EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO GALVANIZADO Y PINTADO CON POLIÉSTER EN SOLUCIONES QUE SIMULAN AMBIENTES TROPICALES Y LLUVIA ÁCIDA

DAVID FERNANDO ALMEYDA GAMBOA
YESID MARÍN CASTAÑEDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA
2017

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO GALVANIZADO Y PINTADO CON POLIÉSTER EN SOLUCIONES QUE SIMULAN AMBIENTES TROPICALES Y LLUVIA ÁCIDA

DAVID FERNANDO ALMEYDA GAMBOA
YESID MARÍN CASTAÑEDA

Trabajo de Grado, presentado como requisito para optar el Título de Ingeniero Metalúrgico

Director:
DARIO YESID PEÑA BALLESTEROS
PhD. En Corrosión

Codirector:
CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO
Magister en Ingeniería Metalúrgica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA
2017

DEDICATORIA

A Dios quien ha sido el complemento de mi vida, quien ilumino, junto a mamita María, mi camino; Me brindo su amor, bondad y apoyo, para así lograr superar todas mis dificultades durante este caminar.

A mi madre Gladys. Por ser parte de mi motivación y por brindarme la mejor educación, por su apoyo económico y por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor incondicional; gracias mamita.

A mi padre David. A un caballero. Por su empuje mostrado para salir adelante, por infundir en mi la lucha y el deseo de superación, brindándome sus mejores palabras de respaldo y apoyo en momentos de duda y desesperación; gracias papito.

A mis hermanas que me han respaldado y apoyado en mi iniciativa de estudiar mi ingeniería y gracias por toda su preocupación, queriendo verme culminar mi carrera, las quiero mucho.

A mi tía Amelia por su preocupación diaria, brindándome su nobleza, sencillez y amor incondicional.

A mi cuñado Néstor por su ayuda y colaboración incondicional.

A dos seres fantásticos: mi esposa Susana Pinzón y mi hijo Didier por todo su respaldo, apoyo, preocupación y amor incondicional brindado, porque son parte de mi motivación y saben cuántas dificultades hemos pasado. Los Amo.

David Fernando Almeyda Gamboa

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: La voluntad"

A. Einstein.

A Dios quien ha sido mi oriente siempre, marcando mi derrotero y guiándome con su infinito amor y sabiduría, hasta llevarme a la victoria, por intercesión perfecta de mi madre celestial.

A mis Padres Flor Castañeda y Darío Marín, ellos con su anhelo vivaz han sido mi apoyo incondicional en mi tránsito por mejorar cada día como ser humano.

A mis hermanos, los cuales estuvieron prestos de uno u otro modo colaborándome, y en especial a mi hermano Melquisedec Marín, quien me financio económicamente. Ellos fueron pilar fundamental en la consecución de esta meta que hoy culmino con éxito.

Yesid Marín Castañeda

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar un trabajo tan arduo y lleno de desafíos, como el desarrollo de una tesis de grado es inevitable que te asalte la felicidad y te llenos de orgullo, pero nada de eso sería posible sin la ayuda de personas que te faciliten la ejecución de tan anhelado sueño.

Por ello debemos agradecer de manera especial y sincera al Doctor y Profesor Darío Yesid Peña Ballesteros por aceptar y realizar esta tesis de Trabajo de Grado, bajo su dirección. Su apoyo y confianza en nuestro trabajo y su capacidad para guiar nuestras ideas han sido un aporte invaluable. Gracias por su tiempo tan valioso y estar siempre presto y atento a nuestras solicitudes.

Queremos hacer extensivas nuestra gratitud a el profesor: Custodio Vásquez Quintero y al Grupo de Investigación en Corrosión UIS (GIC) por su amistad, colaboración y animo infundido.

Un agradecimiento especial a la Universidad de Nacional de Colombia sede Medellín, por facilitarnos y llevar a cabo la realización de pruebas de caracterización y de esta manera respaldarnos en la investigación realizada.

Un especial y merecidísimo reconocimiento por el interés mostrado, respaldo, sugerencias, llamados de atención y valerosas ayudas recibidas por parte del Físico: Anderson Sandoval Amador, quien con su ánimo característico y consejos valerosos nos motivó a seguir adelante e infundio en nosotros el espíritu investigativo.

