

Determinación del mecanismo de daño de un acero al carbono con diferentes tipos de galvanizados y de capas de pinturas mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica

Jharold Navarro Barón

Ingeniero Metalúrgico

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería de Materiales

Director:

Darío Yesid Peña Ballesteros

Co-Director:

Hugo Armando Estupiñán Duran

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales

Maestría en ingeniería de materiales

Bucaramanga

2025

Tabla de contenido

Introducción	7
1. Descripción del trabajo de investigación	9
1.1 Planteamiento del problema	9
1.2 Hipótesis	10
1.3 Objetivo	11
<i>1.3.1 Objetivo General</i>	11
<i>1.3.2 Objetivos Específicos</i>	11
2. Estado del arte	12
3. Metodología Experimental	16
3.1 Revisión bibliográfica.	16
3.2 Materiales y reactivos.	17
3.3 Preparación de las muestras	17
3.4 Diseño de experimentos	19
3.5 Evaluación electroquímica	20
3.6 Caracterización de las muestras	22
4. Resultados y Discusión	24
5. Conclusiones	35
6. Recomendaciones	37
Referencias Bibliográficas	38
Anexos	44

Lista de figuras

Figura 1. <i>Esquema de las láminas pintadas de acero galvanizado.</i>	18
Figura 2. <i>Esquema de las muestras preparadas a partir de las láminas pintadas de acero galvanizado. Tomado y modificado de (Cabrales Villamizar, 2016).</i>	19
Figura 3. <i>Esquema de la celda electroquímica empleada. Tomado y modificado de [Sandoval-Amador et al., 2017].</i>	21
Figura 4. <i>Micrografía SEM-EDS de una lámina pintada de acero galvanizado.</i>	24
Figura 5. <i>Espectros Infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) obtenidos de las superficies pintadas de acero galvanizado.</i>	26
Figura 6. <i>Modelo de circuito equivalente empleado para ajustar los espectros de impedancia obtenidos a diferentes tiempos de exposición.</i>	27
Figura 7. <i>Espectro de impedancia electroquímica obtenido para las láminas pintadas de acero galvanizado a cero días de exposición. a) Diagrama de Nyquist, b) Diagrama de Bode Z vs $\text{Log}(f)$, y c) Diagrama de Bode φ vs $\text{Log}(f)$.</i>	29
Figura 8. <i>Espectro de impedancia electroquímica obtenido para las láminas de acero galvanizado a cero días de exposición. a) Diagrama de Nyquist, b) Diagrama de Bode Z vs $\text{Log}(f)$, y c) Diagrama de Bode φ vs $\text{Log}(f)$.</i>	30
Figura 9. <i>Variación temporal del módulo de impedancia.</i>	31
Figura 10. <i>Capacitancia de las láminas pintadas de acero galvanizado)</i>	32
Figura 11. <i>a) Fracción de agua y b) factor de pérdida.</i>	34

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Composición química del acero AISI/SAE 1020*.</i>	18
Tabla 2. <i>Diseño experimental de los ensayos de corrosión</i>	19

Resumen

Título: Determinación del mecanismo de daño de un acero al carbono con diferentes tipos de galvanizados y de capas de pinturas mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica*

Autor: Jharold Navarro Barón**

Palabras claves: Resistencia a la corrosión, Comportamiento electroquímico, Espectroscopia de impedancia electroquímica

Descripción:

Descripción: Se centra en el análisis a la resistencia a la corrosión de láminas de acero galvanizado y pintado, con especial atención al papel que desempeñan los recubrimientos de zinc y las pinturas de poliéster mejorando en su durabilidad y eficiencia en aplicaciones industriales, teniendo en cuenta que la corrosión es un fenómeno que afecta significativamente la durabilidad de las estructuras metálicas, y el uso de recubrimientos adecuados es crucial para mitigar este problema. A través de una revisión bibliográfica exhaustiva, se recopila información relevante sobre la corrosión de láminas pintadas de acero galvanizado y el uso de técnicas analíticas como la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y la Espectrometría de Dispersión de Rayos X (EDS), se estudian los mecanismos de deterioro y se identifican los factores que contribuyen a la corrosión de estos materiales. El trabajo también incluye recomendaciones para futuras investigaciones, como realizar estudios con mayores tiempos de exposición y ensayos en condiciones ambientales simuladas más extremas, así como la posibilidad de utilizar la microscopía electroquímica de barrido para analizar el comportamiento micro-electroquímico de los recubrimientos. El estudio proporciona una base sólida para entender la corrosión en láminas pintadas de acero galvanizado y sugiere nuevas direcciones para la investigación en este campo.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. Co-Director: Hugo Armando Estupiñán Duran

Abstract

Title: Determination of the damage mechanism of carbon steel with different types of galvanizing and paint layers using the electrochemical impedance spectroscopy technique*

Author: Jharold Navarro Barón **

Keywords: Durability, Painted sheets, Corrosion resistance.

Description

Focuses on the analysis of corrosion resistance in galvanized and painted steel sheets, emphasizing the impact of polyester coating on their durability. Corrosion is a significant phenomenon that affects the longevity of metallic structures, and the use of appropriate coatings is crucial to mitigate this issue. Through a comprehensive literature review, relevant information on the corrosion of painted hot-dip galvanized sheets is gathered from reputable sources in the fields of metallurgy and coating engineering. The study employs advanced analytical techniques, such as scanning electron microscopy and electrochemical impedance spectroscopy, to evaluate the electrochemical behavior of the sheets under immersion in saline solution conditions. The results indicate that the analyzed sheets exhibit excellent corrosion resistance, with the blue sheet standing out due to its lower water absorption and electrochemical stability. This work not only contributes to academic knowledge in the field of materials engineering but also provides valuable data that can guide informed decisions in the industry. Furthermore, it suggests that all three types of sheets are viable for applications in coastal environments, promoting the development of innovative solutions within the Colombian industry and enhancing the capacity to respond to environmental challenges, the findings underscore the importance of selecting appropriate coatings to enhance the performance of galvanized steel in corrosive environments.

*

**

Introducción

En el ámbito de la ingeniería y la metalurgia, la resistencia a la corrosión es un factor crítico que determina la durabilidad y eficiencia de diversas aplicaciones industriales. En este contexto este trabajo de investigación se centra en el análisis de la resistencia a la corrosión de láminas de acero galvanizado y pintado, haciendo énfasis en el papel crucial que desempeña el recubrimiento de poliéster en este proceso.

El acero galvanizado ha demostrado ser un material altamente efectivo para prevenir la corrosión, gracias a su recubrimiento de zinc que actúa como barrera protectora. Sin embargo, la incorporación de pinturas a base de poliéster agrega un nivel adicional de protección, otorgando características específicas a este tipo de láminas. Este tipo de pintura no solo mejora la estética del material, sino que también contribuye de manera significativa a su resistencia frente a agentes corrosivos, aumentando su vida útil y desempeño en condiciones ambientales desafiantes.

Es fundamental destacar que las láminas galvanizadas y pintadas objeto de este estudio son producto de la innovación y la excelencia manufacturera de una empresa colombiana líder en la industria. La elección de este enfoque no solo responde a la necesidad de comprender las propiedades intrínsecas del material, sino también a promover y valorar el desarrollo local y la contribución de la industria nacional al avance tecnológico en el sector.

El propósito fundamental de este trabajo es adentrarse en la comprensión del impacto del recubrimiento de poliéster en la resistencia a la corrosión de las láminas de acero galvanizado. Para alcanzar este objetivo, se empleará la espectroscopia de impedancia electroquímica como principal herramienta de análisis. Esta técnica avanzada permitirá explorar, de manera precisa, los fenómenos electroquímicos que afectan la resistencia a la corrosión de los materiales en estudio.

El análisis de los resultados obtenidos mediante esta técnica proporcionará una visión detallada de los mecanismos subyacentes, facilitando así una comprensión más profunda de las interacciones entre el recubrimiento de poliéster y el acero galvanizado.

Además, se utilizarán técnicas complementarias como la microscopía electrónica de barrido y la espectroscopia de infrarrojo para caracterizar de manera integral los materiales. La microscopía electrónica de barrido permitirá examinar la morfología superficial de las láminas, mientras que la espectroscopia de infrarrojo proporcionará información valiosa sobre la composición química de los recubrimientos de poliéster, fortaleciendo así la comprensión de las propiedades fundamentales de estos materiales.

A medida que se avanza en esta investigación, se espera no solo contribuir al conocimiento académico en el ámbito de la ingeniería de materiales, sino también proporcionar datos sustanciales que puedan guiar decisiones informadas en la industria. Este enfoque multidisciplinario, combinando técnicas avanzadas de análisis, brinda una perspectiva integral sobre la resistencia a la corrosión de las láminas galvanizadas y pintadas, estableciendo las bases para futuros avances en la producción y aplicación de estos materiales en el contexto colombiano y más allá.

1. Descripción del trabajo de investigación

1.1 Planteamiento del problema

El acero galvanizado es sumamente importante para la industria porque es de gran utilidad en obras de ingeniería civil, siendo primordial para construir puentes y carreteras para el montaje de columnas, armaduras para cubiertas, señalización vial, barandas, entre otros que requiere acero estructural. De igual manera, es empleado para alambres, láminas, piezas fundidas, tornillos, tuberías, tuercas, incluso en plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales, como ocurre en barandillas, pasarelas y muchas otras estructuras. En el caso de la arquitectura se utiliza para fachadas, ventanas, rejas, canaletas y otros usos donde se construyen refuerzos de acero y barreras.

Adicionalmente se deben mencionar su uso en plantas industriales, en la fabricación de equipos originales como carcasas de motores, marcos de bobinas; también en insumos eléctricos para postes de distribución de energía y aerogeneradores, torres de transmisión, y subestaciones. El acero galvanizado es empleado en telecomunicaciones, transporte ferroviario, instalaciones químicas y petroquímicas, en espacios que son de recreación y muchos más.

Como se puede apreciar son múltiples los usos que tiene el acero galvanizado en diversos sectores como la construcción, la ingeniería civil, la industria, la infraestructura y en la mayoría de los medios de transporte, este último incluye la navegación que es sumamente necesario garantizar un material anticorrosivo para evitar daños catastróficos, por estar expuesto en ambientes marinos, por su gran nivel de salinidad y alcalinidad. El acero se caracteriza por ser un material versátil, el cual es considerado de gran resistencia y en ocasiones presenta propiedades de permeabilidad y ligereza en construcciones donde ha sido empleado.

La gran variedad de aplicaciones que tiene el acero galvanizado y el acero galvanizado pintado hace necesario que se mantenga actualizado el estado del conocimiento sobre el desempeño y los posibles daños que este tipo de materiales puede sufrir al estar en aplicación. Por lo tanto, se propone desarrollar esta investigación en la cual se hará uso de técnicas de caracterización fisicoquímica como lo son la microscopía electrónica de barrido, la espectroscopia de energía dispersiva de rayos x, la espectroscopia de infrarrojo y la espectroscopia de impedancia electroquímica con el fin de evaluar el desempeño de tres láminas de acero galvanizado pintado expuesto a un ambiente costero simulado.

La pintura aplicada a las láminas de acero galvanizado es una pintura de tipo poliéster modificada con óxido de silicio. Esta pintura es una propuesta desarrollada por una empresa colombiana con el objetivo de dar un mayor valor agregado a sus productos. Por lo tanto, existe un gran interés por el desarrollo de esta investigación, así mismo se fortalecerá la relación la Universidad – Empresa debido a la cooperación que se ira desarrollando durante este proyecto.

