

Determinación de la velocidad de corrosión de un acero al carbono con diferentes tipos de galvanizados y de capas de pinturas mediante técnicas electroquímicas

Elio Fabián Barbosa Quiñonez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico

Director:

Darío Yesid Peña Ballesteros

Doctor en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de materiales

Bucaramanga

2020

### **Dedicatoria**

Primeramente, a Dios por acompañarme en cada uno de mis pasos, por llenarme de salud y sabiduría para afrontar cada uno de los obstáculos y poder cumplir una meta más en mi vida.  
A mi madre Niquelina Quiñonez por todo el amor brindado, el apoyo y el sacrificio realizado lo cual hoy me permite ser la persona que soy.

A mi padre Elio R. Barbosa por estar siempre presente en mi vida y darme su cariño y comprensión.

A mis hermanos Elkin, Deiby y Keyla por siempre haber creído en mí y darme su apoyo y cariño cuando lo necesite.

A mi cuñada Yeni R. y mis sobrinos Yarith, Yissel, Yurley y Yostin (Y<sup>4</sup>) por llenar mi vida de alegrías en tiempo de dificultades.

A mi familia en general quienes con su apoyo y cariño han sido parte fundamental en mi vida.

A mis amigos y compañeros de carrera que hicieron de mi paso por la universidad una experiencia inolvidable, en especial a Danny Niño, Vivian Arrieta, Santiago Peña, Eduard Hernández, Kelly Barbosa, Julián Grimaldos, Carlos Acevedo y Cesar Castro.

***Elio Fabián Barbosa Quiñonez***

### **Agradecimientos**

A la universidad Industrial de Santander (UIS), por brindarme la oportunidad de crecer tanto profesional como personalmente.

A mi director Darío Yesid Peña Ballesteros, quien confió en mí, que con su gran sabiduría me oriento y siempre estuvo disponible antes las dudas a lo largo de este proyecto.

Al grupo de investigación en corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander por apoyarme y brindarme las herramientas necesarias para poder realizar este proyecto de investigación.

A todos los profesores que hicieron parte de mi etapa académica en especial a los de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por haber puesto todo su conocimiento y dedicación a mi servicio.

A los técnicos de los laboratorios de la Escuela de Ingeniería y Ciencia de Materiales Ambrosio, Domingo, Sergio, Oscar, Mario y Javier que siempre tuvieron una excelente disposición para colaborar con lo que fue necesario.

Al personal administrativo de la Escuela de Ingeniería y Ciencia de Materiales en especial a Patricia Rodríguez que siempre me brindo su colaboración y asesoría ante cualquier requerimiento.

A mi amigo y compañero Héctor Andrés Rueda por toda la colaboración prestada, para la satisfactoria culminación de este proyecto.

**Tabla de Contenido**

	Pág.
Introducción.....	13
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo general.....	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
2. Marco referencial .....	16
2.1 Acero galvanizado.....	16
2.2 Mecanismos de corrosión en el acero galvanizado .....	16
2.2.1 Mecanismo anódico.....	17
2.2.2 Mecanismo catódico .....	18
2.3 Factores que influyen en la acción de los cloruros .....	18
2.3.1 Efecto del espesor de la capa de cinc .....	18
2.3.2 Efecto de la concentración de cloruro .....	18
2.3.3 Efecto de la concentración de productos de corrosión .....	19
2.4 Recubrimientos poliméricos .....	19
2.5 Pruebas electroquímicas .....	19
2.5.1 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) .....	19
2.5.2 Resistencia a la polarización (RP).....	20
2.5.3 Extrapolación de Tafel.....	20

3. Descripción experimental .....	21
3.1 Diseño experimental.....	21
3.2 Preparación de las muestras a analizar .....	22
3.3 Montaje de la celda electroquímica.....	23
3.4 Desarrollo de pruebas .....	24
3.4.1 Pruebas electroquímicas .....	24
4. Resultados y discusiones .....	25
4.1 Velocidad de corrosión.....	25
4.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) .....	26
4.2.1 Análisis de los resultados obtenidos en la técnica EIS para un periodo de inmersión de las muestras de 0 días .....	26
4.2.2 Análisis de los resultados obtenidos en la técnica EIS para un periodo de inmersión de las muestras de 15 días .....	29
4.2.3 Análisis de los resultados obtenidos en la técnica EIS para un periodo de inmersión de las muestras de 30 días .....	30
4.3 Resistencia a la polarización (Rp).....	32
4.4 Curvas de Polarización potenciodinamica.....	33
5. Conclusiones .....	36
6. Recomendaciones.....	37
Referencias bibliográficas .....	38
Apéndices .....	42

**Lista de Tablas**

	Pág.
Tabla 1. <i>Tiempos de exposición de las láminas de acero galvanizado con y sin recubrimiento polimérico en ambiente salino simulado.</i> .....	22
Tabla 2. <i>Condiciones de trabajo para las pruebas electroquímicas.</i> .....	25
Tabla 3. <i>Parámetros de circuito equivalente para las muestras a un <math>t= 0</math> días (0 h).</i> .....	28
Tabla 4. <i>Parámetros de circuito equivalente para las muestras a un <math>t= 15</math> días (360 h).</i> .....	30
Tabla 5. <i>Parámetros de circuito equivalente para las muestras a un <math>t= 30</math> días (720 h).</i> .....	32
Tabla 6. <i>Resistencia a la polarización (<math>R_p</math>) en función del tiempo para las muestras de acero galvanizado, y recubrimientos de color gris y blanco, en una solución de NaCl al 3% en peso.</i> ..	33
Tabla 7. <i>Datos obtenidos de la técnica Polarización Potenciodinamica para las muestras de acero galvanizado, y recubrimientos de color gris y blanco, en una solución de NaCl al 3% en peso.</i> .....	36

### Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>a) Esquema de las dimensiones de las muestras empleadas. b) Electrodo de trabajo acero galvanizado. c) Electrodo de trabajo Ral 9002 (Blanca). d) Electrodo de trabajo Ral 9006 (Gris).</i> .....	22
Figura 2. <i>Montaje experimental de la celda electroquímica sobre las muestras de acero galvanizado con o sin recubrimientos poliméricos.</i> .....	23
Figura 3. <i>Montaje de la jaula Faraday y equipo de análisis electroquímico GAMRY 600.</i> .....	24
Figura 4. <i>Circuito equivalente para el acero galvanizado con y sin recubrimiento polimérico.</i> ...26	
Figura 5. <i>Espectroscopia de impedancia electroquímica para un t=0 días (0 h) en una solución de NaCl al 3% en peso. (a) Nyquist galvanizado en acero, (b) Nyquist pintura gris, (c) Nyquist pintura blanca, (d) diagrama de bode <math>R_{total}</math> vs frecuencia y (e) diagrama de bode ángulo de fase vs frecuencia.</i> .....	28
Figura 6. <i>Espectroscopia de impedancia electroquímica para un t=15 días (360 h) en una solución de NaCl al 3% en peso. (a) Nyquist galvanizado en acero, (b) Nyquist pintura gris, (c) Nyquist pintura blanca, (d) diagrama de bode <math>R_{total}</math> vs frecuencia y (e) diagrama de bode ángulo de fase vs frecuencia.</i> .....	30
Figura 7. <i>Espectroscopia de impedancia electroquímica para un t=30 días (720 h) en una solución de NaCl al 3% en peso. (a) Nyquist galvanizado en acero, (b) Nyquist pintura gris, (c)</i>	

<i>Nyquist pintura blanca, (d) diagrama de bode <math>R_{total}</math> vs frecuencia y (e) diagrama de bode ángulo de fase vs frecuencia. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8. Curvas de resistencia a la Polarización (<math>R_p</math>); a) Lámina galvanizada, b) Lamina con recubrimiento Gris, (c) Lamina con recubrimiento Blanco. ....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9. Resultados de la curva potenciodinamica; (a) lámina galvanizada, (b) lamina con recubrimiento Gris, c) lamina con recubrimiento Blanco. ....</i>	<i>35</i>

**Lista de Apéndices**

	Pág.
Apéndice A. Técnica de Resistencia a la Polarización. ....	42
Apéndice B. Método de Extrapolación de Tafel.....	43
Apéndice C. Espesores de las láminas de acero galvanizado con y sin recubrimiento polimérico. .....	43

**Glosario**

Cdl	Capacitancia de la doble capa
Crec	Capacitancia del recubrimiento
Ecorr	Potencial de corrosión
EIS	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica
EW	Peso equivalente
icorr	Densidad de corriente
OCP	Potencial de circuito abierto
Rct	Resistencia a la transferencia
Rp	Resistencia a la polarización
Rs	Resistencia a la solución
R <sub>T</sub>	Resistencia total
Vcorr	Velocidad de corrosión
$\beta_a$	Pendiente anódica Tafel
$\beta_c$	Pendiente catódica Tafel

## Resumen

**Título:** Determinación de la velocidad de corrosión de un acero al carbono con diferentes tipos de galvanizados y de capas de pinturas mediante técnicas electroquímicas\*

**Autor:** Barbosa Quiñonez Elio Fabián\*\*

**Palabras Clave:** Aceros galvanizados, revestimientos poliméricos, corrosión atmosférica, técnicas electroquímicas.

**Descripción:** En la industria Colombiana al igual que en otras partes del mundo a lo largo de los últimos años se han venido realizando diferentes investigaciones con el fin mejorar las propiedades de los aceros galvanizados debido a que estos se encuentran expuestos a diferentes ambientes altamente corrosivos, una muy buena alternativa para mejorar la resistencia a la corrosión es la aplicación de pinturas poliméricas sin embargo aún se continúan desarrollando materiales que permitan incrementar la vida útil de estos y que a la vez sean menos contaminantes al mercado. Por tal motivo, en este trabajo de investigación se realizó el estudio del comportamiento frente a la corrosión atmosférica de láminas de acero galvanizado y de láminas con diferentes colores de recubrimientos, comúnmente utilizados en cubiertas expuestas a intemperies las cuales fueron suministradas por una empresa colombiana.