A todos ellos, muchas gracias.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 17

1. OBJETIVOS 21

1.1 OBJETIVO GENERAL 21

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 21

2. METODOLOGÍA 22

2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL 22

2.2 TIPOS DE REACTIVOS EMPLEADOS Y LÁMINAS DE ESTUDIO 23

2.3 PREPARACIÓN DE LAS LÁMINAS 24

2.4 ADECUACION DEL MONTAJE 25

2.5 CARACTERIZACION SUPERFICIAL 27

2.6 REALIZACION DE LAS PRUEBAS ELECTROQUIMICAS 28

3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS 29

3.1 MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM-EDS) Y MAPPING 29

3.1.1 Acero galvanizado y pintado con poliéster de coloración azul 29

3.1.2 Acero galvanizado y pintado con poliéster de coloración verde 32

3.1.3 Acero galvanizado y pintado con capa de Primer color verde té 34

.3.2 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) 36

3.2.1 Solución que simula ambiente de lluvia ácida 36

3.2.2 Solución que simula ambiente tropical 40

4. CONCLUSIONES 47

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....48

BIBLIOGRAFÍA.....51

ANEXOS.....54

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Láminas y variables a considerar para la realización del presente trabajo. 22

Tabla 2. Reactivos y composición presente en solución simulada de ambiente tropical 23

Tabla 3. Reactivos y composición presente en solución simulada de lluvia ácida 23

Tabla 4. Resistencia de poro (Rp) en función del tiempo y el ambiente simulado a lluvia ácida para los poliésteres verde, azul y Primer. 46

Tabla 5. Resistencia de poro en función del tiempo y el ambiente simulado a ambiente tropical para los poliésteres verde, azul y Primer 46

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Ejemplo demostrativo de procesos y recubrimientos realizados a las láminas de acero galvanizado 24
Figura 2. Dimensiones de la muestras empleadas. 25
Figura 3. Muestras a Trabajar de Acero Galvanizado y Pintado. 25
Figura 4. Montaje empleado para la exposición de las muestras a las soluciones. 26
Figura 5. Montaje y conexiones empleadas para la exposición de las muestras a las soluciones. 26
Figura 6. Montaje y Sistema aislante electromagnético (Caja de Faraday). 27
Figura 7. Esquema general utilizado para las pruebas electroquímicas. 28
Figura 8. Micrografía electrónica del acero Galvanizado más recubrimiento azul. a) y b) Imagen corte transversal galvanizado más recubrimientos. c) Porcentajes composicionales del acabado. d) Espectro acabado final pintura azul 30
Figura 9. (Mapping) Corte transversal. Acero Galvanizado con recubrimiento Azul 31
Figura 10. (SEM) Acero Galvanizado con recubrimiento Verde. a), b) y c) Imagen corte transversal galvanizado más recubrimientos. d) Porcentajes composicionales del acabo (pintura final verde). e) Difractograma acabado final pintura verde 32

Figura 11. (Mapping) Corte transversal. Acero Galvanizado con recubrimiento Verde 33
Figura 12. (SEM) Acero Galvanizado con recubrimiento Primer. a), b) y c) Imagen corte transversal galvanizado más recubrimientos. d) Porcentajes composicionales del acabo (pintura final primer). e) Difractograma acabado final pintura Primer 35
Figura 13. (Mapping) Corte transversal. Acero Galvanizado con recubrimiento Primer 36
Figura 14. Diagrama de Nyquist y bode para t=o en solución simulada de lluvia ácida 37
Figura 15. Diagrama de Nyquist y bode para t=7 en solución simulada de lluvia ácida 38
Figura 16. Diagrama de Nyquist y bode para t=15 en solución simulada de lluvia ácida 39
Figura 17. Diagrama de Nyquist y bode para t=0 en solución simulada a ambiente tropical.....41
Figura 18. Diagrama de Nyquist y bode para t=7 en solución simulada a ambiente tropical.....42
Figura 19. Diagrama de Nyquist y bode para t=15 en solución simulada a ambiente tropical.....44
Figura 20. Evolución de los espectros EIS con el tiempo de exposición a las soluciones simuladas. (a) ambiente tropical y (b) ambiente ácido. 45

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. SEM PARA LAMINAS DE ACERO GALVANIZADO Y PINTADO 55

ANEXO B. DIAGRAMAS EQUIVALENTES PARA LAMINAS DE ACERO GALVANIZADO Y PINTADO 60

RESUMEN

TITULO: **EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO GALVANIZADO Y PINTADO CON POLIESTER EN SOLUCIONES QUE SIMULAN AMBIENTES TROPICALES Y LLUVIA ÁCIDA.***

AUTORES: **DAVID FERNANDO ALMEYDA GAMBOA y YESID MARIN CASTAÑEDA.****

PALABRAS CLAVES: Acero Galvanizado, Resistencia a la Corrosión, Poliéster, Ambientes Tropicales, Lluvia Acida.