1.2 Hipótesis

Mediante el uso de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), se podrá determinar el mecanismo de daño de un acero al carbono galvanizado y pintado a diferentes tiempos de exposición en ambiente salino.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo General

Estudiar el mecanismo de daño de un acero al carbono con diferentes tipos de galvanizados y de capas de pinturas mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica.

1.3.2 Objetivos Específicos

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las láminas galvanizadas y pintadas mediante ensayos de SEM, EDS y espectroscopia de infrarrojo.

Evaluar el deterioro de diferentes laminas pintadas de acero galvanizado expuestas a un ambiente salino simulado, usando espectroscopia de impedancia electroquímica.

Identificar los posibles mecanismos de daño del material a diferentes tiempos de exposición en ambiente salino por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica y analizar la morfología de daño del material por medio de análisis de SEM.

2. Estado del arte

El acero al carbono es una aleación de hierro y carbono, con un contenido de carbono que varía entre 0.05% y 2.0%. Este material es ampliamente utilizado en la industria de la construcción, fabricación de maquinaria, estructuras metálicas, y herramientas, debido a su resistencia y maleabilidad (Wang, 2023). Sin embargo, el acero al carbono es susceptible a la corrosión, lo que puede comprometer su integridad estructural y durabilidad. La corrosión del acero al carbono es un proceso electroquímico que ocurre en presencia de oxígeno y la humedad, lo que resulta en la formación de óxidos de hierro no protectores. Por lo tanto, es crucial proteger el acero al carbono de la corrosión para garantizar su rendimiento y vida útil (Vera et al., 2012; Vera et al., 2019).

Una de las técnicas más comunes para proteger el acero al carbono de la corrosión es el galvanizado, que implica recubrir el acero con una capa de zinc. Este proceso se basa en la capacidad del zinc para actuar como ánodo sacrificio, protegiendo el acero al carbono subyacente de la corrosión (Gui & Long, 2020; Sere et al., 2018; Suarez et al., 2014). El galvanizado puede llevarse a cabo mediante inmersión en caliente o electrodeposición, y proporciona una protección efectiva contra la corrosión en ambientes agresivos, como la exposición al aire libre y la inmersión en agua (Hernandez et al., 2017; Nakhaie et al., 2020). Los aceros galvanizados son ampliamente utilizados en la fabricación de estructuras metálicas, techos, postes de cercas, y carrocerías de automóviles debido a su durabilidad y resistencia a la corrosión (Alweendo et al., 2021).

En los últimos años, se han llevado a cabo numerosos estudios para comprender el mecanismo de corrosión de láminas pintadas de acero galvanizado. Por ejemplo, Vera et al. (2019) realizaron un estudio sobre el efecto de la corrosión atmosférica en las propiedades mecánicas del acero galvanizado, lo que contribuyó a la comprensión de las aplicaciones de modelos predictivos

para las propiedades mecánicas en relación con la velocidad de corrosión (Yasakau et al., 2016). Además, Wang et al. (2022) investigaron el comportamiento de degradación de las propiedades mecánicas del acero galvanizado expuesto a ambientes de viento y arena, proporcionando una valiosa referencia para el comportamiento de corrosión y las medidas de protección del acero galvanizado en entornos desafiantes (Wang et al., 2022).

Asimismo, Xiong et al. (2021) investigaron el comportamiento frente a la corrosión del acero galvanizado en concreto con vegetación en entornos marinos, presentando datos de impedancia electroquímica mediante los cuales analizaron el efecto de diferentes concentraciones de cloruro en el desarrollo de la vida útil del material (Xiong et al., 2021).

A pesar de la protección proporcionada por el galvanizado, el acero galvanizado aún puede verse afectado por la corrosión en ciertos entornos, como ambientes altamente corrosivos o exposición a productos químicos agresivos. Para abordar esta limitación, se recurre a la aplicación de pinturas sobre el acero galvanizado. Estas pinturas actúan como una barrera física que protege el acero galvanizado de la exposición directa a agentes corrosivos, extendiendo aún más su vida útil y manteniendo su apariencia estética. Los aceros galvanizados y pintados son ampliamente utilizados en la industria de la construcción, fabricación de estructuras metálicas, y aplicaciones arquitectónicas debido a su resistencia a la corrosión y versatilidad estética (Liu et al., 2019; Vera et al., 2019; Xiong et al., 2021).

Diferentes estudios han demostrado que la corrosión del acero galvanizado y pintado está influenciada por factores como la composición del recubrimiento, la exposición ambiental, y la interacción entre el recubrimiento y el sustrato metálico. La degradación de las propiedades mecánicas del acero galvanizado expuesto a ambientes agresivos ha sido investigada mediante técnicas como microscopía electrónica de barrido y pruebas de tracción, lo que ha permitido

comprender los cambios microestructurales y mecánicos asociados con la corrosión (Carrasquero et al., 2019; Wang et al., 2022).

Para comprender los parámetros que afectan al acero galvanizado y pintado, es crucial considerar la influencia de factores ambientales, recubrimientos protectores y la composición del material. La corrosión atmosférica, la presencia de recubrimientos de pintura y la composición química de los recubrimientos son aspectos relevantes para considerar (Hernández, 2018; Jiménez-Salas et al., 2022; Guilcaso et al., 2021).

El efecto de cloruros y sulfatos en la corrosión de láminas de acero galvanizado pintado ha sido objeto de estudio. La presencia de cloruros puede facilitar el ataque localizado y la formación de picaduras, mientras que la interacción entre iones sulfato y cloruro puede atenuar la acción del sulfato (Martín et al., 2008; Vera et al., 2013).

La exposición a la humedad y al sol también influye en la corrosión de las láminas de acero galvanizado pintado. La alta humedad relativa actúa como electrolito en el proceso electroquímico, especialmente cuando se combina con contaminantes ambientales como los sulfatos y los cloruros, además, la exposición a la radiación solar puede afectar la degradación de los recubrimientos (Cha et al., 2023; Jiménez-Salas et al., 2022).

Los procesos de hinchamiento y rompimiento de las capas pintadas son aspectos críticos en la resistencia a la corrosión de las láminas pintadas de acero galvanizado. La formación de una capa aislante que impide la propagación del calor, conocida como "intumescencia", es un mecanismo de protección relevante (Chico et al., 2005).

Tras la ruptura de la barrera de pintura, la capa de galvanizado sufre daños significativos. La exposición del acero galvanizado al ambiente corrosivo después de la ruptura de la barrera de pintura puede acelerar el proceso de corrosión (Pesantez et al., 2019; Scheiber et al., 2015).

Diferentes técnicas de estudio, como la espectroscopia de impedancia electroquímica, se han empleado para analizar la resistencia a la corrosión de láminas galvanizadas y pintadas. Estas técnicas han permitido evaluar el deterioro del galvanizado y la eficacia de los recubrimientos protectores (Peña-Ballesteros et al., 2015; Arnau et al., 1998).

En investigaciones recientes, se ha empleado la espectroscopia de impedancia electroquímica para analizar la resistencia a la corrosión de láminas de acero galvanizado pintado. Estos estudios han revelado el comportamiento electroquímico del acero galvanizado pintado expuesto a diferentes medios corrosivos (Peña-Ballesteros et al., 2015; Peña-Ballesteros, 2016).

En resumen, la comprensión de los parámetros que afectan al acero galvanizado pintado es crucial para desarrollar estrategias efectivas de protección contra la corrosión. La interacción entre factores ambientales, recubrimientos protectores y la composición del material influye significativamente en el mecanismo de corrosión de las láminas de acero galvanizado pintado.

Estos estudios han contribuido significativamente a la comprensión del mecanismo de corrosión de láminas de acero galvanizado y pintado, proporcionando información valiosa sobre la resistencia a la corrosión, el comportamiento mecánico y la eficacia de los recubrimientos protectores. Además, han utilizado técnicas avanzadas de caracterización y diseño experimental para obtener datos detallados sobre la degradación y protección del acero galvanizado y pintado en una variedad de entornos y condiciones de aplicación.

3. Metodología Experimental

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se siguió la metodología descrita a continuación:

3.1 Revisión bibliográfica.

Se realizará una revisión bibliográfica sobre la corrosión de láminas pintadas de acero galvanizado en caliente, esto implica un proceso sistemático de búsqueda y análisis de información relevante y actualizada en el campo.

En primer lugar, se realizará una búsqueda exhaustiva en editoriales de gran prestigio como lo son Elsevier, Springer, Hindaway entre otras. Estas plataformas albergan una amplia gama de artículos científicos, revisiones y estudios pertinentes a nuestro tema de interés.

Además, se dará prioridad a revistas indexadas de renombre en el área de la metalurgia, la corrosión y la ingeniería de recubrimientos, tales como Corrosion Science, Journal of Coatings Technology and Research, Surface and Coatings Technology, entre otras, con el fin de acceder a investigaciones especializadas y de alta calidad.

La búsqueda se realizará utilizando términos clave relacionados con la corrosión, protección de superficies, acero galvanizado, pinturas industriales, entre otros, combinados de manera estratégica para obtener resultados relevantes y específicos.

El análisis crítico de la literatura obtenida se llevó a cabo para identificar tendencias, enfoques de investigación, métodos experimentales, hallazgos relevantes y posibles lagunas en el

conocimiento existente. Esto permitió fundamentar de manera sólida y actualizada este trabajo de investigación sobre la corrosión de láminas pintadas de acero galvanizado en caliente.

3.2 Materiales y reactivos.

Láminas pintadas de acero galvanizado fueron proporcionadas a modo de donación por una empresa colombiana. Los reactivos químicos usados en esta investigación fueron proporcionados por el Grupo de Investigaciones en Corrosión GIC, los reactivos fueron cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl), estos productos son de calidad Sigma Aldrich. Adicionalmente se empleó cinta de protección frente a la corrosión de vinilo Scotchrap™ 50 de 3M™, fue adquirida comercialmente.

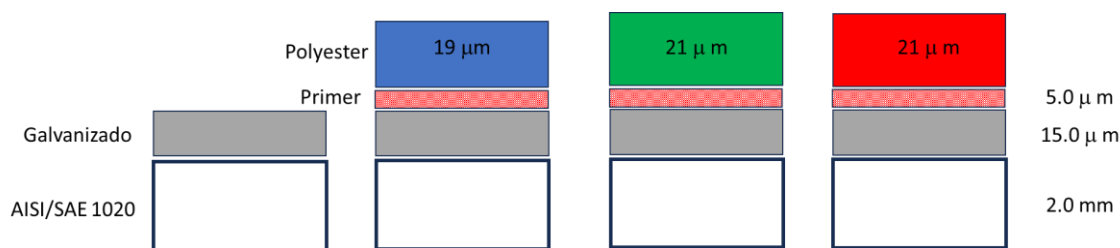
3.3 Preparación de las muestras

Las láminas pintadas de acero galvanizado que se emplearon en este estudio están compuestas por una lámina de acero AISI/SAE 1020 con 2.0 mm de espesor (Ver composición en la Tabla 1), una capa de galvanizado de 15 μm de espesor (ASTM A123/A123M-15) y una capa de pintura de polyester modificada con óxido de silicio SiO_2 . En la Figura 1 se pueden observar los espesores de las diferentes capas de las láminas que se evaluarán en esta investigación.

Tabla 1.*Composición química del acero AISI/SAE 1020*.*

Elements	Fe	C	Si	Mn	S	Ni	Cu
wt. %	97.160	0.104	0.029	0.287	<0.150	0.316	1.050

*La composición química del acero fue proporcionada por el proveedor. Para la obtención de la composición se siguieron los lineamientos de la norma ASTM E415-15.