El análisis se realizó para tres (3) tiempos de inmersión diferentes correspondientes a 0, 15 y 30 días, en contacto con el ambiente salino simulado, el deterioro del galvanizado fue evaluado mediante técnicas electroquímicas como: Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), Resistencia a la polarización (RP) y curvas potenciodinámicas. Determinando resultados moderadamente mejores para el recubrimiento de pigmentación color blanco respecto del gris, y superiores respecto al solamente galvanizado, haciendo que este por su composición presente mayor resistencia a la corrosión atmosférica.

---

\* Trabajo de Grado (Modalidad: proyecto de investigación)

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros, Doctor en Corrosión.

### Abstract

**Title:** Determination of the corrosion rate of a carbon steel with different types of galvanized and paint layers using electrochemical techniques \*

**Author:** Barbosa Quiñonez Elio Fabian\*\*

**Key Words:** Galvanized Steels, Polymeric Coatings, Atmospheric Corrosion, Electrochemical Techniques.

**Description:** In the Colombian industry as in other parts of the world over the last few years different research has been carried out in order to improve the properties of galvanized steels because they are exposed to different highly corrosive environments, a very good alternative to improve corrosion resistance is the application of polymeric paints however materials continue to be developed to increase the lifespan of these and at the same time be less polluting to the market. For this reason, this research paper carried out the study of the atmospheric corrosion behavior of galvanized steel sheets and sheets with different coating colors, commonly used in weather-exposed roofs which were supplied by a Colombian company.

The analysis was performed for three (3) different immersion times corresponding to 0, 15 and 30 days, in contact with the simulated saline environment, the deterioration of galvanizing was evaluated using electrochemical techniques such as: Electrochemical impedance spectroscopy (EIS), Polarization Resistance (RP) and potentiodynamic curves. Determining moderately better results for the pigmentation coating white color compared to gray, and higher than only galvanized, making it because of its composition has greater resistance to atmospheric corrosion.

---

\* Degree Work (Modality: Research Project)

\*\* Faculty of Engineering Physicochemical. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director Darío Yesid Peña Ballesteros, Corrosion Doctor.

## Introducción

En la industria del acero es muy común que nos enfrentemos a problemas de corrosión debido al inminente contacto de agentes corrosivos que están presentes en la atmosfera, lo cual genera sobrecostos al momento del mantenimiento y cambio anticipado de piezas debido a la reducción de la vida útil de las mismas. Para esta afectación se han venido desarrollando diversos estudios a los materiales empleados con el fin de disminuir la perdida de espesores que se puedan presentar y se ha logrado establecer que una muy buena opción para aumentar la durabilidad del acero y protegerlo contra la corrosión son los recubrimientos anticorrosivos (Roberge, 2008).

Actualmente se pueden encontrar en el mercado láminas de acero con capas de cinc (material de gran importancia en la elaboración de infraestructuras), denominado acero galvanizado al cual le han mejorado las propiedades al adherirle un revestimiento de pintura polimérica con la finalidad de brindar mayor eficiencia y protección a posteriores ataques corrosivos generados por el ambiente (American Galvanizers Association, 2015). La inversión generada en la aplicación de pinturas poliméricas al acero será relativamente baja comparada con el costo que puede generar las pausas operativas para la atención de daños, mantenimientos, cambio de maquinaria, o piezas en mal estado (Escuela Politécnica Nacional, s.f).

Una industria colombiana ha proveído una lámina de acero al carbono con una cantidad de acero galvanizado Z180 (180 g/cm<sup>2</sup>) con 13 μm de espesor sobre la superficie del acero para

posteriormente aplicar una capa primer y una capa de pintura especialmente de tipo alquídico patentada por dicha empresa.

Las industrias siderúrgicas colombianas están en constante inversión de nuevas tecnologías que permitan mejorar las propiedades de los materiales expuestos a ambientes atmosféricos agresivos como el costero en los cuales abundan una alta concentración de sales. Es por esto la importancia de encontrar recubrimientos poliméricos que permitan aumentar la durabilidad del acero generando un bajo costo en su fabricación, mantenimiento y un excelente acabado con color.

Con el siguiente trabajo de investigación se busca evaluar el comportamiento electroquímico de las pinturas suministradas y se predice cual presenta mejor eficiencia ante la corrosión de un ambiente salino simulado, con estos resultados la empresa tomará decisiones sobre cuál de los recubrimientos le generará una mejor eficiencia y una mayor venta por sus excelentes propiedades.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar la velocidad de corrosión de un acero al carbono expuestos a diferentes tipos de galvanizados y pinturas.

### **1.2 Objetivos específicos**

Determinar la velocidad de corrosión por medio de las técnicas de Resistencia a la Polarización y curvas de Polarización Potenciodinámica de un acero galvanizado y pintado.

Evaluar la resistividad de los respectivos recubrimientos, mediante la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

## **2. Marco referencial**

En la industria los daños por corrosión y reparación de esta generan gastos de millones de dólares a nivel mundial, es por esto que la galvanización en caliente después de la fabricación es un proceso adaptable para controlar la corrosión ya que resuelve muchos de los problemas de corrosión que existe en la mayoría de las aplicaciones industriales (Roberge, 2008).

### **2.1 Acero galvanizado**

El proceso de fabricación del acero galvanizado consiste en la aplicación de un recubrimiento de cinc sobre el acero, este recubrimiento se da mediante la galvanización en caliente, la cual también se conoce como galvanización por inmersión. El proceso consiste en hacer una inmersión de la pieza en un baño de zinc fundido a una temperatura aproximada de 450°C.

El acero galvanizado se caracteriza por poseer una alta resistencia a la corrosión, esto se da debido a que el cinc forma una película que se adhiere sobre el hierro y al ser un metal más activo que el hierro forma un par galvánico lo que le permite disminuir la velocidad de disolución (Infante, 2020).

### **2.2 Mecanismos de corrosión en el acero galvanizado**

El óxido de cinc (ZnO) se identifica por ser una película muy dura y es el punto de partida de la corrosión del cinc en el aire. Este óxido al momento de interactuar con la humedad del aire

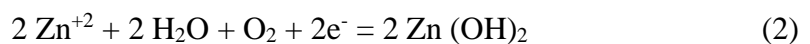
produce el hidróxido de cinc ( $\text{Zn(OH)}_2$ ), seguidamente reacciona con el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera para formar el carbonato básico de cinc por lo general de la forma ( $2\text{ZnCO}_3 \cdot 3\text{Zn(OH)}_2$ ). Esta película gracias a su propiedad de adherencia y por ser relativamente insoluble, es la responsable que en diferentes condiciones atmosféricas genere una protección contra la corrosión. Sin embargo, la presencia de cloruros en los diferentes ambientes modifica la composición de los productos de corrosión formados, aumentando la solubilidad y la velocidad de corrosión (Echeverría. 2002).

### **2.2.1 Mecanismo anódico**

Es necesario la presencia de iones  $\text{Cl}^-$  los cuales reaccionan dando lugar a los electrones necesarios. Ocurre la oxidación del cinc al combinarse con los iones de  $\text{Cl}^-$ .



Permite que el cinc entre a formar parte del electrolito como ion y reaccione con el agua produciendo una capa compuesta de hidróxido de cinc.



Esta capa se caracteriza por ser porosa lo que permite el paso continuo de los iones  $\text{Cl}^-$  los cuales continuarán reaccionando.



El ( $\text{ZnCl}_4^{-2}$ ) es un compuesto soluble el cual se va acumulando debajo de las capas de hidróxido y sulfato de cinc hasta romperlas y en conjunto con el agua se disuelven formando cráteres en la superficie del acero galvanizado. Estos lugares son los puntos donde se desencadena la corrosión localizada, la cual alcanza la interface del acero y origina la reacción anódica (Sierra y Quintero, 2012).



### **2.2.2 Mecanismo catódico**

Esta reacción se presenta por la reducción del oxígeno disuelto.



Dependiendo de las características del electrolito en contacto con la superficie metálica la reacción de descarga de hidrogeno puede ser.



## **2.3 Factores que influyen en la acción de los cloruros**

Cuando se habla sobre lo que influencia a la corrosión por cloruros en el acero galvanizado, se encontraron diversos factores como el espesor de la capa de cinc, la concentración de cloruros, la concentración de los productos de corrosión, entre otros (Montesdeoca et al., 2001).