A lo largo de los últimos años se han introducido mejoras en la fabricación de pinturas como recubrimientos anticorrosivos, empleados en múltiples propósitos. Desarrollos recientes en pinturas han sido incorporados para facilitar su aplicación y entregar materiales menos contaminantes al mercado. Se usaron tres sistemas de poliéster como agentes retardantes de la corrosión, ya aplicados sobre láminas de acero galvanizado, comúnmente utilizados en cubiertas expuestas a intemperies; a estos recubrimientos se les evaluó la resistencia a la corrosión; mediante Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), para ello fueron inmersas en soluciones que contenían iones, que simulan ambientes tropicales, y lluvia ácida. La evaluación se realizó para tres (3) tiempos de inmersión diferentes correspondientes a 0, 7 y 15 días, en contacto con los ambientes simulados. La caracterización y composición de los materiales, se llevó a cabo a través las técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), y MAPPING. El estudio se realizó con el objeto de aportar al desarrollo de la industria colombiana, y en particular de la empresa proveedora de las láminas galvanizadas y pintadas, pensando en la optimización y adecuada aplicación de los procesos tendientes a mejorar los materiales empleados como cubiertas para exteriores en ambientes corrosivos característicos del país. Los resultados de los sistemas en estudio, corroboraron la implementación de la técnica EIS en ambientes simulados, mostrando cambios significativos al comportamiento en ambientes ácidos como tropicales. Determinando resultados moderadamente mejores para el poliéster de pigmentación color azul respecto del verde, y superiores respecto del Primer; haciendo que este por su composición presente mayor resistencia a la corrosión en ambos ambientes.

---

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ing. Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Grupo de Investigación en Corrosión. PhD. Darío Yesid Peña Ballesteros.

ABSTRACT

TITLE: **EVALUATION OF CORROSION RESISTANCE OF A GALVANIZED STEEL AND POLYESTER PAINTED IN SOLUTIONS THAT SIMULATE TROPICAL ENVIRONMENTS AND ACID RAIN. ***

AUTHORS: **DAVID FERNANDO ALMEYDA GAMBOA & YESID MARIN CASTAÑEDA.****

KEYWORDS: Galvanized Steel, Corrosion Resistance, Polyester, Tropical Environments, Acid Rain.

Over the last few years improvements have been made in the manufacture of paints such as anticorrosive coatings, used for multiple purposes. Recent developments in paints have been incorporated to facilitate their application and to deliver less polluting materials to the market. Three polymeric systems were used as corrosion retarding agents, already applied on galvanized steel sheets, commonly used in weatherproof decks; These coatings were evaluated for corrosion resistance; Using electrochemical impedance spectroscopy (EIS). They were immersed in solutions containing ions, which simulate tropical and acid rain environments. They were evaluated for three (3) different immersion times, between 0, 7 and 15 days, in contact with the simulated environments. The characterization and composition of the material was done by the techniques: Scanning Electron Microscopy (SEM), and MAPPING. The study was carried out with the aim of contributing to the development of the Colombian industry, considering the optimization and adequate application of the processes tending to improve the materials used as outdoor decks in corrosive environments characteristic of the country. The results corroborated the implementation of the EIS technique in simulated environments, showing significant changes to the behavior in saline environments as acids. This results in moderately better results for the coating of blue pigmentation color than the green one, and superior with respect to the Primer, making this because its composition presents greater resistance to corrosion in both environments.

* Grade Work.

** Facultad de Ing. Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Grupo de Investigación en Corrosión. PhD. Darío Yesid Peña Ballesteros.