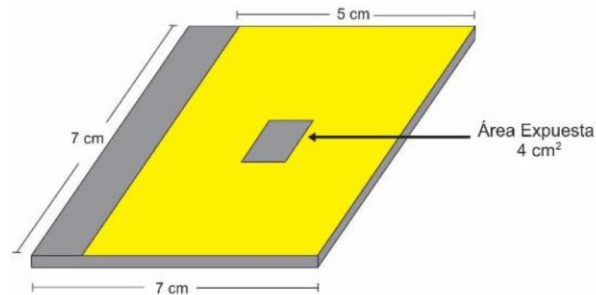
Figura 1.*Esquema de las láminas pintadas de acero galvanizado.*

Las láminas de cada material se cortaron en medidas de 7.0 cm x 7.0 cm. Posteriormente, las láminas de acero galvanizado fueron previamente sometidas a un proceso de limpieza el cual se fundamentó en los lineamientos expuestos en la norma ASTM G1-03. Esta limpieza fue necesaria para eliminar cualquier rastro de suciedad o impurezas presentes en las superficies del material. En este mismo sentido, las láminas pintadas de acero galvanizado se limpiaron con agua destilada y se secaron con aire cálido. Finalmente, se aplicó la cinta Scotchrap de 3M™ sobre cada una de las muestras, la cinta cubre un área de 5.0 cm x 7.0 cm sobre la cada lámina dejando un orificio cuadrado ubicado en el centro, con el objetivo de crear un área expuesta de 4 cm² para tener control sobre el área de estudio (Ver Figura 2).

Figura 2.

Esquema de las muestras preparadas a partir de las láminas pintadas de acero galvanizado.

Tomado y modificado de (Cabrales Villamizar, 2016).

**3.4 Diseño de experimentos**

Para llevar a cabo este estudio se tuvieron en cuenta dos variables, la composición de las pinturas y el tiempo de exposición. En la Tabla 2 se presentan los diferentes ensayos que se realizaron.

Tabla 2.

Diseño experimental de los ensayos de corrosión

Muestra	Tiempo (días)						
	0	1	5	12	15	21	30
Acero Galvanizado	x	x	x	x	x	x	x
AG Azul	x	x	x	x	x	x	x
AG Verde	x	x	x	x	x	x	x
AG Rojo	x	x	x	x	x	x	x

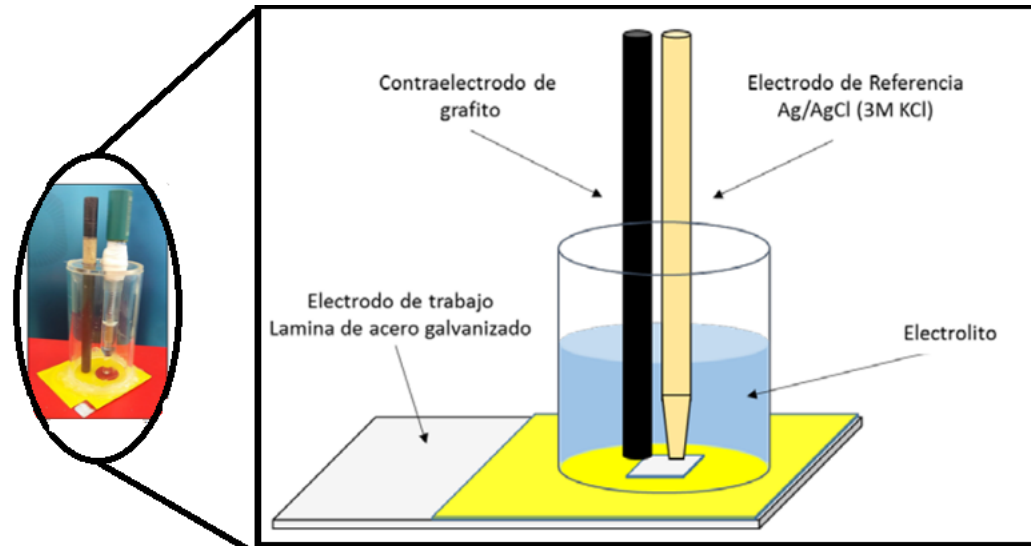
3.5 Evaluación electroquímica

Los ensayos de inmersión fueron llevados a cabo siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G31-21. Por otra parte, para los ensayos electroquímicos se empleó una celda plana compuesta por tres electrodos. La celda consta de un cilindro acrílico con un diámetro interno de 4,4 mm y un espesor de pared de 5,0 mm, la altura del cilindro es de 10 cm. Este cilindro se adhiere a los materiales de estudio (electrodos de trabajo) mediante silicona líquida. En la parte superior del cilindro se encuentran dos orificios por donde se introducen una barra de grafito de alta pureza que funciona como contra electrodo y un electrodo de Ag/AgCl (3M KCl) que sirve de electrodo de referencia. El montaje de la celda se puede apreciar en la Figura 3.

Se utiliza espectroscopia de impedancia electroquímica con el fin de conocer el desempeño de estos materiales frente a un ambiente corrosivo (NaCl 3% p/v). Para esto, mediante un potenciostato Gamry 600 se hizo un barrido de frecuencias entre 1.0 y 100.0 kHz. Se registran 7 puntos por década y se aplica un potencial de perturbación de 10 mV_{rms} versus el potencial de circuito abierto. Para evitar que los datos registrados puedan verse alterados por fuentes electromagnéticas o corrientes parasitas la celda electroquímica fue introducida en una jaula de Faraday. Todos los ensayos electroquímicos se desarrollaron por duplicado, a temperatura ambiente (25 °C).

Figura 3.

Esquema de la celda electroquímica empleada. Tomado y modificado de [Sandoval-Amador et al., 2017].



A partir de los datos de espectroscopia de impedancia electroquímica se pueden obtener parámetros como la capacitancia del recubrimiento, y así se puede calcular la cantidad de agua absorbida, así como el factor de pérdida. Estos parámetros son fundamentales para definir cuál es el mejor recubrimiento.

La capacitancia del recubrimiento se obtiene mediante la ecuación (1)

$$C_c = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \cdot |Z|_{10kHz}} \quad (1)$$

Donde C_c es la capacitancia que posee el recubrimiento $F \cdot cm^2$, $|Z|$ es el módulo de la impedancia a una frecuencia de 10kHz.

La fracción de agua absorbida se puede obtener mediante la ecuación (2)

$$x_v = \frac{\log \frac{C_c}{C_0}}{\log E_\omega} \quad (2)$$

Donde C_c valor de la capacitancia en un tiempo determinado, C_0 valor de la capacitancia en un tiempo cero y E_ω permisividad eléctrica del agua (aproximadamente 80).

El factor de pérdida representa el deterioro del recubrimiento, es un parámetro obtenido a una frecuencia de 1 kHz. Se calcula mediante la ecuación (3)

$$\text{Factor de perdida} = \tan \alpha \quad (3)$$

Con $\alpha = 90 - \theta$, y $\alpha =$ Ángulo complementario al ángulo de fase θ a una frecuencia de 1kHz.

3.6 Caracterización de las muestras

Las láminas pintadas de acero galvanizado se llevaron al Laboratorio de Espectroscopia de la Universidad Industrial de Santander, para analizar el espectro infrarrojo de las mismas. El espectro infrarrojo por transformada de Fourier fue obtenido por la técnica método de reflexión total atenuada ATR en el espectrometro Nicolet iS50 de Thermo Fisher Scientific. Los espectros fueron analizados en términos de transmitancia en un rango de longitudes de onda de 400 a 4000 cm^{-1} usando una resolución de 4 cm^{-1} y una velocidad óptica de 0,1581 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. este análisis fue usado para determinar las bandas de absorción de los grupos funcionales orgánicos de las superficies.

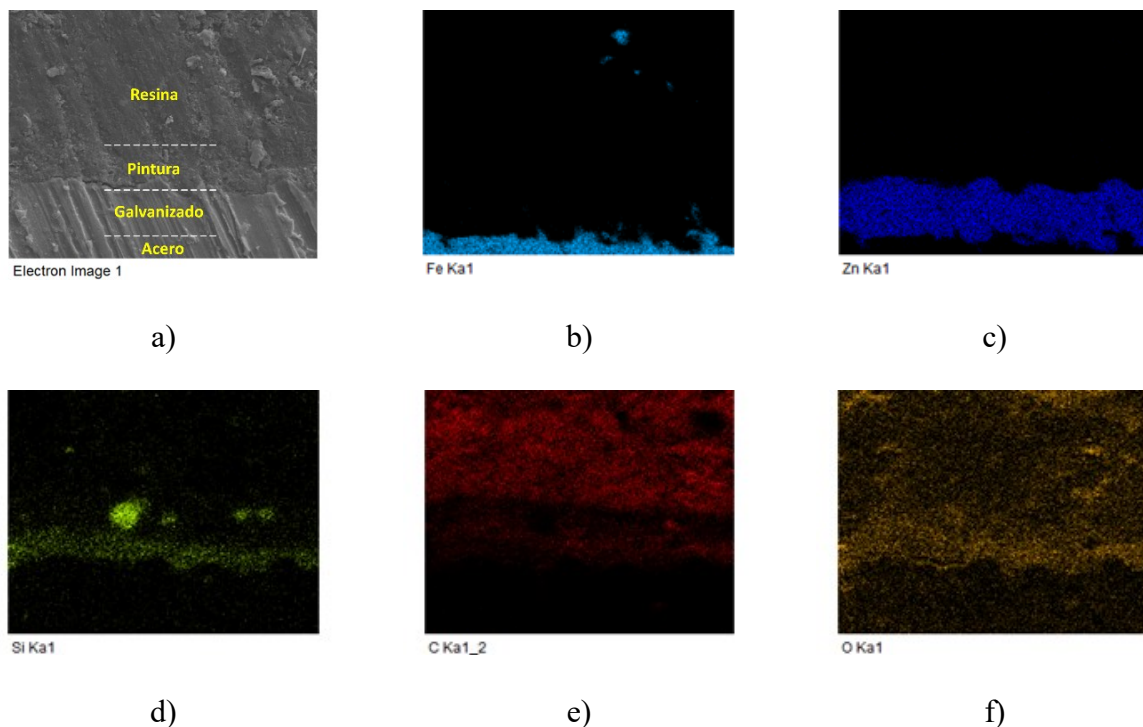
Adicionalmente se empleó Microscopia electrónica de barrido (SEM) y Espectrometría de dispersión de rayos X (EDS) para analizar las muestras que tienen el recubrimiento polimérico. Para ello las muestras se colocaron sobre soportes metálicos con cinta adhesiva de carbón, las superficies fueron recubiertas con una capa delgada de oro con el fin de mejorar su conductividad eléctrica, esto permite obtener mejores imágenes de la superficie. Para analizar las muestras se empleó un microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650.

4. Resultados y Discusión

En la Figura 4 se presenta una micrografía de la sección transversal de una de las láminas pintadas de acero galvanizado empleadas en este estudio. Como se puede observar, es posible diferenciar el sustrato de acero, por su composición en hierro (Figura 4b). Además, se observa la presencia de zinc, lo cual es una evidencia de la presencia de la capa de galvanizado sobre el sustrato de acero (Figura 4c). Finalmente, en las Figuras 4d, Figura 4e y Figura 4f se observa la presencia de silicio, carbono y oxígeno respectivamente, estos elementos corresponden a los principales componentes de la capa de pintura anticorrosiva que conforman la última capa del material de estudio. Así mismo el carbono y el oxígeno están presentes en la zona de la resina en la que se encapsuló la muestra analizada.