### **2.3.1 Efecto del espesor de la capa de cinc**

Al ser la capa de cinc uniforme en toda la superficie de la probeta su influencia en los resultados del efecto corrosivo es constante, ya que genera una capa de óxido la cual actúa como una barrera ante los agentes corrosivos del ambiente.

### **2.3.2 Efecto de la concentración de cloruro**

En las disoluciones de cloruro sódico la disolución del cinc puede verse favorecida por la difusión de especies cloro-cinc como por ejemplo  $\text{ZnCl}_4^{2-}$  fuera de la superficie del electrodo. Por este motivo los cloruros perjudican la eficiencia de las acciones de pasivación y causan corrosión localizada la cual disminuyen los potenciales de electrodo del metal hacia valores más negativos.

En general los cloruros dan lugar a productos de corrosión menos compactos y adherentes que otros agentes oxidantes, con lo cual el ataque es mayor (Bastidas et al., 1982).

### ***2.3.3 Efecto de la concentración de productos de corrosión***

La concentración del cinc metálico puede conducir a la precipitación del hidróxido de cinc sobre la superficie del metal por lo que se formará una capa de hidróxido poroso que disminuye la velocidad de corrosión, pero no protege al metal de la corrosión. La película delgada de corrosión que se forma será poco estable, poco protectora y soluble, lo que da lugar al mecanismo adsorción-disolución-precipitación (Santana, J. y González, J. 2005).

## **2.4 Recubrimientos poliméricos**

Las pinturas confieren dos atributos principales que son la decoración y la protección. La decoración se puede manejar con estrategias como pigmentos en la formación para obtener los colores deseados y propiedades ópticas requeridas, sin embargo, los mayores avances se han obtenido con respecto al factor de la protección, ya que este tipo de pinturas gracias a los efectos de los pigmentos anticorrosivos forman capas de recubrimientos estables sobre el sustrato lo cual aumenta las propiedades de resistencia a la corrosión (Armelin E., 2007).

## **2.5 Pruebas electroquímicas**

### ***2.5.1 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)***

Es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna que se aplica a un electrodo para determinar la respuesta

correspondiente. Se realiza aplicando una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias, así el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial, tiempo y corriente dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancia” (Montesdeoca et al. 2001).

### ***2.5.2 Resistencia a la polarización (RP)***

Permite medir las velocidades de corrosión de forma directa en tiempo real, su uso está limitado a medios conductivos líquidos pero el tiempo de respuesta y la calidad de los resultados es superior comparado a otros medios de monitoreo de corrosión. Esta técnica es utilizada con mejores resultados cuando se instala como un sistema de monitoreo continuo (Conrad J., 1987).

La velocidad de corrosión se determina una vez obtenida la resistencia a la polarización (Rp) ya que se encuentran directamente relacionadas, en el apéndice A permite observar una curva representativa de dicha técnica (Poulson, 1983). Este tipo de técnica ya se encuentra estandarizada con la norma ASTM G3-89 Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing (ASTM International, 1999).

### ***2.5.3 Extrapolación de Tafel***

Es una polarización de alto campo que se aplica entre potenciales de 250 a 300 mV tanto en sentido catódico, y anódico cómo se observa en el apéndice B (Zaki Ahmad, 2006). Con esta técnica se obtiene la  $i_{\text{corr}}$  por la extrapolación de las regiones catódicas y anódicas en el potencial de corrosión, también es posible calcular las pendientes de Tafel que son parámetros cinéticos útiles en el cálculo de la  $i_{\text{corr}}$  con Rp (Walch, F., 2000).

### 3. Descripción experimental

A continuación, se explica la metodología experimental en la cual se detallan las variables operacionales, materiales a analizar y tiempos de exposición entre otros ítems.

#### 3.1 Diseño experimental

El desarrollo experimental consta de tres etapas fundamentales que permiten un orden lógico de experimentación de las muestras así:

Etapa 1. Preparación de las muestras (láminas de acero galvanizado con y sin pintura).

Etapa 2. Montaje del sistema a evaluar (celda electroquímica y jaula Faraday).

Etapa 3. Realización de pruebas como: Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), Resistencia a la polarización (RP) y Curvas potenciodinámicas.

En total se escogieron 6 muestras, 4 de acero galvanizado con recubrimiento polimérico de 2 coloraciones diferentes (2 grises, 2 blancas) y 2 muestras de acero galvanizado que se tomaron como referencia frente al comportamiento de las muestras con recubrimientos, descripción de los espesores de las muestras empleadas en el apéndice C.

Se escogió un tiempo de exposición total de 30 días, con el objetivo de evaluar el comportamiento electroquímico de las muestras en un ambiente salino simulado. Para tener un control organizado de las pruebas se empleó un calendario de pruebas (tabla 1).

**Tabla 1.**

*Tiempos de exposición de las láminas de acero galvanizado con y sin recubrimiento polimérico en ambiente salino simulado.*

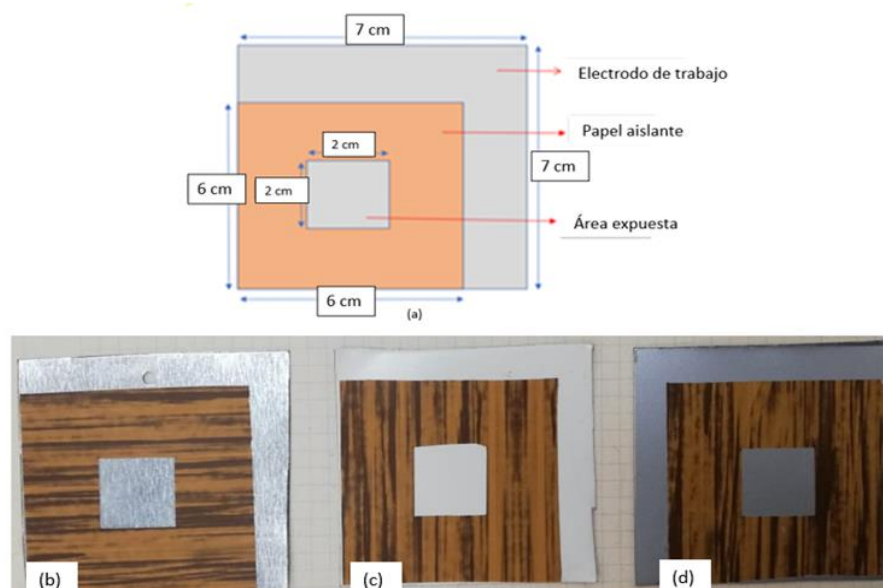
MUESTRA	DÍA						
	0	1	5	12	15	21	30
<b>Acero galvanizado</b>							
# 1	1	1	1	1	1	1	1
# 2	1	1	1	1	1	1	1
<b>Recubrimiento gris</b>							
# 1	1	1	1	1	1	1	1
# 2	1	1	1	1	1	1	1
<b>Recubrimiento blanco</b>							
# 1	1	1	1	1	1	1	1
# 2	1	1	1	1	1	1	1

### 3.2 Preparación de las muestras a analizar

Cada muestra seleccionada se cortó con las siguientes dimensiones (7cm x 7cm), posteriormente se colocó sobre la muestra un papel aislante de (6 cm x 6 cm), en la que se dejó un orificio cuadrado concéntrico con un área de 4 cm<sup>2</sup> para su posterior estudio. (Figura 1).

**Figura 1.**

*a) Esquema de las dimensiones de las muestras empleadas. b) Electrodo de trabajo acero galvanizado. c) Electrodo de trabajo Ral 9002 (Blanca). d) Electrodo de trabajo Ral 9006 (Gris).*

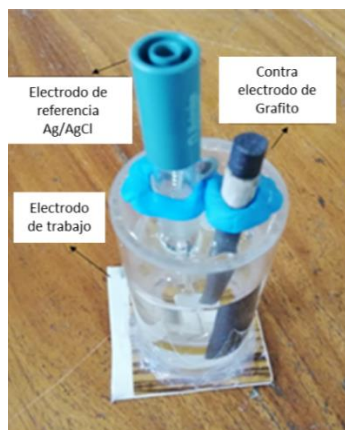


### 3.3 Montaje de la celda electroquímica

Según la norma ASTM G1-03 *Standard Practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test samples* (ASTM International, 2017), se realizó el respectivo proceso de limpieza a las láminas de acero galvanizado, mientras que las láminas con recubrimiento se limpiaron con agua destilada y posteriormente se secaron con aire cálido. Todas las muestras se depositaron en un ambiente salino simulado con cloruro de sodio (NaCl) al 3% en peso. Para la realización de la celda fue necesario el montaje de un cilindro acrílico hueco sobre cada lámina y el área expuesta a la solución, el cilindro en su parte superior consta de una tapa con dos orificios en los cuales se introducen el electrodo de referencia Ag/AgCl<sub>2</sub> y el contra electrodo de grafito según la norma ASTM G-31 *Standard Guide for Immersion Corrosion Testing in the Metal Laboratory* (ASTM International, 2017) (Figura 2).

