, Alexander; MARTINEZ Luis. Estudio electroquímico de un acero galvanizado pintado expuesto a diferentes medios de cloruros y sulfatos. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. 2015.

CHENG, Y. L., *et al* .A study of the corrosion of aluminum alloy 2024-T3 under thin electrolyte layers. [En línea]. Hangzhou, China. Zhejiang University. Department of Chemistry. 2004. *Corrosion Science*, vol. 46, no. 7, pp. 1649–1667. (Recuperado en 5 Septiembre 2017). Disponible en <http://download.xuebalib.com/xuebalib.com.26847.pdf>.

CONLEY, R. T. Espectroscopía infrarroja. (2da Edición). 1972.

DIAZ RODRIGUEZ, Francisco. Estudio de la corrosión atmosférica del cinc y el acero galvanizado. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ing. Fisicoquímicas. 2001.

EMPRESA ACESCO. CIA.SA. Manual Técnico del Acero Galvanizado, Empresa Acesco. Barranquilla. ACESCO.0-53 pp. 2013.

GONZÁLEZ-GARCÍA, Y., GONZÁLEZ, S., SOUTO, R. M. Electrochemical and structural properties of a polyurethane coating on steel substrates for corrosion protection. [En línea] Tenerife, España. Universidad de la Laguna. Departamento de Física, Química. 2007. *Corrosion Science*, 49(9), 3514–3526. (Recuperado en 22 Septiembre 2017). Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.018>

KUPTSOV, A. H.; ZHIZHIN, German Nikolaevich. *Handbook of Fourier transform Raman and infrared spectra of polymers*. Elsevier, 1998.

MADDAMS, W. F., & BOWER, D. I. The vibrational spectroscopy of polymers. (23rd ed.). Cambridge University Press. 2006.

MORALES, Ulises; LOPEZ, Enrique; OTALORA, Cesar. Aspectos Básicos en la interpretación de diagramas de impedancia electroquímica. [En línea]. Medellín Dyna. 2010. Recuperado en 15 Agosto 2017. Disponible en <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:BASIC+ASPECT+S+IN+THE+INTERPRETATION+OF+THE+DIAGRAMS+OF+ELECTOCHEMICAL+IMPEDANCE#0>

POLO, José Luis, *et al.* Estudio de la impedancia de la corrosión del acero inoxidable AISI 316L en las regiones pasivas y de picadura. En Gestión: Revista Metalúrgica Madrid, 1999.

RAMESH, K., *et al.* Studies on electrochemical properties and FTIR analysis of epoxy polyester hybrid coating system. Malaysia. University of Malaya. Department of Physics, Faculty of Science. International Journal of Electrochemical Science, 8(6), 8422–8432. 2013.

RAMIREZ JEREZ, Julieth; VALERO ALVARADO, Mario. Influencia del tamaño del cristal de cinc en el comportamiento electroquímico de láminas de acero galvanizadas, expuestas a diferentes concentraciones de cloruros y sulfatos. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. 2014.

SALAS, Orlando, *et al.* Desempeño de recubrimiento base Zn en un ambiente tropical de elevada agresividad. [En línea]. Maracaibo, Universidad del Zulia. 2008. Recuperado en 29 junio 2017. Disponible en [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702008000400008](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702008000400008).

SANDOVAL AMADOR, Anderson. Effect of zinc thickness on corrosion film breakdown of Colombian galvanized Steel. Bucaramanga. Grupo de Investigacion en Corrosion. Universidad Industrial de Santander. 2012.

SHUAN, L, *et al.* The degradation of tetracycline in a photo-electro-Fenton system. [En línea]. China. China Three Gorges University. 2013. Chemical Engineering Journal, 231, 441–448. (Recuperado en 6 Septiembre 2017). Disponible en <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2013.07.057>

SIERRA FAJARDO, Deisy; QUINTERO ASCANIO, Leidy. Estudio del comportamiento de la corrosión de un acero galvanizado que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas. Bucaramanga. Trabajo de grado: Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. 2012

# **ANEXOS**

## ANEXO A. GRÁFICAS DE LOS DIAGRAMAS DE BODE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA

A continuación se presenta adjunto las gráficas de los diagramas de Bode resultados de la prueba de Espectroscopia de Impedancia con el fin de observar la relación de impedancias de las láminas en diferentes medios y a distintos tiempos.

Diagrama de Bode para un  $t = 0$  días en una solución de Ambiente Tropical.