Figura 4.

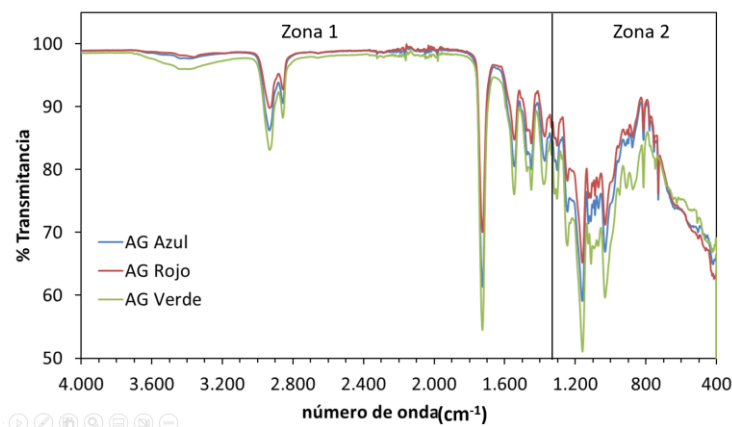
Micrografía SEM-EDS de una lámina pintada de acero galvanizado.



Estos resultados concuerdan con lo reportado previamente por Paez Perez & Roa Monsalve en 2017. Quienes en su trabajo reportaron micrografías de la sección transversal de sus láminas con zonas bien definidas en su composición química. Este es un resultado de gran interés ya que proporciona información sobre posibles defectos presentes en la superficie o alteraciones en la composición de los materiales proporcionados. Por otra parte, los resultados obtenidos tras analizar la composición de las superficies pintadas de acero galvanizado mediante espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS) mostraron que la principal diferencia en la composición de las pinturas radica en la presencia de silicio (Ver Anexo 1). Este elemento está presente en un porcentaje en peso de 1.38% en las láminas de color rojo, 1.77% en las láminas de color verde y 2% en las láminas de color azul. La presencia de este elemento está asociada a la inclusión de óxido de silicio en las pinturas como un agente que podría mejorar el desempeño de las pinturas. Los picos detectados en los espectros infrarrojos de las superficies de acero galvanizado pintado se pueden observar en la Figura 5, estos picos aparecieron en el rango de $700 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ de forma similar a lo reportado previamente por Lestido-Cardama et al., 2022. Así mismo, estos espectros muestran dos zonas claramente definidas. La primera zona comprendida entre 4000 y 1300 cm^{-1} y, una segunda zona comprendida entre 1300 y 800 cm^{-1} estas dos zonas igualmente se pudieron observar en el trabajo de Melgarejo y Bolaño en 2019.

Figura 5.

Espectros Infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) obtenidos de las superficies pintadas de acero galvanizado.



En la zona 1 se identificó una banda entre 1378 y 1546 cm^{-1} correspondía al anillo aromático. El pico a 1715 cm^{-1} se asignó al grupo éster. a 1735 cm^{-1} se muestra la vibración $\text{C}=\text{O}$ lo cual indica la presencia de un grupo funcional éster RCOOR siendo R un grupo saturado y alifático como el metileno lo que corrobora la presencia de pinturas de tipo poliéster Paez Perez & Roa Monsalve en 2017.

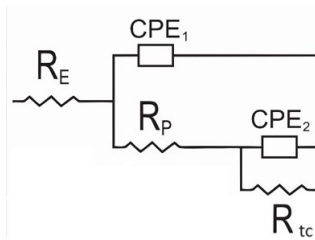
Por otra parte, en la zona 2 se observa el pico a 1293 cm^{-1} que representa la presencia del éster carboxílico o anhídrido, el pico a 1021 cm^{-1} indica la presencia de $\text{O}=\text{C}-\text{O}-\text{C}$ o alcohol secundario. El pico a 967 cm^{-1} corresponde al estiramiento $\text{C}=\text{C}$, mientras que el pico a 869 cm^{-1} muestra cinco sustituyentes H en benceno. Además, se detectaron los dos picos característicos principales de los modos de vibración de los enlaces $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ alrededor de 845 y 1094 cm^{-1} , que se atribuyen a la banda de vibración de flexión $\text{Si}-\text{O}$ y la banda de vibración de estiramiento asimétrico $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$, respectivamente, lo cual corrobora la presencia de silicio en las pinturas de poliéster (Bhattacharya S. et al, 2014).

Ahora que se conoce el estado inicial del material de estudio se procede a proponer un modelo de circuito equivalente que representará el sistema electroquímico láminas pintadas de acero galvanizado - electrolito (Ver Figura 6). Este circuito permitirá analizar los diferentes espectros de impedancia que se midieron durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Es fundamental realizar el ajuste de los espectros de impedancia al modelo de circuito equivalente con el fin de cuantificar el desempeño del material. Así mismo, esto permite calcular los parámetros de capacitancia del recubrimiento, absorción de agua y el factor de pérdida. Estos parámetros permiten determinar de una forma más precisa cual es el mejor recubrimiento. El ajuste de los espectros de impedancia al modelo de circuito equivalente se realizó mediante los programas Zplot y Zview.

Figura 6.

Modelo de circuito equivalente empleado para ajustar los espectros de impedancia obtenidos a diferentes tiempos de exposición.



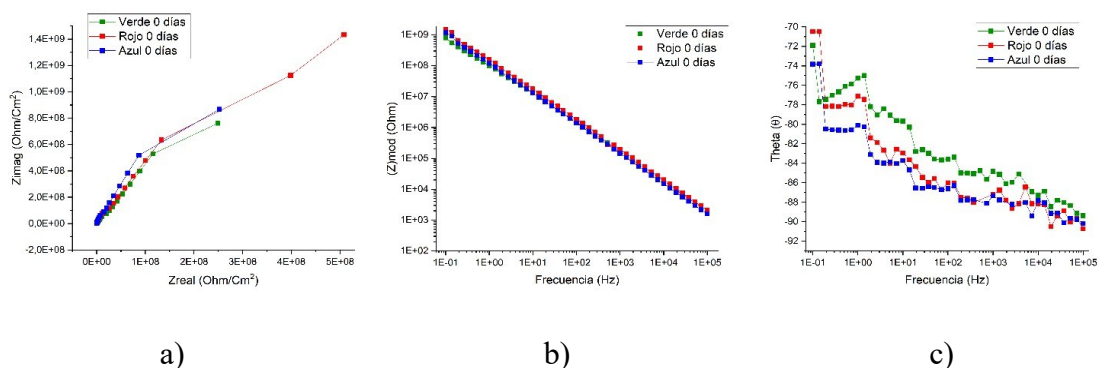
En la Figura 7 se presenta el espectro de impedancia electroquímica obtenido para las láminas pintadas de acero galvanizado. Este espectro corresponde al análisis realizado a las muestras tras una hora de exposición al electrolito de NaCl, es decir cero días de exposición. Los datos correspondientes a los demás tiempos de exposición se pueden observar en el Anexo 2. El

espectro de la Figura 7 muestra un comportamiento típico para sistemas de láminas pintadas de acero galvanizado expuesto a medios corrosivos a diferentes tiempos (Paez Perez & Roa Monsalve en 2017; Melgarejo y Bolaño en 2019; del Amo et al., 2004).

Los arcos de circunferencia que se pueden observar en el diagrama de Nyquist de la Figura 7a, indican que las superficies pintadas de acero galvanizado efectivamente se desempeñan como una barrera que protege el sustrato de acero al carbono. Este tipo de comportamiento se asocia a procesos principalmente capacitivos en la interfase pintura electrolito (Bouvet, G., et al 2014). Por su parte, la Figura 7b muestra comportamientos lineales con pendiente negativa, esto suele interpretarse como un comportamiento principalmente capacitivo, además, al analizar valores de impedancia a bajas frecuencias (0.1 Hz) se observa que las láminas pintadas de acero galvanizado reportan valores de 1.014×10^9 Ohm/cm² (verde), 1.521×10^9 Ohm/cm² (rojo) y 1.175×10^9 Ohm/cm² (azul). Así mismo, al analizar los valores del ángulo de fase reportados en la Figura 7c se encuentra que las superficies pintadas se comportan de forma capacitiva, dado que el ángulo de fase es mayor a 70° (Vosgien, C., et al., 2017; Olaya-Flores J., 2012)). Estos resultados indican un buen comportamiento frente a la corrosión.

Figura 7.

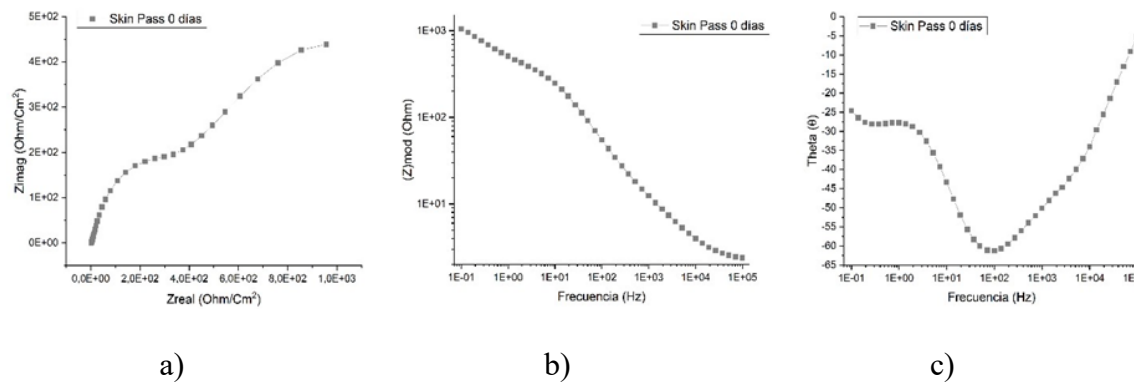
Espectro de impedancia electroquímica obtenido para las lamias pintadas de acero galvanizado a cero días de exposición. a) Diagrama de Nyquist, b) Diagrama de Bode $|Z|$ vs $\text{Log}(f)$, y c) Diagrama de Bode θ vs $\text{Log}(f)$.



Por otra parte, en la Figura 8 se presenta el espectro de impedancia electroquímica obtenido para el sustrato de acero galvanizado, este espectro de impedancia es un espectro típico de aceros galvanizados expuestos a medios salinos (Peña-Ballesteros et al., 2015; Meng Y. et al., 2019). Este espectro indica que el material tiene un comportamiento principalmente resistivo en la interfaz electrolito/galvanizado, lo cual está asociado al inicio de la disolución de la película de zinc (Huttunen-Saarivirta E., et al 2011)), la tendencia presente en la curva del diagrama de Nyquist (Figura 8a) se asocia a procesos de transferencia de carga entre el sustrato metálico y difusión del electrolito sobre el galvanizado (Peña-Ballesteros et al., 2015).

Figura 8.

Espectro de impedancia electroquímica obtenido para las láminas de acero galvanizado a cero días de exposición. a) Diagrama de Nyquist, b) Diagrama de Bode $|Z|$ vs $\text{Log}(f)$, y c) Diagrama de Bode θ vs $\text{Log}(f)$.



Lo espectros de impedancia electroquímica obtenidos a los diferentes tiempos de exposición correspondientes a las muestras de acero galvanizado se presentan en el Anexo 2. No se hace necesario mostrarlos en esta sección debido a que el comportamiento que describen las curvas de estos espectros es similar a los presentados en la Figura 8.