#### Figura 2.

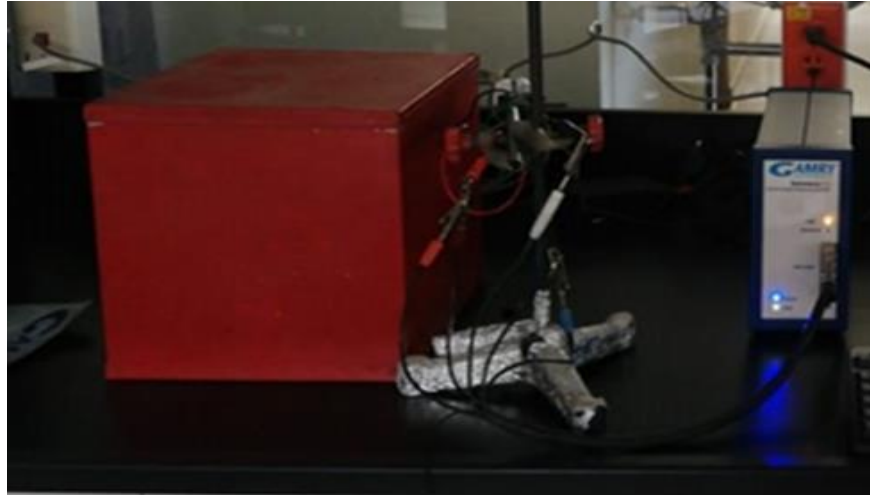
*Montaje experimental de la celda electroquímica sobre las muestras de acero galvanizado con o sin recubrimientos poliméricos.*



La celda electroquímica se introdujo en una jaula Faraday para evitar la interferencia de las corrientes parásitas y agentes del ambiente en los resultados de la prueba EIS. (Figura 3)

**Figura 3.**

*Montaje de la jaula Faraday y equipo de análisis electroquímico GAMRY 600.*

**3.4 Desarrollo de pruebas****3.4.1 Pruebas electroquímicas**

Las pruebas se realizaron de acuerdo con el cronograma anteriormente planteado (Tabla 1) donde fueron seleccionadas las 3 muestras que mejor explicarán el comportamiento electroquímico. Se utilizaron las técnicas electroquímicas de Espectroscopia de impedancia Electroquímica según la norma ASTM G106-89 *Standard Test Methods for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements* (ASTM International, 2015), Resistencia a la Polarización según la norma ASTM G59 *Standard test Methods for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements* (ASTM International, 2014) y Polarización Potenciodinamica. Para determinar la velocidad de corrosión en los diferentes electrolitos se utilizó la norma ASTM G102 *Standard Test Methods for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements* (ASTM International, 2010). Las condiciones de trabajo se tomaron bajo los parámetros explicados a continuación (Tabla 2).

**Tabla 2.**

*Condiciones de trabajo para las pruebas electroquímicas.*

Técnica de Espectroscopia de impedancia Electroquímica (EIS)	
PARÁMETRO	VALOR
Frecuencia Inicial	100.000 Hz
Frecuencia Final	0.1 Hz
Escala de puntos o Intervalos	7
Amplitud	10 mV
Temperatura	25 °C
Técnica de Resistencia a la Polarización (RP)	
PARÁMETRO	VALOR
Potencial inicial	-0,025V vs Eocp
Potencial final	0,025 V vs Eocp
Velocidad de barrido	0,167 mV/s
Periodo de muestreo	1 s
Método de Polarización Potenciodinámica	
PARÁMETRO	VALOR
Potencial inicial	-0,03V vs Eocp
Potencial final	1,5V vs Eocp
Velocidad de barrido	0,167 mV/s
Periodo de muestreo	1 s

## 4. Resultados y discusiones

### 4.1 Velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión se determinó en mpy (milésimas de pulgada por año) a temperatura ambiente a partir de las técnicas electroquímicas realizadas: Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, Resistencia a la Polarización y curvas Potenciodinámicas, las cuales se realizaron bajo la norma ASTM G59 (ASTM International, 2014) y la norma ASTM G102 (ASTM International, 2010). Se empleó la ecuación (7) para hallar la velocidad de corrosión (CR), donde K: 0.128 (mpy g/  $\mu\text{A cm}$ ),  $i_{\text{corr}}$ : densidad de corriente (  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ), EW: peso equivalente: 27.92 (g/eq),  $\rho$ : densidad del material: 7,85 (g/cm<sup>3</sup>), Rp: resistencia a la polarización (ohm/cm<sup>2</sup>) y  $\beta_a$  y  $\beta_c$ : pendientes de Tafel anódicas y catódicas respectivamente (V). Los valores de  $i_{\text{corr}}$  para las pruebas electroquímicas se determinaron a partir de las curvas obtenidas de cada técnica mediante la ecuación (8).

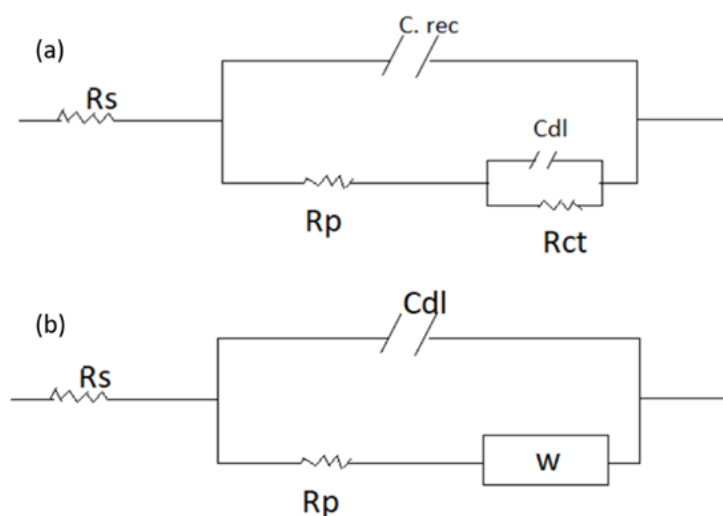
$$CR = K * \frac{i_{corr} * EW}{\rho} \quad (7) \quad i_{corr} = \frac{\beta_a * \beta_c}{2,303 R_p (\beta_a + \beta_c)} \quad (8)$$

#### 4.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

Durante el desarrollo de las pruebas se evidenciaron diferentes tipos de comportamiento electroquímico por lo que fue necesario la implementación de dos tipos de circuito equivalente figura (4), donde  $R_s$  es resistencia a la solución,  $R_p$  es la resistencia del recubrimiento,  $R_{ct}$  es la resistencia a la transferencia de carga,  $C_{rec}$  es capacitancia del recubrimiento,  $C_{dl}$  es la capacitancia de la doble capa.

#### Figura 4.

*Circuito equivalente para el acero galvanizado con y sin recubrimiento polimérico.*



##### 4.2.1 Análisis de los resultados obtenidos en la técnica EIS para un periodo de inmersión de las muestras de 0 días

En la figura 5 a), b), c) se muestra la respuesta electroquímica al galvanizado y a las películas de pinturas blanca y gris obtenidas mediante la evaluación de espectroscopia de impedancia electroquímica. Se aprecia que los datos obtenidos para las pinturas se registra una

respuesta que comienza 151,25 y 118,54  $\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$  respectivamente. Correspondiente al galvanizado este comienza a valor de 0,7167  $\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$  comportamiento que puede estar relacionado que al principio de la prueba se presentó inductancia a altas frecuencias. Estos datos obtenidos y mostrados en la tabla (3) están relacionados con la resistencia a la solución  $R_{(\text{sol})}$ .

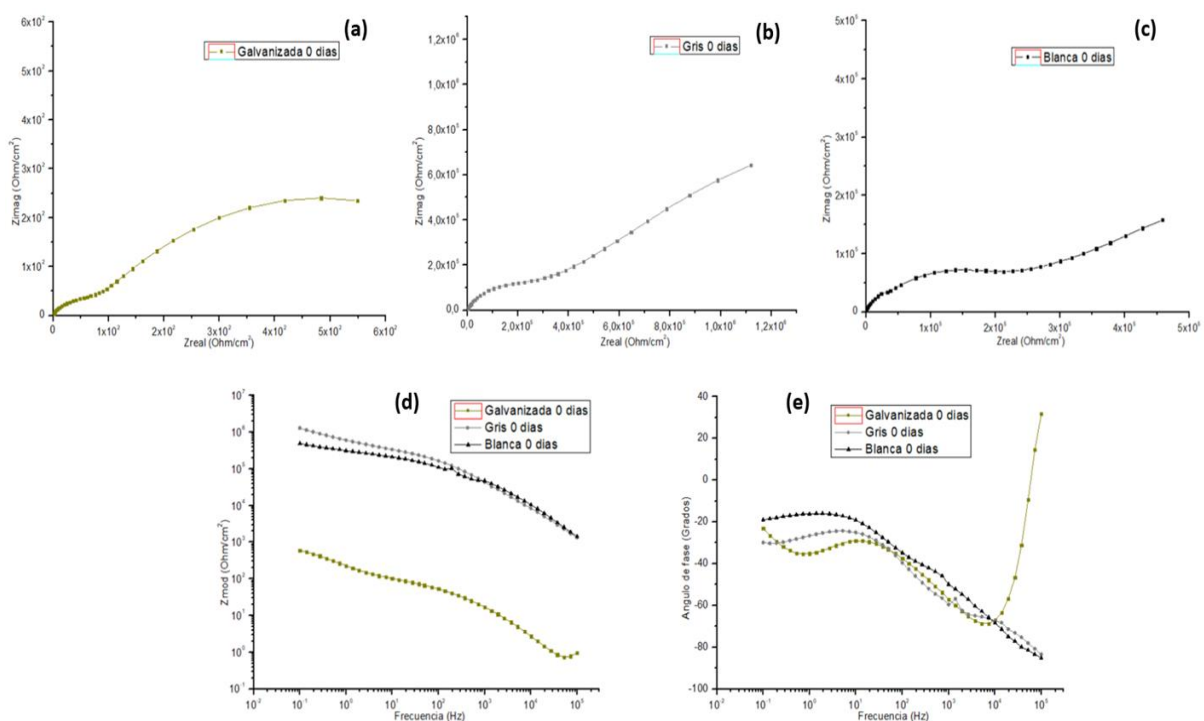
Las gráficas de Nyquist que se presentan en las gráficas 5 a), b), c) corresponden a una respuesta típica de una lámina con recubrimiento, esto debido a que presenta dos semicírculos capacitivos sobrepuestos que están relacionados con el recubrimiento y el material base, la respuesta del recubrimiento de galvanizado y las pinturas de cinc puede relacionarse al circuito equivalente que se muestra en la figura 4 (a), donde el ( $R_p$ ) se relaciona con el transporte en los poros del recubrimiento (Liu O., 2018), el  $R_{ct}$  es la resistencia a la transferencia de carga el cual es igual a la diferencia entre la resistencia total y la resistencia a la solución, ( $R_T - R_{sol}$ ) y los capacitores que se relacionan con la proyección del eje imaginario del diagrama de Nyquist.