INTRODUCCIÓN

Las empresas productoras de láminas de acero galvanizado enfrentan problemas de corrosión, debido a que es inevitable el contacto de los agentes corrosivos y la humedad al momento de almacenarlas, siendo este evento suficiente para generar focos de corrosión, antes de su despacho. [1]

La corrosión en el acero inicia cuando el recubrimiento de Zinc pierde su desempeño como ánodo de sacrificio, debido a la acumulación de productos de corrosión de Zinc en la superficie del recubrimiento.

Estudios de investigación profundizan en el mejoramiento de las técnicas de galvanizado en aceros [2]. Fundamentando la durabilidad de los aceros galvanizados en función de tres factores:

- La calidad del recubrimiento.
- Correcta instalación del recubrimiento galvanizado.
- La agresividad del medio al que se encuentre expuesto. [2]

Algunos estudios revelan resultados del desempeño de un revestimiento de zinc sobre acero galvanizado pintado, expuesto a una solución de cloruro de sodio. El comportamiento de los electrodos revestidos individualmente o acoplados entre sí, se supervisaron a través de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), reportando información sobre el mecanismo de corrosión del zinc. [3]

Resultados anteriores se han obtenido, realizando caracterización mediante DRX de los productos de corrosión generados en el interior de tubos, determinando también las características del galvanizado, y estudiando la morfología del ataque corrosivo, a través de las técnicas de microscopia y metalografía. De igual modo se ha evaluado la disminución real del diámetro, sección y volumen interno, en

consideración con la pérdida de carga generada en la tubería galvanizada, concluyendo que la reacción de corrosión en el interior de la tubería, ha sido un proceso lento. Esto se evidencia en su durabilidad (periodo de vida estimado de 30 años). [2] Las muestras fueron analizadas con FESEM-EDS, láser espectrómetro de Raman y DRX. Puede concluirse que la corrosión del zinc progresa heterogéneamente en condiciones cíclicas húmedas y secas en presencia de iones cloruro, probablemente por deposición no homogénea de sales de cloruro en la superficie de revestimiento en los periodos de secado. [4]

Otros estudios muestran la susceptibilidad al daño por hidrógeno, tanto de láminas galvanizadas en caliente, como por electrodeposición en medio ácido; analizando el efecto que presenta la rugosidad superficial, la microestructura y el espesor de cada recubrimiento. Se evidencia, que los índices de rugosidad son característicos en ambos materiales, sin importar que el proceso de galvanizado se obtenga por técnicas distintas. También se estableció que los dos recubrimientos son continuos aunque difieren en su medida de espesor y microestructura. El galvanizado obtenido por electrodeposición presenta homogeneidad en su apariencia, con una medida de su espesor aproximadamente el doble de la medida de la capa galvanizada en caliente; se observaron también compuestos intermetálicos con interfaces complejas de distinguir. El galvanizado generado en caliente demuestra ser más efectivo contra la permeación de hidrógeno, lo que puede atribuirse a una mejora dimensional en el parámetro de red del recubrimiento debido a la presencia de compuestos intermetálicos. [5]

Existen mecanismos eficaces para el monitoreo de la degradación por efecto de la corrosión sobre el recubrimiento metálico en ambientes atmosféricos tales como los métodos electroquímicos correspondientes a la medida de impedancia y potenciales de corrosión, a través de los cuales se estima el tiempo de aparición de los óxidos, que indican a su vez el inicio del proceso corrosivo en el acero, como la velocidad de corrosión de los materiales de recubrimiento. [4]

De este modo, la resistencia a la corrosión del sistema metal-recubrimiento es función principalmente de la capacidad de los productos de corrosión a ejercer un bloqueo efectivo sobre los microporos durante su proceso de precipitación. Se deduce por tanto, que se hace necesario el empleo de películas de mayor espesor con el fin de garantizar una mayor protección contra el ataque corrosivo, especialmente en la protección de sustratos de acero galvanizado. [5]

Datos de una investigación demostraron que el producto principal detectado en el recubrimiento de Zinc corresponde a cloruro básico de Zinc en el entorno de la corrosión marina y esta capa de óxido posee una fuerte correlación con las características de corrosión del acero galvanizado. En solución de la capa de óxido simulada altamente alcalina el galvanizado se pasiva.

El comportamiento frente a la corrosión del acero galvanizado, fue realizado a través de las mediciones de pérdida de peso, espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y polarización lineal, combinada con el experimento de polarización cíclica.