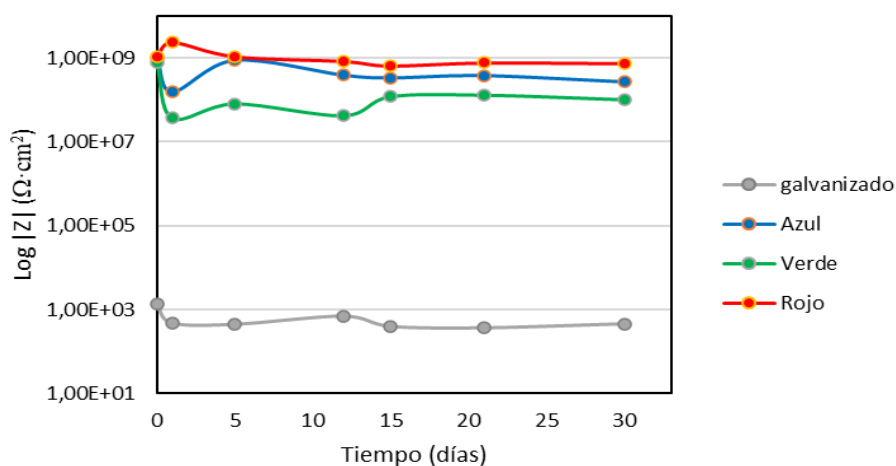
A continuación, se presenta la información del conjunto completo de datos obtenidos a partir de los espectros de impedancia de todas las láminas evaluadas con el objetivo de cuantificar y describir de una mejor forma el desempeño de las láminas pintadas de acero galvanizado.

La Figura 9 muestra la variación de la magnitud de la impedancia $|Z|$ en función del tiempo de exposición al electrolito. Como se puede observar, la aplicación de la pintura genera un efecto de barrera que logra incrementar la impedancia del acero galvanizado aproximadamente en 6 órdenes de magnitud. Adicionalmente se puede observar que las láminas de color Rojo presentan mayores valores de impedancia en cada uno de los tiempos de exposición analizados. En segundo lugar, de los valores de impedancia lo presentaron las láminas de color azul y finalmente están las

láminas de color verde. Estos resultados no muestran una clara relación con la concentración de silicio presente en la composición química de las láminas pintadas (Concentración de silicio %p: AG Rojo 1.38, AG Verde 1.77 y Ag Azul 2%). De modo que, la variación en la impedancia de las láminas de color rojo se debe a otros factores que no se puede explicar actualmente al no contar con todos los detalles técnicos de las pinturas aplicadas y de los métodos empleados para su aplicación y curado. Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede afirmar que los tres tipos de pintura cumplen satisfactoriamente su rol de capas barrera, por lo que ofrecen una buena protección frente a la corrosión al acero galvanizado.

Figura 9.

Variación temporal del módulo de impedancia.

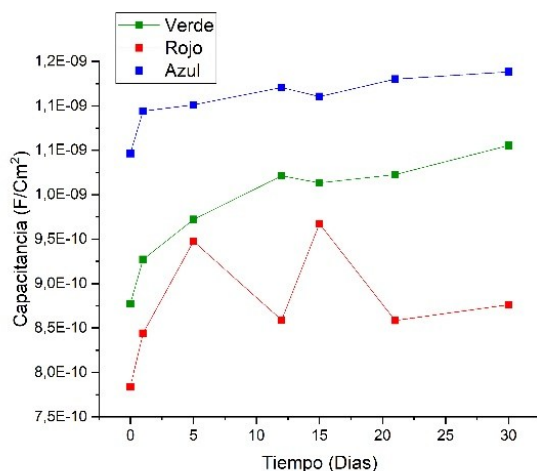


Así mismo, al analizar los datos obtenidos para el acero galvanizado se puede apreciar que este presentó una disminución en la magnitud de la impedancia a lo largo de los 30 días de exposición, pasando de 1.33×10^3 a 4.52×10^2 Ohm/cm². Este cambio no representó un deterioro significativo del acero galvanizado debido a la protección que otorga el zinc al material base.

La Figura 10 muestra un rápido incremento en la capacitancia de las láminas pintadas de acero galvanizado con tan solo 1 día de inmersión. Sin embargo, este comportamiento es diferente para cada uno de los sistemas analizados. La lámina pintada de color azul muestra un comportamiento casi lineal en el incremento de la capacitancia entre el día 1 y 30 de inmersión. Por otra parte, las láminas de color verde muestran un incremento en la capacitancia que se podría ajustar a una tendencia polinomial de grado dos. Donde la mayor pendiente está en los primeros 12 días del ensayo de inmersión. Finalmente, el comportamiento más complejo es el mostrado por las láminas de color rojo, ya que no hay una tendencia clara en el incremento de la capacitancia con el tiempo de inmersión.

Figura 10.

Capacitancia de las láminas pintadas de acero galvanizado)

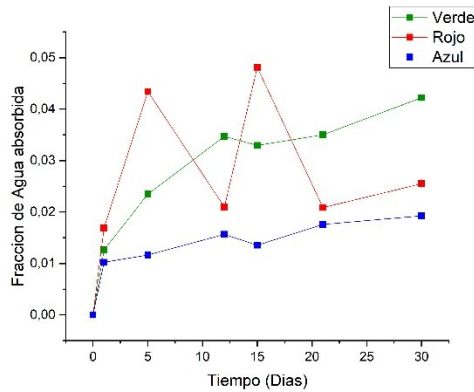


Continuando con la interpretación de la información proporcionada por los espectros de impedancia electroquímica se analiza ahora el porcentaje de agua absorbida por las superficies pintadas de acero galvanizado (ver Figura 11a). Se puede observar un rápido aumento de absorción

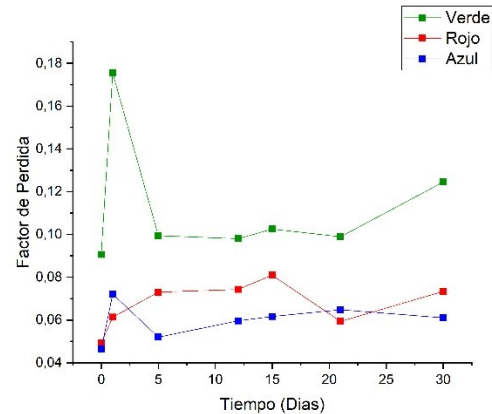
de agua en los primeros días por parte de las tres superficies pintadas lo cual está asociado al incremento de la permitividad aparente de todo el sistema y que a su vez está relacionado con los datos reportados en la Figura 10. Esto sugiere que hubo una difusión de agua en las capas de pintura. Esta agua absorbida reacciona con la capa de galvanizado permitiendo así la formación de productos de corrosión que estabilizan las superficies y en el caso de las láminas de color verde y azul se observa que tras 12 días de ensayo se ralentiza la absorción de agua, por lo que se podría decir que a este tiempo estas superficies logran saturarse. En relación con el comportamiento mostrado por las láminas de color rojo se puede observar que hay proceso de absorción y desorción de agua por la superficie pintada, esto posiblemente se deba a que el agua absorbida inicialmente reacciona con la capa de zinc formando productos de corrosión que facilitan la saturación del proceso de absorción de agua, y que tras disolverse permiten nuevamente que la absorción de agua tenga lugar. Cabe resaltar que la lámina roja presenta este fenómeno 3 días más tarde, pero se puede observar que junto con la lámina azul presentan menor absorción de agua tras los 30 días que duro el ensayo, por lo que estas dos láminas muestran un mejor desempeño.

Figura 11.

a) *Fracción de agua y b) factor de perdida.*



a)



b)

Finalmente, en la Figura 11b se presentan los valores calculados del factor de pérdida. Cabe destacar que un recubrimiento óptimo debe presentar un factor de pérdida igual a 0, por lo que los resultados reportados aquí indican que las láminas pintadas de acero galvanizado analizadas en este trabajo de investigación presentan un buen comportamiento electroquímico frente a su exposición a un ambiente salino. Como se puede observar en las curvas de la Figura 11b se aprecia el aumento en el factor de pérdida lo cual está relacionado con un deterioro en los recubrimientos durante los primeros días. Se pudo observar que las pinturas de tonalidades roja y azul exhibieron un desempeño superior a lo largo de cada uno de los tiempos de ensayo, lo cual es atribuible a una menor filtración de agua en sus superficies en comparación con la pintura verde. No obstante, es importante señalar que todos los recubrimientos exhibieron valores comprendidos entre 0.04 y 0.18.

5. Conclusiones

En este trabajo se analizó la resistencia a la corrosión de tres láminas pintadas de acero galvanizado. Para ello se realizaron ensayos de corrosión donde se tuvo como variable principal el tiempo de inmersión en solución salina. Se evaluó el comportamiento de las láminas mediante espectroscopía de impedancia electroquímica. Cabe resaltar que estas láminas fue un producto innovador desarrollado por una empresa colombiana ampliamente conocida. De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

El análisis de la variación del módulo de la impedancia con el tiempo de inmersión mostró que las tres láminas pintadas presentan un excelente comportamiento frente a la corrosión en medio salino. Adicionalmente es de resaltar que el acero galvanizado no sufrió daños significativos en su estructura tras los 30 días de inmersión, lo que indica también que el proceso de galvanizado es bastante consistente y durable.

Los datos calculados a partir de los espectros de impedancia permitieron cuantificar de una forma más precisa el desempeño de las tres láminas analizadas. Con base en estos cálculos se encontró que la lámina de color azul es la que presenta el mejor desempeño bajo las condiciones de estudio. Esto se debe a que su superficie es la que presentó una menor absorción de agua, lo cual está directamente relacionado con la estabilidad que mostró en su impedancia y capacitancia total, así mismo, esta superficie presentó la menor tendencia en los valores del factor de pérdida a lo largo de cada uno de los tiempos de ensayo.

Teniendo en cuenta los datos de factor de pérdida obtenidos en este estudio se puede indicar que los tres tipos de láminas analizadas son materiales viables para fabricar estructuras que sean expuestas a ambientes costeros o con alto grado de salinidad.

Finalmente, se debe mencionar que para lograr proponer el mecanismo de daño de las láminas pintadas de acero galvanizado es necesario de un estudio a mayor tiempo de exposición así como la implementación de otras técnicas de caracterización complementaria que permitan comprender de una forma más precisa aspectos fundamentales relacionados con el deterioro de este tipo de materiales como son: el inicio de procesos de hinchamiento de las capas de pintura, la adhesión de la pintura, el efecto que tiene la presencia de defectos en la pintura, degradación del polímero por exposición a la radiación UV entre otros.

6. Recomendaciones

Tras culminar este trabajo de investigación me permito proponer las siguientes recomendaciones:

Realizar estudios a mayores tiempos de exposición, esto permitirá poder comprender mejor el momento en el que se forman defectos en la superficie de la pintura que logran generar un daño significativo al sustrato metálico.

Con el fin de comprender mejor el mecanismo de deterioro de la capa de pintura se recomienda llevar a cabo ensayos en cámara salina y en cámara “weather” para analizar el desempeño de este tipo de láminas en condiciones de ambientes simulados más extremos y próximos a la realidad en la que estos materiales son empleados.

Finalmente, considero que se puede iniciar una nueva línea de investigación en la que se haga uso de la microscopia electroquímica de barrido SECM para el comportamiento micro-electroquímico de la superficie de este tipo de recubrimientos.