La tabla 3 muestra los valores obtenidos de la prueba de impedancia electroquímica, en ella se resalta que el galvanizado es el que tiene menor resistencia a la transferencia de carga que las pinturas, esto puede deberse a que la transferencia de carga entre el hierro del sustrato de acero es mayor que la del cinc, puesto que este actúa como ánodo de sacrificio para formar una capa pasiva en la superficie del electrodo dando como resultado una posible respuesta mixta (Arias, C. 2011). Por otro lado, la pintura gris mostró mayor resistencia a la transferencia de carga, información que se puede comprobar observando la figura 5 (d) donde se tiene el diagrama de bode con la resistencia total de las tres muestras realizadas. De igual manera en la figura 5 (e) se obtiene la gráfica del ángulo de fase vs la frecuencia, el cual permite comprobar el circuito equivalente planeado en la figura 4(a) debido a que el ángulo de fase no termina en  $45^\circ$ , es decir el electrodo no tiene un comportamiento tipo Warburg (Araque, J. y Villabona, J., 2011) además, se

corroboró el comportamiento capacitivo al tener una gráfica con pendiente negativa (Flores y Torres, 2012). La inestabilidad en los diagramas de fase se asocia con la posible interacción del electrolito con los pigmentos metálicos de la pintura (Hu J., 2009).

**Figura 5.**

*Espectroscopia de impedancia electroquímica para un t=0 días (0 h) en una solución de NaCl al 3% en peso. (a) Nyquist galvanizado en acero, (b) Nyquist pintura gris, (c) Nyquist pintura blanca, (d) diagrama de bode  $R_{total}$  vs frecuencia y (e) diagrama de bode ángulo de fase vs frecuencia.*



**Tabla 3.**

*Parámetros de circuito equivalente para las muestras a un t= 0 días (0 h).*

DIA 0	Rs (Ω/cm <sup>2</sup> )	Cdl (Ω/cm <sup>2</sup> )	Rp (Ω/cm <sup>2</sup> )	C.rec (Ω/cm <sup>2</sup> )	R.tot (Ω/cm <sup>2</sup> )	Rct (Ω/cm <sup>2</sup> )
Galvanizada	0,7167	35,42	111,22	239,83	830	829,28
Gris	151,25	124387,07	454853,54	642761,14	1949874,808	1949723,558
Blanca	118,54	71930,41	308906,81	158056	797400	797281,46

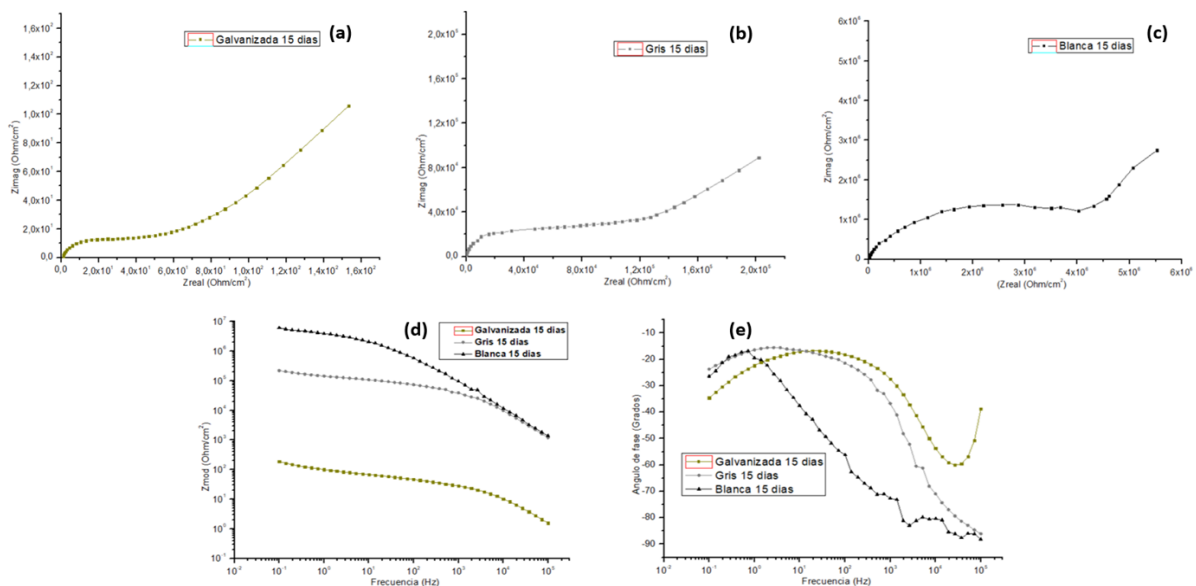
#### ***4.2.2 Análisis de los resultados obtenidos en la técnica EIS para un periodo de inmersión de las muestras de 15 días***

Los resultados obtenidos al evaluar mediante espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) pasados 15 días de inmersión en una solución de 3% en peso de NaCl mostraron un cambio en el comportamiento de las gráficas de Nyquist y de Bode. Para el galvanizado (Figura 6 (a)) se aprecia un semicírculo capacitivo, con una línea a 45° de inclinación indicando un comportamiento controlado por Warburg, información que puede ser verificada al revisar la gráfica de la Figura 6 (e) donde el Angulo de fase, termina cerca de los 40°, una posible explicación para este comportamiento puede ser que no se haya llegado al equilibrio durante la prueba de potencial a circuito abierto o que el proceso este controlado por difusión. De igual manera, la pintura gris presentó el mismo comportamiento que la muestra galvanizada, sin embargo, debido a la interacción del electrolito con los pigmentos de la lámina el diagrama no arroja una información certera de su comportamiento por difusión, pero cabe resaltar que el ángulo formado en el diagrama de Nyquist de la pintura gris, se encuentra cerca de los 40°, indicando un posible control mixto, de igual manera se ve reflejado en el ángulo de fase procesos capacitivos en las tres graficas al tener una pendiente negativa (Liu O., 2018).

Por otro lado, la gráfica de la pintura blanca si presenta los dos semicírculos capacitivos característicos un recubrimiento como se muestra en la figura 6 (c), además indica una mayor resistencia total entre los otros 2 recubrimientos de galvanizado y pintura gris, indicando una mayor resistencia a la transferencia de carga como se muestra en la figura 6 (d), el recubrimiento de color blanco corresponde al circuito equivalente mencionado en la figura 4(a) y los recubrimientos de galvanizado y la pintura gris, los cuales poseen comportamiento tipo Warburg, el circuito equivalente se ajusta a la figura 4 (b).