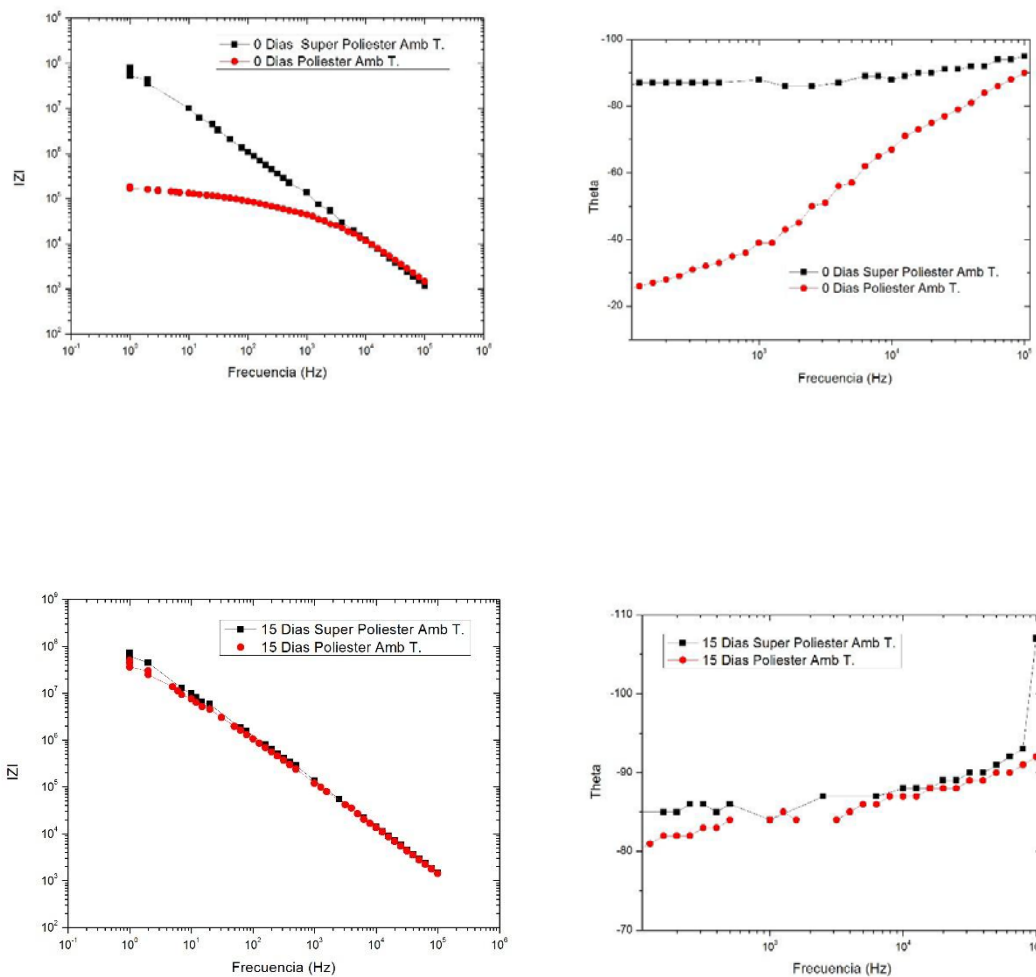


Diagrama de Bode para un  $t = 15$  días en una solución de Ambiente Tropical.

Diagrama de Bode para un  $t = 30$  días en una solución de Ambiente Tropical.

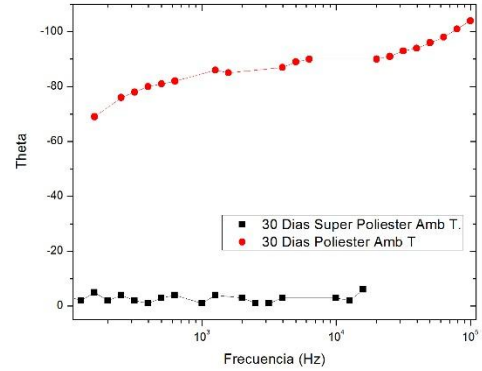
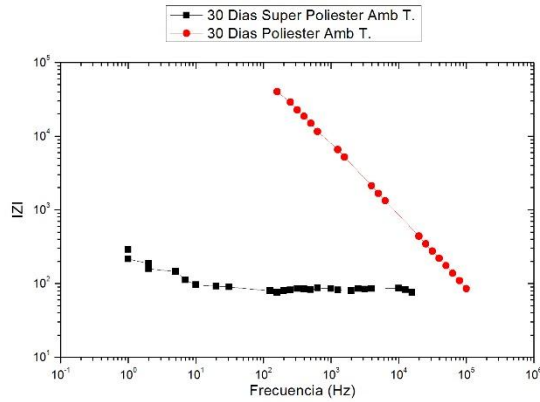


Diagrama de Bode para un  $t = 0$  días en una solución de Lluvia Ácida.