Referencias Bibliográficas

- Alweendo, S., Morita, M., Hasegawa, K., & Motoda, S. (2021). Fatigue properties of hot-dip galvanized aisi 1020 normalized steel in tension–compression and tension–tension loading. *Materials*, 14(23), 7480. <https://doi.org/10.3390/ma14237480>
- Arnau, G., Giménez, E., Rubio, M., Saura, J., & Suay, J. (1998). Resistencia a la corrosión atmosférica del recubrimiento zn-10,2% fe sobre chapa de acero. comparación con el recubrimiento de zinc. *Revista De Metalurgia*, 34(Extra), 52-56. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.iextra.707>
- ASTM A123/A123M-15 Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products, ASTM Int. (2017) [https://doi: 10.1520/A0123_A0123M-15](https://doi.org/10.1520/A0123_A0123M-15)
- ASTM E415-15 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry, ASTM Int. (2017) [https://doi: 10.1520/E0415-15](https://doi.org/10.1520/E0415-15)
- ASTM G1-03 (2017)e1 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens ASTM Int. <https://doi.org/10.1520/G0001-03R17E01>
- ASTM G31-21 Standar guide for laboratory immersion corrosions testing of metals. ASTM Int. <https://doi.org/10.1520/G0031-21>
- Bhattacharya, S.S., Chaundhari, S. B. (2014) Study on structural, mechanical and functional properties of polyester silica nanocomposite fabric. *Int. J. Pure Appl. Sci.- Tech.* 21(1) p. 43-52.
- Bouvet G Nguyen D Mallarino S Touzan S. (2014). Anaysis of the non-ideal capacitive behavior for high impedance organic coatings. *Progress in Organic Coatings.* 77, p. 2045-5253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.02.008>

- Cabrales Villamizar P.A., (2016). Evaluación de la capa protectora de un acero galvanizado con diferentes espesores en una solución de cloruros y sulfatos. (Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander).
- Cha, E., Jeon, D., Kang, D., Kim, Y., & Kim, S. (2023). Neumonitis química por inhalación de humos de óxido de zinc en un soldador de arco. *Kompass Neumología*, 5(1), 33-37. <https://doi.org/10.1159/000528666>
- Carrasquero, E., Yraima-Rico, O., Minchala, J. (2019). Evaluación de propiedades mecánicas en recubrimientos galvanizados por doble inmersión en caliente sobre acero al carbono. *Ingenius*, (22), 80-89. <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.08>
- Chico, B., López-Delgado, A., Lobo, M., Fuente, D., Castaño, J., Morcillo, M., ... & López, F. (2005). Estudio de la capacidad para intumescer de dos sistemas de pintura expuestos a ambientes internos agresivos. *Revista De Metalurgia*, 41(Extra), 423-427. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2005.v41.iextra.1068>
- del Amo, B., Veleva, L., Di Sarli, A., Elsner C. (2004). Performance of coated Steel systems exposed to different media: Part I. Painted galvanized steel. *Progress In Organic Coatings*. 50(3) p. 179-192. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2004.02.003>
- Gui, L. and Long, X. (2020). Mechanical behavior and damage of zinc coating for hot dip galvanized steel sheet dp600. *Coatings*, 10(3), 202. <https://doi.org/10.3390/coatings10030202>
- Guilcaso, C., Ramírez, L., Coque, A., Vaca, X., Molina, D., & Simbaña, I. (2021). Influencia del recubrimiento de cromato de zinc en la corrosión de los aceros astm a-500 y a-500 galvanizado expuestos en una cámara de niebla salina. *Ingenius*, (26), 63-70. <https://doi.org/10.17163/ingenius.n26.2020.06>

- Hernández Betancur, J. D. (2018). Detección de los puntos críticos del proceso de galvanizado por inmersión en caliente: un enfoque hacia la sostenibilidad y el desarrollo sostenible (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín). Recuperado de <https://bit.ly/2VcodY9>
- Hernández Ledesma, D. y Hernández Sandoval, V. M. (2017). Obtención de recubrimientos de zinc por inmersión caliente con adición de manganeso y níquel. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Recuperado de <https://bit.ly/2upkImi>
- Huttunen-Saarivirta E., Yudin V., Myagkova L., Svetlichnyi V. (2011). Corrosion protection of galvanized Steel by polyimide coatings: EIS and Sem investigations. *Progress in Organic Coatings*. 72. P. 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.procoat.2011.04.015>
- Jiménez-Salas, R., Brenes-Brenes, R., Rodríguez-Yáñez, J., & Sanabria-Chinchilla, J. (2022). Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5845>
- Lestido-Cardama, A.; Vázquez-Loureiro, P.; Sendón, R.; Bustos, J.; Santillana, M.I.; Paseiro Losada, P.; Rodríguez Bernaldo de Quirós, A. Characterization of Polyester Coatings Intended for Food Contact by Different Analytical Techniques and Migration Testing by LC-MSn . *Polymers* 2022, 14, 487. <https://doi.org/10.3390/polym14030487>
- Liu, Y., Ooi, A., Tada, E., y Nishikata, A. (2019). Electrochemical monitoring of the degradation of galvanized steel in simulated marine atmosphere. *Corrosion Science*, 147, 273-282.
- Martín, J., Márquez, G., Sánchez, F., & Hernandez, M. (2008). Durabilidad de pastas de cemento api clase b expuestas a disoluciones acuosas de iones cloruro, sulfato y magnesio. *Materiales De Construcción*, 58(292). <https://doi.org/10.3989/mc.2008.37506>

- Meng Y., Liu L., Zhang D., Dong C., Yan Y., Volinsky A., Wang L-N. (2019). Initial formation of corrosion products on pure zinc in saline solution. *Bioactive Materials*. 4. P. 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2018.08.003>
- Melgarejo Lizcano, L. F., Bolaños Sierra, J. (2019). Estudio del comportamiento electroquímico de láminas de acero al carbono galvanizado recubierto con pintura expuesto a un ambiente salino simulado. (Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander)
- Nakhaie, D., Kosari, A., Mol, J., & Asselin, E. (2020). Corrosion resistance of hot-dip galvanized steel in simulated soil solution: a factorial design and pit chemistry study. *Corrosion Science*, 164, 108310. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108310>
- Páez Pérez, C. E., Roa Monsalve K. A., (2017). Evaluación de la resistencia a la corrosión de un acero galvanizado con revestimientos de poliéster en soluciones corrosivas mediante espectroscopia de impedancia electroquímica. (Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander)
- Peña-Ballesteros, D. (2016). Estudio electroquímico de un acero galvanizado pintado expuesto a diferentes medios de cloruros y sulfatos. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.15641.01125>
- Peña-Ballesteros, D., Sandoval-Amador, A., Durán, H., Fajardo, D., & Ascanio, L. (2015). Corrosión de acero galvanizado en un ambiente que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas. *Informador Técnico*, 79(2), 127. <https://doi.org/10.23850/22565035.157>
- Pesantez, F., Aravena, R., Bonilla, H., Infante, T., & Vélez, V. (2019). Efecto anticorrosivo de pinturas de poliuretano aplicadas sobre acero galvanizado sin tratamiento superficial. *Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Minas Metalurgia Y Ciencias Geográficas*, 22(44), 25-32. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v22i44.16283>

- Sandoval-Amador, A., Torres-Ramirez, J. E., Cabrales Villamizar, P.A., Laverde Cataño, D., Peña Ballesteros D.Y. (2017). The effect of zinc thickness on corrosion film breakdown of Colombian galvanized steel. *Journal of Physics Conference Series*, 935, 012052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/935/1/012052>
- Scheiber, V., Méndez, C., & Ares, A. (2015). Análisis de la resistencia a la corrosión en lluvia ácida simulada de las aleaciones Zn-Sn. *Matéria (Rio De Janeiro)*, 20(3), 597-611. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620150003.0061>
- Seré, P., Egli, W., Elsner, C., Sarli, A., & Deyá, C. (2018). Efecto de la concentración del silano MTMO sobre la protección contra la corrosión de acero electrocincado. *Matéria (Rio De Janeiro)*, 23(2). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0402>
- Suarez-Corrales, I., Villar-Lopez, V., Corvo-Perez, F., Marrero, R. (2014). Resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento. *Ingeniería Investigación Y Tecnología*, 15(1), 29-40. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(15\)30004-4](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(15)30004-4)
- Vera, R., Araya, R., Garín, C., Ossandón, S., & Rojas, P. (2019). Study on the effect of atmospheric corrosion on mechanical properties with impact test: carbon steel and galvanized steel. *Materials and Corrosion*, 70(7), 1151-1161. <https://doi.org/10.1002/maco.201810666>
- Vera, R., Puentes, M., Araya, R., Rojas, P., & Carvajal, A. (2012). Mapa de corrosión atmosférica de Chile: resultados después de un año de exposición. *Revista De La Construcción*, 11(2), 61-72. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2012000200007>
- Vera, R., Román, J., Puentes, M., Bagnara, M., Carvajal, A., & Rojas, P. (2013). Efecto de la difusión de ión cloruro en el comportamiento de acero galvanizado en estructuras de hormigón armado: resultados preliminares. *Revista De La Construcción*, 12(1), 30-40. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2013000100004>

- Vosgien Lacombe, C., Bouvet G., Trinh D., Mallarino S., Touzain S. (2017). Water uptake in free films and coatings using the Brasher and Kingsbury equation: a possible explanation of the different values obtained by electrochemical Impedance spectroscopy and gravimetry. *Electrochimica Acta*. 231. P. 162-170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.051>
- Wang, Q., Wu, X., Liu, L., Yan, Z., Li, X., & Yi, Y. (2022). Degradation behavior of mechanical properties of galvanized steel exposed to the wind and sand environment. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 53(2), 179-189. <https://doi.org/10.1002/mawe.202100182>
- Wang, Z. (2023). Mechanical properties of carbon steel under uniaxial static tension. *Journal of Physics Conference Series*, 2535(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2535/1/012013>
- Xiong, S., Huang, X., Xu, W., Guo, X., & Shuan, L. (2021). Corrosion and protection of galvanized steel in vegetation-growing concrete in marine environment (i): corrosion performance. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 16(6). <https://doi.org/10.1002/apj.2701>
- Yasakau, K.A., Giner I., Vree, C., Ozcan, O., Grothe, R. , Oliveira, A., Grundmeier, G., Ferreira, M., Zheludkevich, M. (2016). Influence of stripping and cooling atmospheres on surface properties and corrosion of zinc galvanizing coatings. *Applied Surface Science*, 389, p. 144-156. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.093>.

Anexos

Anexo 1. Composición química superficial de las láminas pintadas de acero galvanizado.

Figura A1.1. EDS de las superficies analizadas. a) Lamina pintada de acero galvanizada (verde), b) Lamina pintada de acero galvanizada (azul), c) Lamina pintada de acero galvanizada (rojo) y d) Lamina de acero galvanizado.