**Figura 6.**

*Espectroscopia de impedancia electroquímica para un  $t=15$  días en una solución de NaCl al 3% en peso. (a) Nyquist galvanizado en acero, (b) Nyquist pintura gris, (c) Nyquist pintura blanca, (d) diagrama de bode  $R_{total}$  vs frecuencia y (e) diagrama de bode ángulo de fase vs frecuencia.*

**Tabla 4.**

*Parámetros de circuito equivalente para las muestras a un  $t= 15$  días (360 h).*

DIA 15	$R_s$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$Cdl$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$C_{rec}$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$R_{tot}$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$R_{ct}$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )
Galvanizada	1,217	12,95	49,89	-	-	-
Gris	81,9	24101,12	73547,48	-	-	-
Blanca	44,21	1374356,77	5733517,58	2746713,8	7747597,16	7747552,95

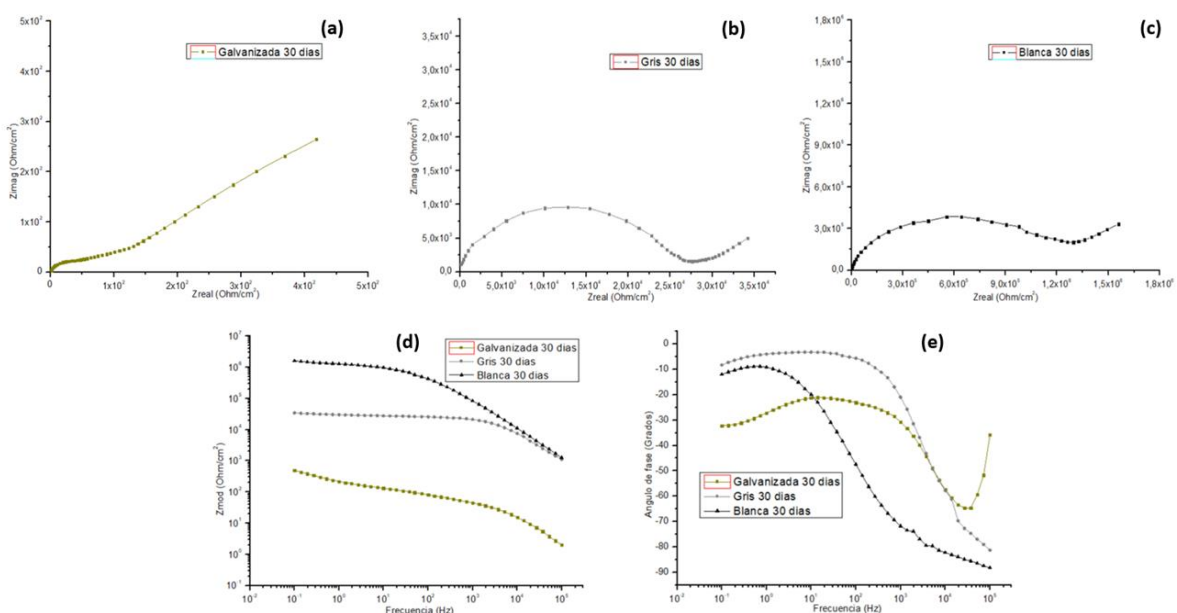
#### **4.2.3 Análisis de los resultados obtenidos en la técnica EIS para un periodo de inmersión de las muestras de 30 días**

A los 30 días de inmersión de las láminas, se evidencia en la figura 7(a) que no varía su comportamiento puesto que continua presenta un control por difusión a altas frecuencias esto se puede relacionar a que la capa pasiva formada en la superficie del electrodo responde a un comportamiento de tipo Warburg, sin embargo en las gráficas de la figura 7 (b) y (c) se observan

un comportamiento típico de un recubrimiento, con dos semicírculos capacitivos, en el cual se pueden obtener los valores de resistencia a la transferencia de carga, se puede evidenciar que la lámina pintada de blanca, presenta mayores valores de círculos capacitivos, con valores de aproximadamente  $3 \times 10^{-5}$  lo que califica a la capa de pinturas como buenos materiales dieléctricos. En la gráfica de bode de  $R_{Total}$  vs Frecuencia Figura 7(d) se puede evidenciar que la pintura blanca responde a una mayor resistencia a la transferencia de carga, además comparando las gráficas de las figuras 5(d) 6(d) y 7(d) se resalta que en la resistencia total la pintura blanca obtuvo los valores más altos de resistencia, lo que permite indicar que la pintura blanca posee propiedades superiores a la resistencia por transferencia de carga (Liu O., 2018).

### Figura 7

*Espectroscopia de impedancia electroquímica para un  $t=30$  días (720 h) en una solución de NaCl al 3% en peso. (a) Nyquist galvanizado en acero, (b) Nyquist pintura gris, (c) Nyquist pintura blanca, (d) diagrama de bode  $R_{total}$  vs frecuencia y (e) diagrama de bode ángulo de fase vs frecuencia.*



**Tabla 5.**

*Parámetros de circuito equivalente para las muestras a un  $t= 30$  días (720 h).*

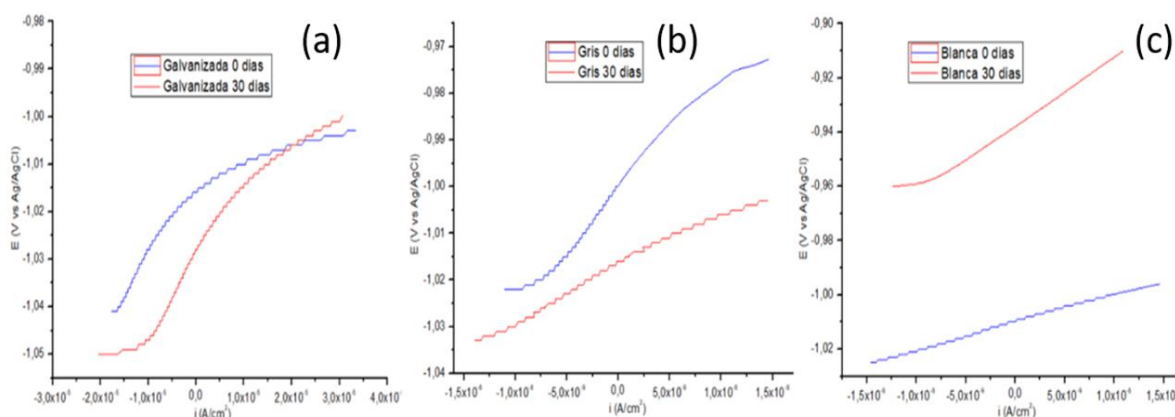
DIA 30	$R_s$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$Cdl$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$C_{rec}$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$R_{tot}$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$R_{ct}$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )
Galvanizada	1,605	24,45	47,76	-	-	-
Gris	167,3	9629,21	25680,73	4942,35	45130	44962,7
Blanca	37,3	385700	642700	331200	2127300	2127262,7

### 4.3 Resistencia a la polarización ( $R_p$ )

En la figura 8, se presentan las curvas de polarización para las láminas galvanizadas y pintadas de gris y blanco, en ellas se obtuvieron los valores de resistencia a la polarización a los días 0 y 30, para ambas pruebas se utilizó como electrolito una solución de NaCl al 3% en peso. Los valores recolectados se adjuntaron en la tabla (6) y los valores de resistencia a la polarización fueron calculados mediante la norma ASTM G3 (ASTM International, 1999).

**Figura 8.**

*Curvas de resistencia a la Polarización ( $R_p$ ); a) Lámina galvanizada, b) Lámina con recubrimiento Gris, (c) Lámina con recubrimiento Blanco.*



En la tabla (6) se aprecia como la lámina galvanizada a los 0 días de inmersión, registra una resistencia a la polarización de  $1807,093 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y a los 30 días, su resistencia a la polarización

incrementa a 2001,11  $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ , esto se puede explicar a la posible formación de una capa protectora pasiva de  $\text{ZnO}_2$  en la superficie del electrodo, que mejora sus propiedades de corrosión. Por otro lado, la película protectora de pintura gris, presentó un mayor valor de resistencia a la polarización el día 0 de la prueba con un valor de 1760970  $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$  mientras que en el día 30 su valor fue de 1357000  $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$  la disminución de la resistencia a la polarización puede deberse a que el recubrimiento de pintura pudo degradarse a través del tiempo en que estuvo en inmersión. Finalmente, la película protectora de pintura blanca presentó mejores propiedades de resistencia a la polarización, pasando de una resistencia a 0 días de 1104900  $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$  a valores de 2484090  $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$  a los 30 días, estos valores son los más elevados de las 3 muestras analizadas, infiriendo que la muestra pintada de blanco tiene mejores propiedades a la corrosión que la muestra galvanizada y pintada de gris.

#### Tabla 6.

*Resistencia a la polarización ( $R_p$ ) en función del tiempo para las muestras de acero galvanizado, y recubrimientos de color gris y blanco, en una solución de NaCl al 3% en peso.*

Muestra	Tiempo (Días)	$R_p$ ( $\text{Ohm}/\text{cm}^2$ )
Galvanizada	0	1807,093
Galvanizada	30	2001,11
Gris	0	1760970
Gris	30	1357000
Blanca	0	1104900
Blanca	30	2484090

#### 4.4 Curvas de Polarización potenciodinámica

Para realizar las pruebas potenciodinámicas, se utilizó el valor de potencial a circuito abierto, que se presenta en la tabla (7). En esta tabla se muestran los valores correspondientes al

potencial de equilibrio de las 3 muestras analizadas (capa galvanizada, capa de pintura gris y capa de pintura blanca), teniendo como sustrato hierro de la lámina de acero. Para el galvanizado se obtuvo un valor de OCP de  $-1,025$  V vs Ag/AgCl valores típicos de un galvanizado (Ramírez, J. et al., Mayo, 2015), para la pintura gris el potencial de equilibrio se posicionó en  $-0,968$  V vs Ag/AgCl y para la pintura blanca el potencial se ubicó en  $-0,936$  V vs Ag/AgCl mostrando el comportamiento más noble de las tres muestras analizadas.