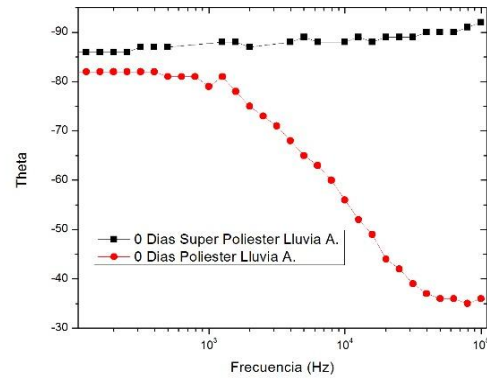
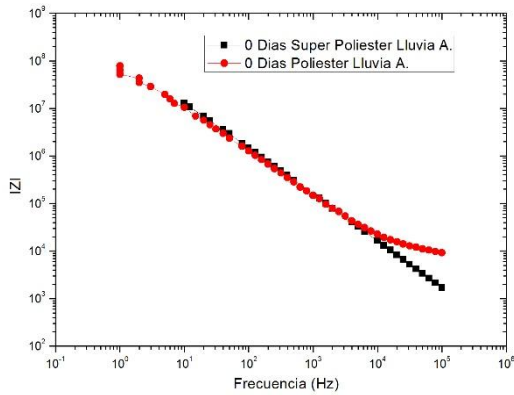


Diagrama de Bode para un  $t = 15$  días en una solución de Lluvia Ácida.

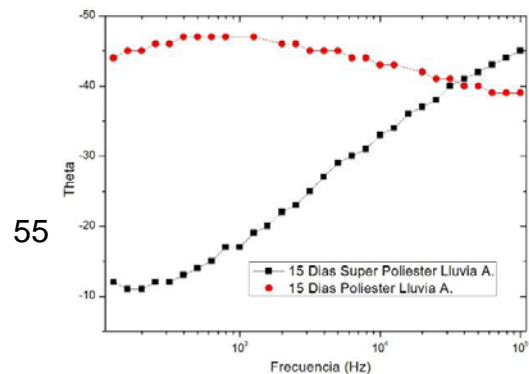
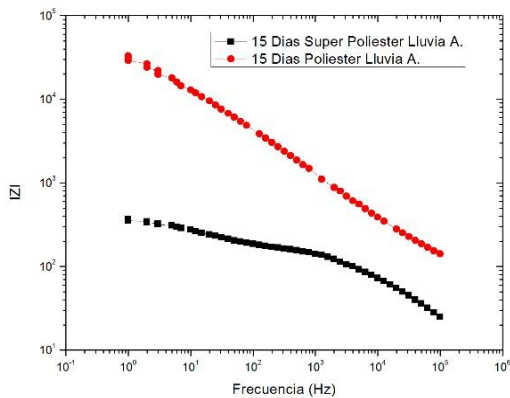
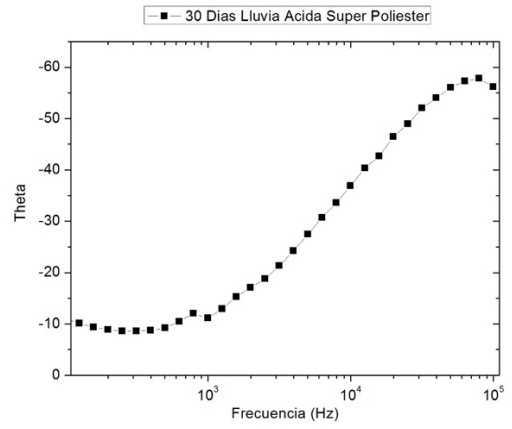
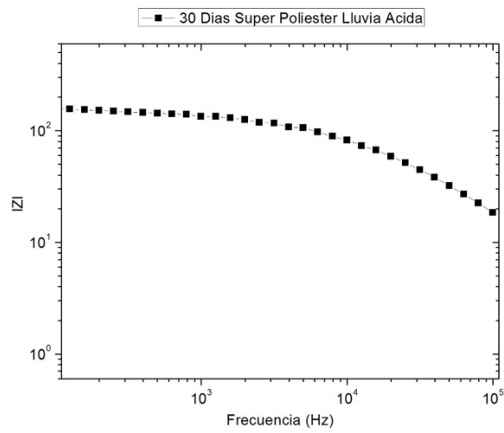


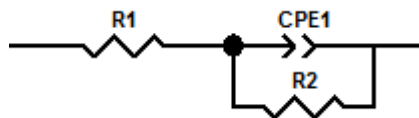
Diagrama de Bode para un  $t = 30$  días en una solución de Lluvia Ácida.