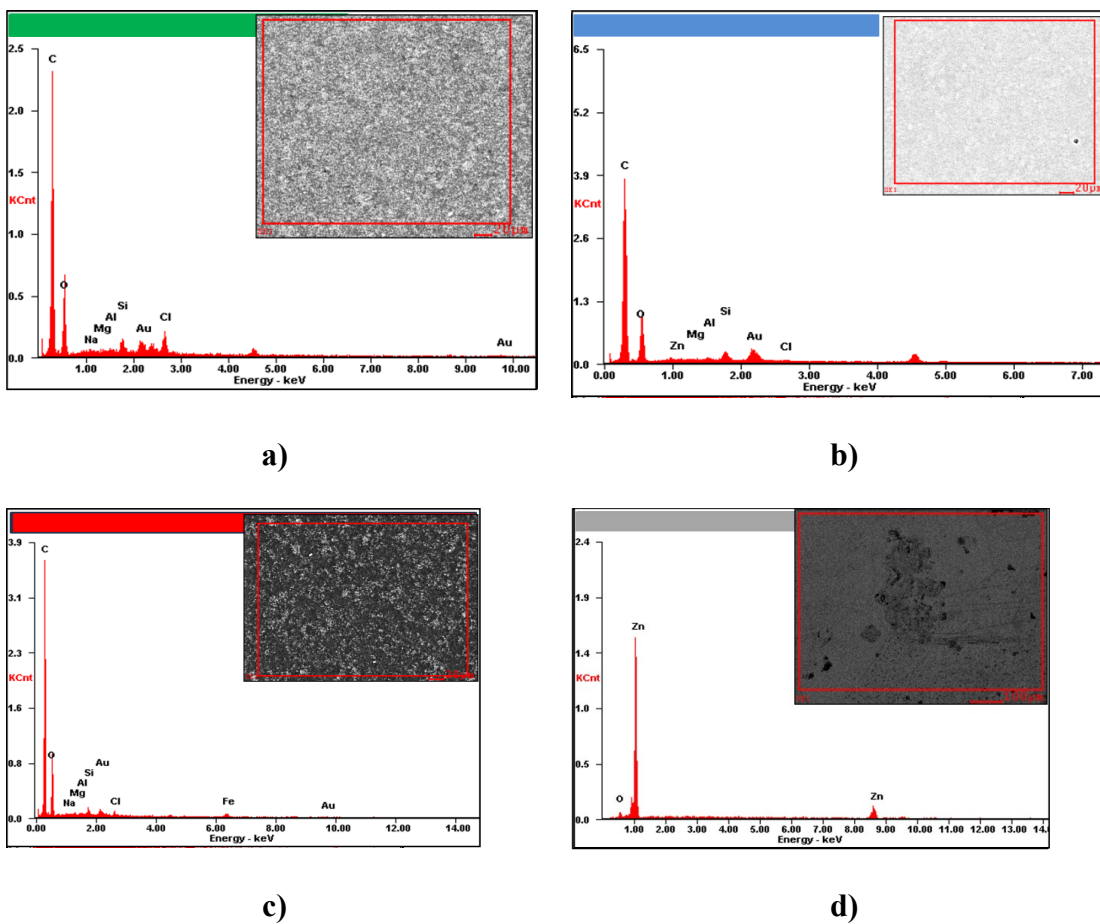


Tabla A1.1. *Composición EDS obtenida tras analizar las láminas de acero galvanizado.*

Elemento	Azul		Verde		Rojo	
	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%
Ck	61.75	76.92	64.67	76.21	63.72	75.63
Ok	21.07	19.70	23.13	20.47	23.98	21.37
Alk	0.44	0.24	0.21	0.11	0.13	0.07
Sik	2.00	1.07	1.77	0.089	1.14	0.58
Auk	9.13	0.69	5.55	0.40	3.83	0.28
Clk	-	-	4.44	1.77	1.04	0.42
Znk	5.21	1.19	-	-	-	-
Fek	-	-	-	-	5.90	1.51

Anexo 2. Espectros de impedancia electroquímica a diferentes tiempos de exposición de las láminas pintadas de acero galvanizado y datos de ajuste a modelos de circuito equivalente.

Figura A2.1. Espectros de impedancia electroquímica. a) Láminas pintadas de acero galvanizado y b) láminas de acero galvanizado. Tiempo 1 día de inmersión.

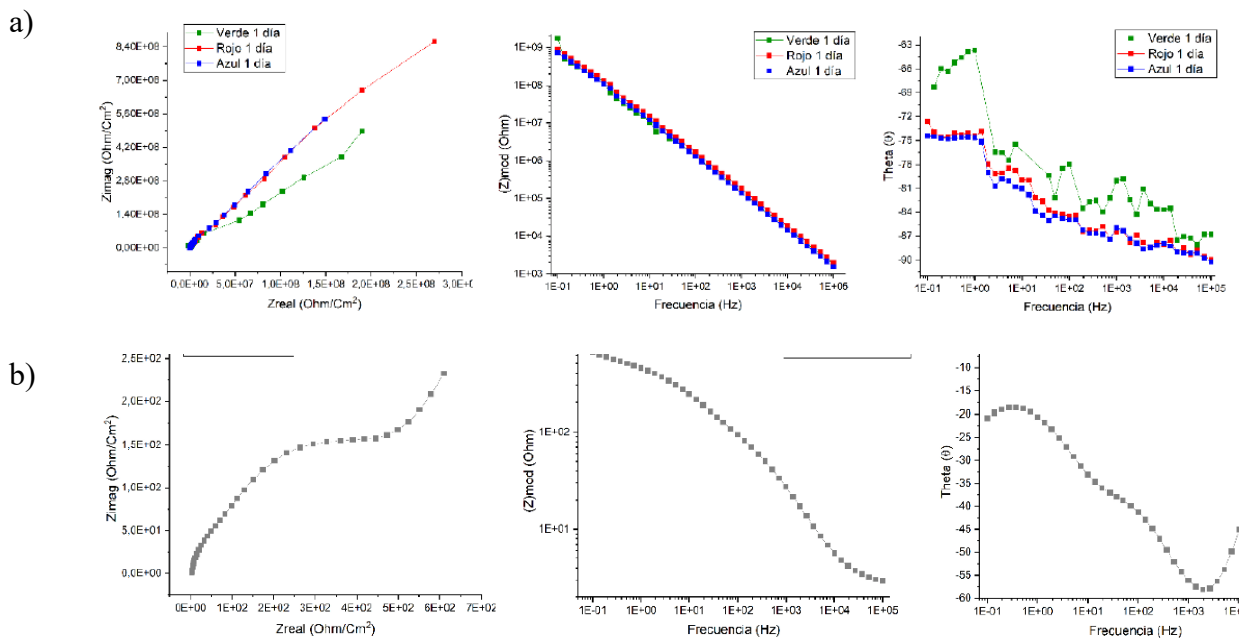


Figura A2.2. Espectros de impedancia electroquímica. a) Láminas pintadas de acero galvanizado y b) láminas de acero galvanizado. Tiempo 5 días de inmersión.

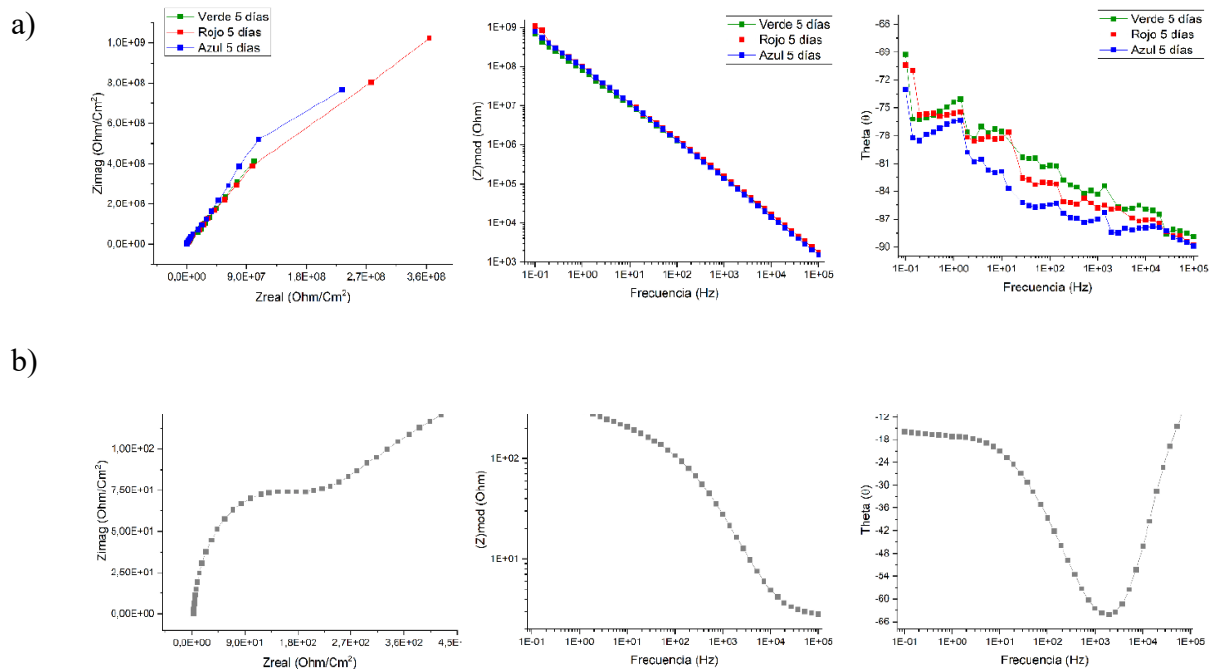


Figura A2.3. Espectros de impedancia electroquímica. a) Láminas pintadas de acero galvanizado y b) láminas de acero galvanizado. Tiempo 12 días de inmersión.

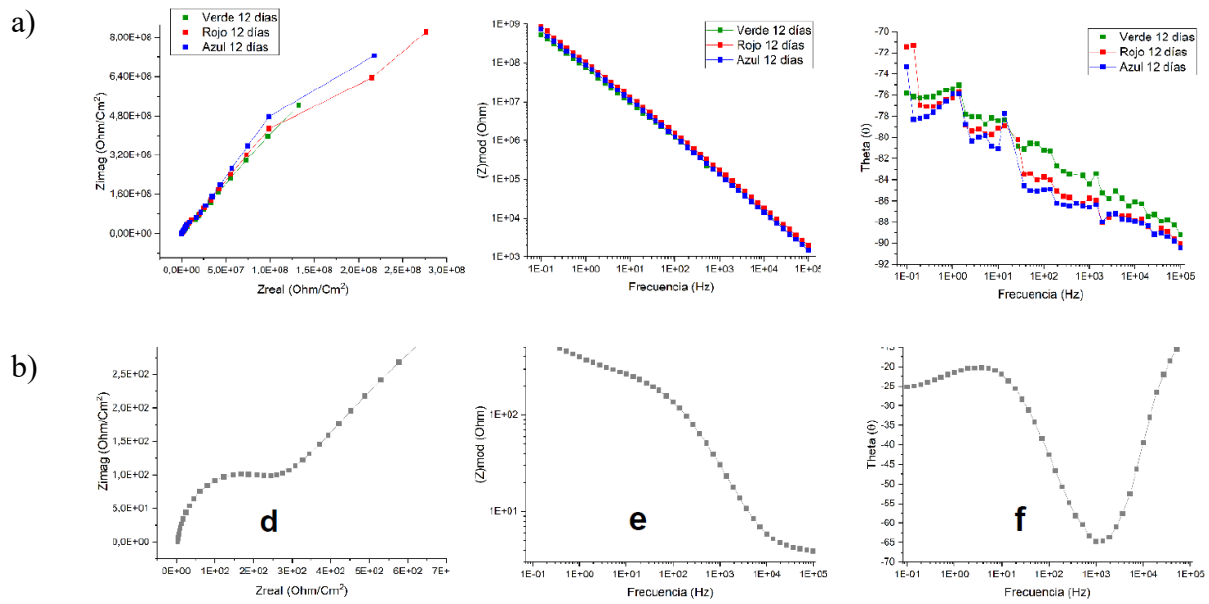


Figura A2.4. Espectros de impedancia electroquímica. a) Láminas pintadas de acero galvanizado y b) láminas de acero galvanizado. Tiempo 15 días de inmersión.