La figura 9 muestra las curvas de polarización de los tres recubrimientos, evaluados según la norma ASTM G5-14e1 *Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements* (ASTM international, 2018), esto debido a que la capa de cinc del galvanizado espera una pasivación en un mayor rango de potenciales de su rama anódica, por otro lado, con el fin de tener una comparación, entre el galvanizado y las pinturas se realiza el mismo rango de potenciales a las capas de pintura gris y blanca.

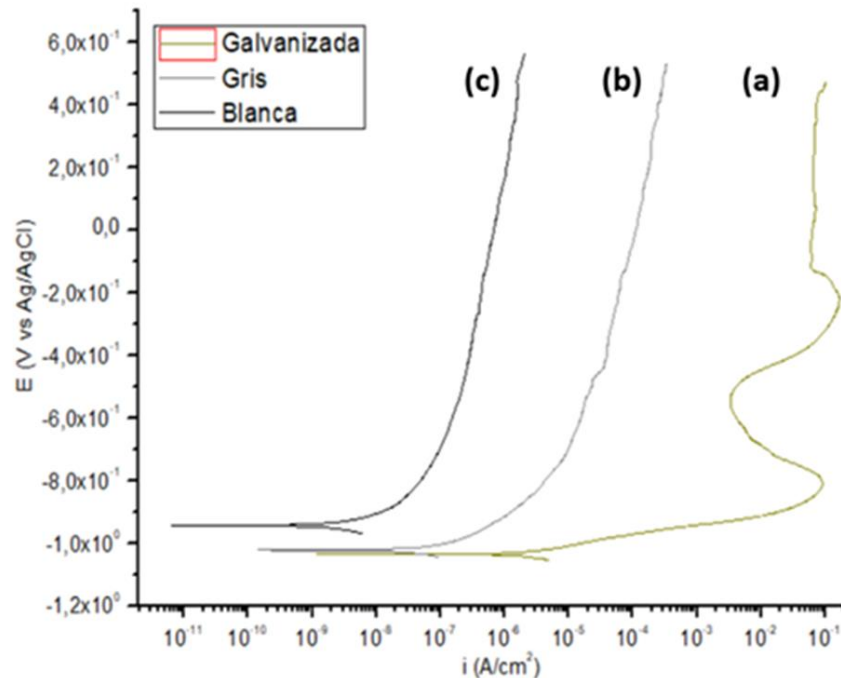
En la figura 9 curva (a) se muestran las gráficas obtenida para la lámina galvanizada donde la rama anódica presenta un potencial de Flade a  $-0,809$ V vs Ag/AgCl, que representa la transición entre la zona de corrosión y la zona de pasivación, este punto indica la formación de una capa delgada y estable en la superficie del electrodo que mejora su resistencia a la corrosión (Arias, C. 2011), de igual manera, la lámina galvanizada, muestra una zona de traspasivación a un potencial más noble de  $-0,218$ V vs Ag/AgCl, no tan estable como la primera capa puesto que en la curva se aprecia más ruido y al finalizar la muestra el recubrimiento de galvanizado se desprendió del sustrato. Las curvas 9(b) y 9(c) no presentaron ninguna zona de pasivación y se aprecia una estabilidad a lo largo de la prueba.

El comportamiento de las tres gráficas (galvanizado, pintada de gris y pintada de blanca) describen un barrido de potencial desde  $-0.03$  V hasta  $1,5$  V, donde se recortó el valor de la rama

catódica, con el fin de no afectar el recubrimiento de cinc ni las pinturas gris y blanca con corrientes de reducción. Los valores de las pendientes anódicas ( $\beta_a$ ) están reportadas en la tabla (4), donde se puede evidenciar que el galvanizado posee una pendiente de Tafel ( $\beta_a$ ) de  $106,51 \text{ mV.dec}^{-1}$ , Este comportamiento no se ajusta a la ecuación de Butler-Volmer, pero esta respuesta se puede dar debido a la formación de especies tales como óxidos o hidróxidos en la superficie del electrodo de cinc. Para la pintura gris la pendiente de Tafel ( $\beta_a$ ) arroja un valor de  $24639,864 \text{ mV. dec}^{-1}$  y para la pintura blanca un valor de  $2180790 \text{ mV. dec}^{-1}$ , estos valores de pendientes altos pueden estar relacionado a que la pintura es más resistente a la corrosión en comparación con el galvanizado.

### Figura 9.

Resultados de la curva potenciodinamica; (a) lámina galvanizada, (b) lámina con recubrimiento Gris, c) lámina con recubrimiento Blanco.



Por otro lado el potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) y la corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) tienen una relación directa con la termodinámica y la cinética de corrosión respectivamente, en la tabla (7) se

aprecia como el galvanizado tiene un  $E_{corr}$  de  $-1,035$  V vs Ag/AgCl y un  $i_{corr}$  de  $2,73 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , lo que indica una velocidad de corrosión avanzada, sin embargo, los valores de  $E_{corr}$  e  $i_{corr}$  obtenidos se relacionan con el mecanismo de protección de cinc, ya que el cinc sirve como ánodo de sacrificio protegiendo el sustrato de acero contra la corrosión (Sierra y Quintero, 2012). Las películas protectoras de pintura, mostraron valores de  $E_{corr}$  e  $i_{corr}$  mayores a los ánodos de cinc mostrando resultados de  $E_{corr}$  para la pintura gris de  $-1,022$  V vs Ag/AgCl y para la pintura blanca de  $-0,944$  V vs Ag/AgCl valores cercanos al potencial de circuito abierto que se relaciona con el equilibrio termodinámico de los procesos superficiales del electrodo, en el mismo sentido los valores de  $i_{corr}$  para las pinturas mostraron un mejor comportamiento en comparación a la lámina galvanizada alcanzando valores de corrientes de corrosión para la pintura gris de  $0,121 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  y para la pintura blanca de  $0,0132 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , valores que se relacionan con la cinética de corrosión.

A partir de los resultados obtenidos, se puede llegar a decir que la pintura blanca posee las mejores propiedades anticorrosivas, puesto que presenta valores de potencial más nobles que las otras láminas y corrientes de corrosión más pequeñas, en la tabla (7) se mencionan las velocidades de corrosión que fueron calculadas utilizando la norma ASTM G102 (ASTM International, 2010) donde se demuestra que la pintura blanca tiene una tasa de corrosión más lenta que la gris y presenta mejores propiedades de corrosión que la lámina galvanizada.

### Tabla 7.

*Datos obtenidos de la técnica Polarización Potenciodinámica para las muestras de acero galvanizado, y recubrimientos de color gris y blanco, en una solución de NaCl al 3% en peso.*

Muestra	OCP (mV)	$\beta_a$ (mV/Dec)	$E_{corr}$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$V_{corr}$ (mpy)
Galvanizada	-1025,29	106,51742	-1035,78	2,73	1,250616825
Gris	-968,623	24639,864	-1022,55	0,121	0,05543027
Blanca	-936,167	2180790	-944,15	0,0132	0,006046938

## 5. Conclusiones

Las pruebas por espectroscopia de impedancia electroquímica mostraron ángulos de fase negativos lo que se ve relacionada con la capacitancia, mostrando la pintura blanca, valores superiores de capacitancia frente a la pintura gris y al galvanizado, de igual manera la pintura blanca mostró una mayor resistencia total lo indicando que posee mejores propiedades a la transferencia de carga que los otros recubrimientos de galvanizado y pintura gris.

Las pruebas de resistencia a la polarización y las curvas potenciodinámicas, mostraron un comportamiento que permitió corroborar la formación de una capa anódica pasiva de cinc en la lámina de galvanizado, la cual presentó una zona de pasivación y otra de transpasivación que no presentaron las demás pintadas de gris y blanco.

Las pruebas de curvas potenciodinámicas, mostraron una tendencia favorable a la muestra con recubrimiento blanco puesto que esta presentó propiedades superiores de resistencia a la corrosión, obteniendo valores de 0.0060 (mpy), frente a 0.0554 (mpy) y 1.2506 (mpy) de las muestras con recubrimiento gris y acero galvanizado respectivamente.

## 6. Recomendaciones

Se recomienda realizar microscopia electrónica de barrido (SEM) y Energía de dispersión de rayos X (EDS) con el fin de mirar la morfología de las láminas (galvanizadas, pintadas de gris y pintadas de blanco).

Se recomienda realizar un potencial a circuito abierto a tiempo mayores o iguales de una hora para dar seguridad del potencial de corrosión y el comportamiento de las gráficas.

### Referencias Bibliográficas

- American Galvanizers Association, (2015). *Galvanizado en caliente para protección contra la corrosión, Guía del especificador*.
- Araque, J. Villabona, J., (2011). Determinación de la solubilidad de Hidrogeno en TiO<sub>2</sub> formado sobre Ti6Al4V a partir del concepto de impedancia de warburg. (tesis de grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Arias, C. (2011). *Estudio del comportamiento de un ambiente corrosivo con cloruros y sulfatos sobre una lámina de acero galvanizado*. (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Armelin, Liesa, Iribarren, & Frances (2007). *Marine Paint Development, Marine: Conductive polymers as anticorrosive additives*. Department of Chemical Engineering, E.T.S. Industrial Engineering of Barcelona, Received July 10, 2006, Accepted on January 16.
- ASSTM International. (2017). ASTM G1-03 Standard Practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test samples. *ASTM International*, 100 Barr Harbor Dr. P.O. box C-700 West Conshohocken, Pennsylvania United States.
- ASTM International. (1999). ASTM G3 Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. *ASTM International*, 89(Reapproved), 1-10. <https://doi.org/10.1520/G0003-14.2>.