**ANEXO B. DIAGRAMAS DE CIRCUITO EQUIVALENTES PARA LOS DEMÁS  
SISTEMAS ADJUNTOS LOS VALORES EXACTOS DE CADA UNO  
TABULADOS**

A continuación se presentan los demás diagramas de circuito equivalentes para los demás sistemas, junto con él están adjuntos los valores exactos de cada uno tabulados.

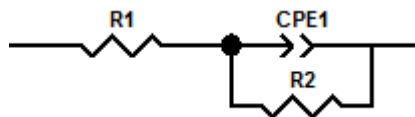
Circuito equivalente ajustado para el sistema en Ambiente Tropical a un tiempo de 15 días SP.



Valores de los elementos del circuito equivalente. 15 Días Ambiente Tropical SP.

<b>Componentes</b>	<b>Magnitud</b>
R1	404,6
CPE1-T	1,905E-9
CPE1-R	0,95273
R2	4,756E8

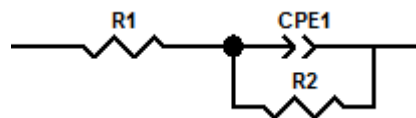
Circuito equivalente ajustado para el sistema en Ambiente Tropical a un tiempo de 30 días SP.



Valores de los elementos del circuito equivalente. 30 Días Ambiente Tropical PPG.

Componentes	Magnitud
R1	82,09
CPE1-T	0,0011774
CPE1-R	0,71748
R2	12744

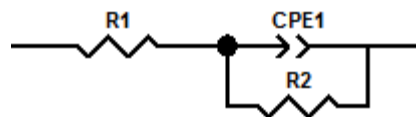
Circuito equivalente ajustado para el sistema en Ambiente Tropical a un tiempo de 15 días Poliéster.



Valores de los elementos del circuito equivalente. 15 Días Ambiente Tropical Poliéster.

Componentes	Magnitud
R1	350
CPE1-T	2,747E-9
CPE1-R	0,92276
R2	1,983E8

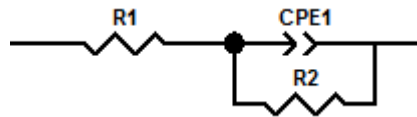
Circuito equivalente ajustado para el sistema en Ambiente Tropical a un tiempo de 30 días Poliéster.



Valores de los elementos del circuito equivalente. 30 Días Ambiente Tropical Poliéster.

Componentes	Magnitud
R1	25,91
CPE1-T	2,6026E-8
CPE1-R	0,97233
R2	139840

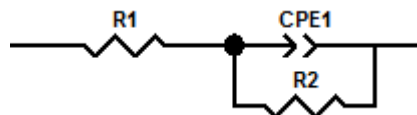
Circuito equivalente ajustado para el sistema en Lluvia Ácida a un tiempo de 0 días SP.



Valores de los elementos del circuito equivalente. 0 Días Lluvia Ácida SP.

Componentes	Magnitud
R1	141,5
CPE1-T	1,269E-9
CPE1-R	0,97611
R2	1,088E8

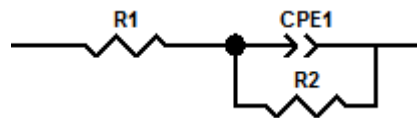
Circuito equivalente ajustado para el sistema en Lluvia Ácida a un tiempo de 15 días SP.



Valores de los elementos del circuito equivalente. 15 Días Lluvia Ácida SP.

Componentes	Magnitud
R1	55,54
CPE1-T	0,00049168
CPE1-R	0,23472
R2	575,7

Circuito equivalente ajustado para el sistema en Lluvia Ácida a un tiempo de 0

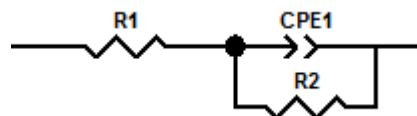


días Poliéster.

Valores de los elementos del circuito equivalente. 0 Días Lluvia Ácida Poliéster.

Componentes	Magnitud
R1	281,23
CPE1-T	2,402E-9
CPE1-R	0,90149
R2	1,062E9

Circuito equivalente ajustado para el sistema en Lluvia Ácida a un tiempo de 15 días Poliéster.



Valores de los elementos del circuito equivalente. 15 Días Lluvia Ácida Poliéster.

<b>Componentes</b>	<b>Magnitud</b>
R1	33,83
CPE1-T	7,4716E-6
CPE1-R	0,5314
R2	85619