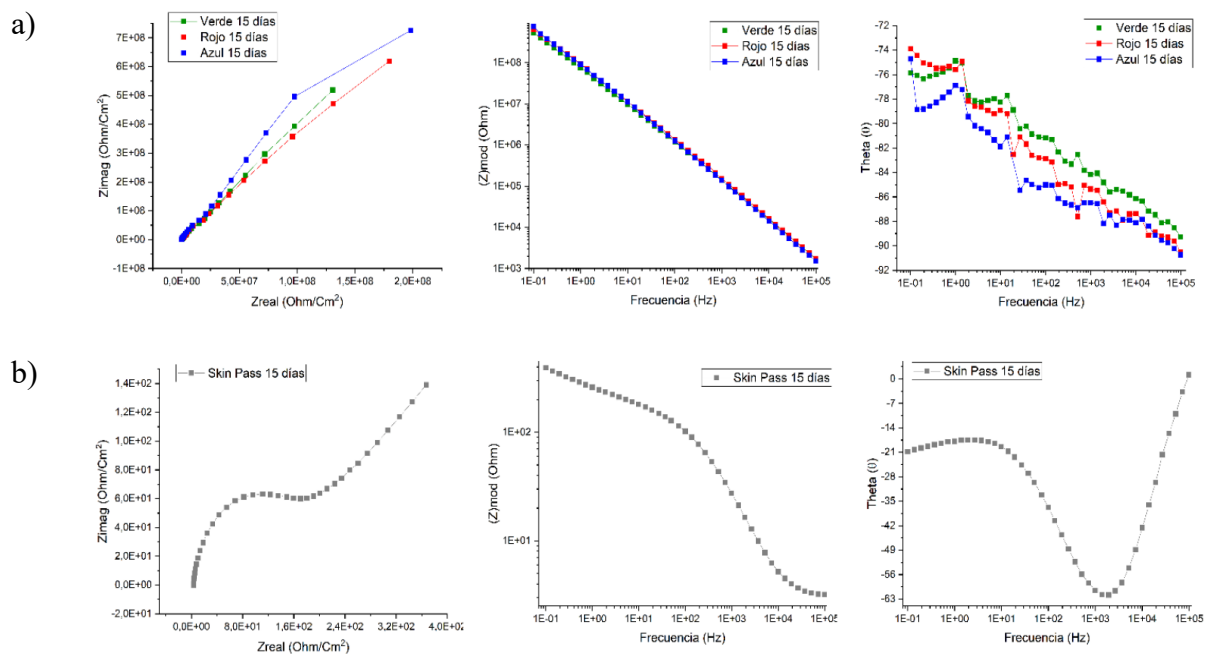


Figura A2.5. Espectros de impedancia electroquímica. a) Láminas pintadas de acero galvanizado y b) láminas de acero galvanizado. Tiempo 21 días de inmersión

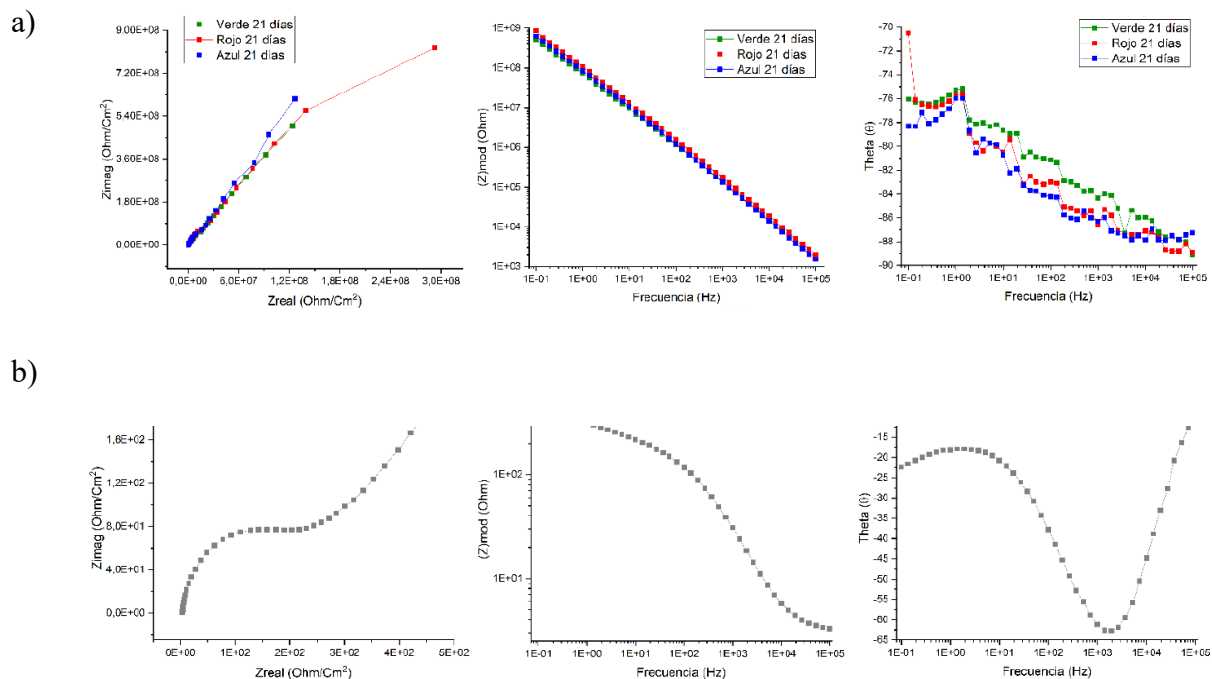
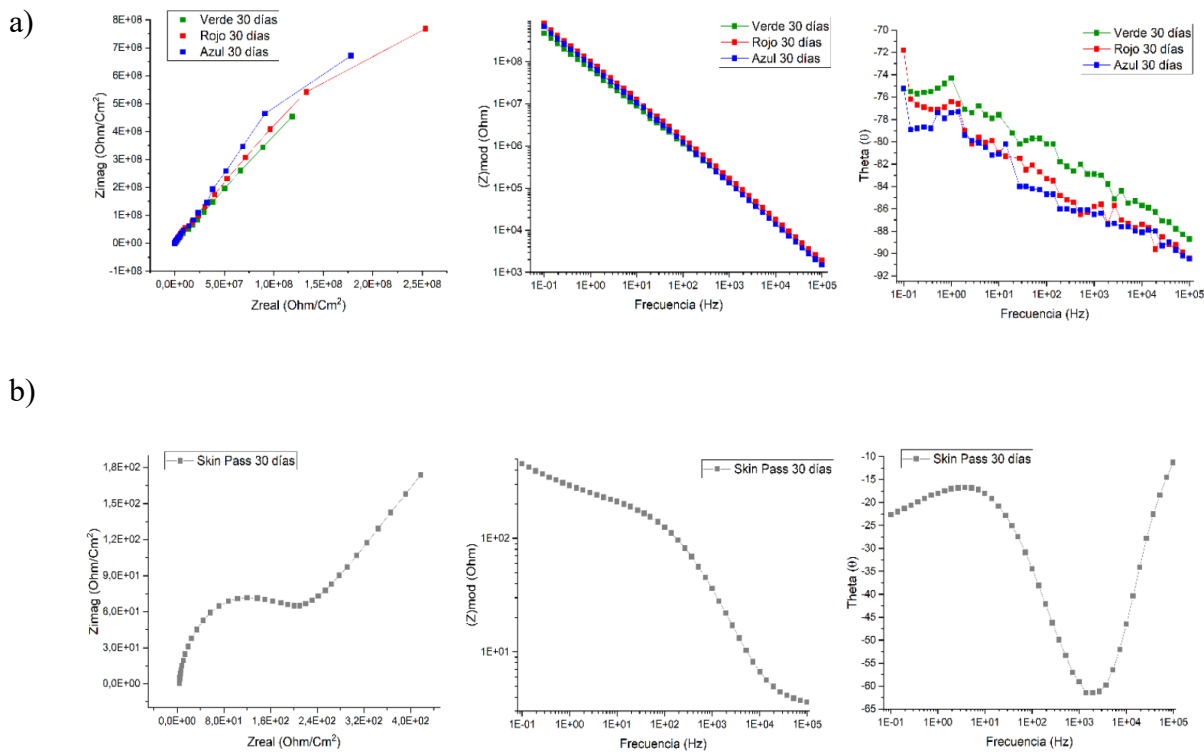


Figura A2.6. Espectros de impedancia electroquímica. a) Láminas pintadas de acero galvanizado y b) láminas de acero galvanizado. Tiempo 30 días de inmersión.



Datos de los valores de ajuste a modelos de circuito equivalente para cada una de las muestras analizadas.

Tabla A2.1. Resultados de ajuste a circuitos equivalente para cero días de inmersión.

Acero galvanizado.					
	<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
	R1	Fixed(X)	21,19	N/A	N/A
	CPE1-T	Free(±)	1,2391E-09	1,2492E-10	10,082
	CPE1-P	Free(±)	0,76078	0,032677	4,2952
	R2	Free(±)	-56,15	45,17	80,445
	CPE2-T	Free(±)	8,3208E-10	1,4488E-10	17,412
	CPE2-P	Free(±)	0,99518	0,011236	1,129
	R3	Free(±)	1,702E10	1,218E10	71,563
	Chi-Squared:		0,0074601		
	Weighted Sum of Squares:		0,58189		

Lámina pintada de acero galvanizado de color verde.					
	<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
	R1	Free(±)	2,26	0,047767	2,1136
	CPE1-T	Free(±)	0,00017432	6,934E-06	3,9777
	CPE1-P	Free(±)	0,71079	0,0050299	0,70765
	R2	Free(±)	618,9	27,476	4,4395
	CPE2-T	Free(±)	0,0013792	0,00010313	7,4775
	CPE2-P	Free(±)	0,90292	0,081001	8,971
	R3	Free(±)	884	148,63	16,813
	Chi-Squared:		0,0043433		
	Weighted Sum of Squares:		0,34312		

Lámina pintada de acero galvanizado de color rojo.					
	<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
	R1	Free(±)	267,9	269,48	100,59
	CPE1-T	Free(±)	1,0252E-09	3,0245E-10	29,502
	CPE1-P	Free(±)	0,93593	0,045761	4,8894
	R2	Free(±)	-1182	2074,4	175,5
	CPE2-T	Free(±)	9,8407E-11	3,1721E-10	322,34
	CPE2-P	Free(±)	1,1	0,17118	15,562
	R3	Free(±)	4,6997E09	7,6162E08	16,206
	Chi-Squared:		0,069865		
	Weighted Sum of Squares:		5,3796		

Lámina pintada de acero galvanizado de color azul.					
	<u>Element</u>	<u>Freedom</u>	<u>Value</u>	<u>Error</u>	<u>Error %</u>
	R1	Free(+)	1,0158E-07	9,4853	9,3378E09
	CPE1-T	Free(±)	1,3201E-09	1,9754E-11	1,4964
	CPE1-P	Free(±)	0,97951	0,0017737	0,18108
	R2	Free(±)	1,1854E09	2,0047E08	16,912
	CPE2-T	Free(±)	2,4128E-10	3,6013E-11	14,926
	CPE2-P	Free(±)	1,409	0,1049	7,445
	R3	Free(±)	2,1835E09	3,2075E08	14,69
	Chi-Squared:		0,025504		
	Weighted Sum of Squares:		1,8618		