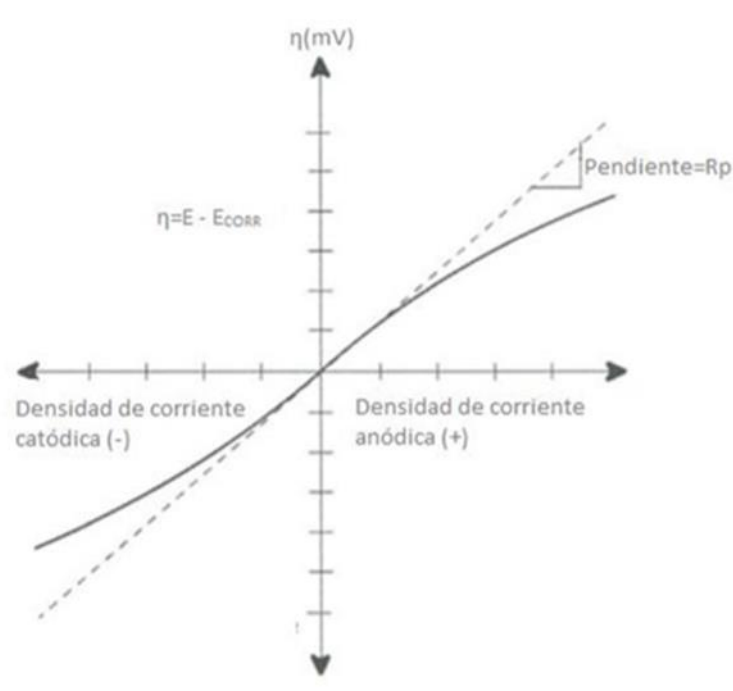
- ASTM International. (2010). ASTM G102 - Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. *ASTM Standards*, 89(Reapproved), 1–7. <https://doi.org/10.1520/G0102-89R10.2>.
- ASTM International. (2014). ASTM G59 - Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements. *ASTM Standards*, 97(Reapproved), 1–4. <https://doi.org/10.1520/G0059-97R14.2>.
- ASTM International. (2015). ASTM G106-89 Standard Test Methods for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements. 1–11. <https://doi.org/10.1520/E0407-07R15E01.2>.
- ASTM International. (2017). ASTM G31- (2018). Standard Guide for Immersion Corrosion Testing in the Metal Laboratory, NACE International / *ASTM International* 2017, Authorized for the Industrial University of Santander, March 5.
- ASTM International. (2018). ASTM G5 – 14e1 - Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, *ASTM International*, 100 Barr Harbour Dr. P.O. box C-700 West Conshohocken, Pennsylvania United States.
- Bastidas, J.M. Aballe, M. y González, J.A. (1982). Influencia de las capas de productos de corrosión sobre la cinética de corrosión atmosférica del aluminio, cobre, hierro y cinc. *CENIM*, 18(6), p 361.
- Conrad, J.R., (1987). *Material Science Engineering*, p 169.
- Echeverria, C.A. (2002). *Corrosión atmosférica del acero en condiciones climáticas de cuba: influencia del aerosol Marino* 15BN: 959 -16 -0188-3032.

- Ficha Técnica “Acero Pre-Pintado” ACESCO. Disponible en:  
<http://www.acesco.com/archivos/descargas/acero-pre-pintado-ficha-tecnica.pdf>.
- Flores & Torres (2012). Resistencia a la corrosión de recubrimientos orgánicos por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica. Bogotá: *Ingeniería y Universidad*, 16 (1), 43p. Recuperado a partir de <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/1514>.
- Hu, Li, Gao & Zhao (2009). Aging characterization of Steel coated with epoxy varnish when exposed in an artificial outdoor environment. *Design and Materials*, 30 (5), pp.1542-1547.
- Infante, O.A. (2020, abril). Galvanizado en caliente y en frío. *Metalindustria*.  
<http://www.asimet.cl/galvanizado.htm>.
- Itagaki, Ono, Watanabe, Katayama, & Noda (2006). Analysis on the degradation of organic films using dynamic impedance measurements. *Corrosion Science*, 48 (11), pp. 3802-3811.
- Liu, Ooi, Tada & Nishikata (2018). *Electrochemical monitoring of the degradation of the degradation of galvanized steel in simulated marine atmosphere*. Japan: Tokyo Institute of Technology, School of Materials and Chemical Technology.
- Montesdeoca, C. Santana, J. Santana, F y Gonzalez, J. (2001). *Caracterización electroquímica del efecto de los iones cloruro y sulfato sobre el cinc*. Universidad de las palmas de Gran Canaria, España.
- Navarrete, (2007). *Métodos de protección de metales: protección por revestimientos orgánicos*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Poulson, B. (1983). Electrochemical measurements in flowing solutions. *Corrosion Science*, 23(4), 391–430. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(83\)90070-7](https://doi.org/10.1016/0010-938X(83)90070-7).

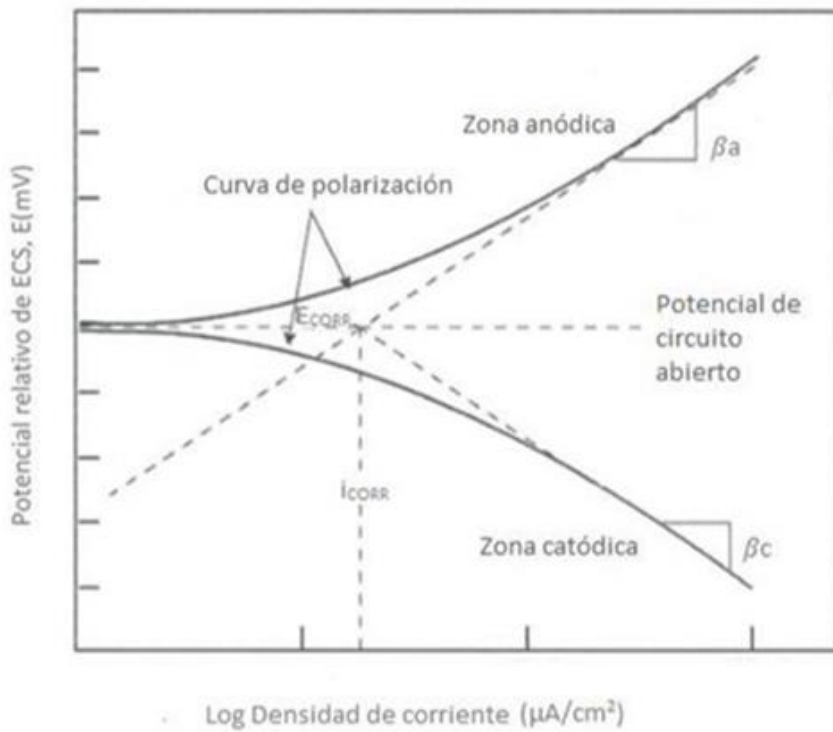
- Ramírez, J. Valero, M. Peña, D. y Torres, J., (mayo, 2015). Influencia del tamaño del cristal de cinc de láminas de acero galvanizadas en ambientes que contienen cloruros y sulfatos. *Facultad de Ingeniería* 24(39). pp. 99-108.
- Roberge, (2008). *Principles and Practice of Corrosion Engineering: Strategic impact and cost of corrosion damage*. New York: Mc Graw Hill, doi: 10.1036/0071482431.
- Santana, J. y González, J. (2005). Estudio de la corrosión atmosférica del acero al carbono y sus productos de corrosión mediante el empleo de técnicas electroquímicas, Difracción de rayos X y Microscopía Electrónica. Universidad de las Palmas de Gran Canaria, España.
- Sierra, D, y Quintero, L. (2012). *Estudio del comportamiento de la corrosión de un acero galvanizado, en un ambiente que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas*. (tesis de pregrado). Universidad Industrial De Santander, Colombia.
- Walch, F. (Ed.). (2000). *Un primer curso de ingeniería electroquímica*. Editorial Club Universitario, (2000) p 86-95.
- Zaki Ahmad. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control* (Elsevier).

## Apéndices

### Apéndice A. Técnica de Resistencia a la Polarización.



Curva representativa obtenida por medio de la técnica de resistencia a la polarización lineal (Rodrig & Lorena, 2019).

**Apéndice B.** Método de Extrapolación de Tafel.

Curva representativa obtenida por medio el método de extrapolación de Tafel (Rodrig & Lorena, 2019).

**Apéndice C.** Espesores de las láminas de acero galvanizado con y sin recubrimiento polimérico.

Muestra	Acero ( $\mu\text{m}$ )	Galvanizado ( $\mu\text{m}$ )	Capa de primer ( $\mu\text{m}$ )	Capa superficial ( $\mu\text{m}$ )
Galvanizada	450	13	-	-
Gris	450	13	5	20
Blanca	500	13	5	20,5

Nota: Ficha técnica acero pre-pintado. ACESCO.