La investigación concluyó, que las capas de óxido formadas en el mismo material por solución simulada de capa de óxido, como por proceso de oxidación en el medio real, no solo permite una evaluación no destructiva de la velocidad de corrosión, sino también la determinación del mecanismo de corrosión. [6]

Mostrando estudios sobre el comportamiento a la corrosión de diferentes productos de acero galvanizado con y sin recubrimiento para las condiciones de un clima tropical húmedo, a través de ensayos climáticos acelerados, efectuados en cámara climática al igual que ensayos naturales en la estación marino-costera de Cojímar, ubicada sobre la costa norte de la Habana; se evidenciaron las problemáticas que suelen presentar los aceros galvanizados al ser expuestos con y sin recubrimiento a un ambiente tropical húmedo. De igual modo se observó la

importancia de la adherencia de la capa de recubrimiento, bien sea para garantizar protección adicional, como para mostrar buena apariencia en fines decorativos.

Los resultados reflejan que el 95% del acero galvanizado muestran una buena resistencia a la corrosión, y de igual modo 71% de los aceros galvanizados con recubrimiento aplicado; pero de éstos, el 100% de los aceros galvanizados pintados, no cumplen las expectativas para las cuales fueron concebidos, ni desde el punto de vista mecánico ni de resistencia a la corrosión.

Puede además concluirse que ninguna de las muestras de acero galvanizado pintadas evaluadas presentó afecciones durante el ensayo de envejecimiento acelerado expuesto a radiación ultravioleta fluorescente y a la acción del agua. Los resultados no son concluyentes, ya que el estudio concretamente se centró en aceros galvanizados con y sin recubrimiento producidos y comercializados por Cuba. [7]

La presente investigación hace parte de un proyecto cofinanciado, que consiste en evaluar el comportamiento frente a la corrosión de una placa de acero galvanizado y pintado con tres poliéster distintos (separadamente), sometidos a soluciones que simulan ambientes tropicales y de lluvia ácida; medios característicos a los que son expuestos en servicio comúnmente los materiales objeto del análisis. Se estudiará el desempeño del recubrimiento, como protector del substrato metálico ante la corrosión para los tres sistemas expuestos, y se determinará cual presenta el mejor rendimiento.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia a la corrosión de un acero galvanizado y pintado con tres tipos de poliéster sobre láminas distintas del mismo material, expuesto en soluciones que simulan ambientes tropicales y lluvia ácida.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar la resistencia a la corrosión de los respectivos recubrimientos, mediante la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

- Determinar los elementos presentes en las muestras a través de las técnicas SEM-EDS y MAPPING.

- Plantear un esquema de circuito equivalente que describa el comportamiento electroquímico del sistema a estudiar.

- Determinar la influencia del tiempo de exposición sobre las láminas expuestas a los medios simulados.

2. METODOLOGÍA

2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

La metodología usada para el cumplimiento de los objetivos consta de varias fases que van desde la preparación de las probetas, pasando por la realización de los montajes para los sistemas a evaluar, y finalizando con la implementación de las técnicas propuestas para realizar el análisis. Estas corresponden con las técnicas espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), microscopía electrónica de barrido (SEM) con espectrómetro de energía dispersa (EDS) y MAPPING.

Con el fin de cuantificar el número de pruebas, se desarrollaron dos (2) sistemas simulados; uno a ambientes tropicales, y otro a lluvia ácida, manejando tres variables de tiempo para cada sistema en particular (Tabla 1). Esto con el fin de someter las láminas de acero galvanizado y pintado con poliéster a la acción de los ambientes mencionados con el objeto de evaluar su comportamiento electroquímico, y verificar cual material muestra un mejor desempeño.

Tabla 1. Láminas y variables a considerar para la realización del presente trabajo.

Prueba #	Lamina Pintada	Tiempo: 0 [días]	Tiempo: 7 [días]	Tiempo: 15 [días]	Ambiente Tropical	Ambiente Ácido
1	primer	x	X	x	x	
2	azul	x	X	x	x	
3	verde	x	X	x	x	
4	primer	x	X	x		x
5	azul	x	X	x		x
6	verde	x	X	x		x

Fuente: Los autores

Dentro de la metodología aplicada se utilizaron láminas de acero galvanizado y pintado con poliésteres de coloración diferente, exponiendo de manera individual cada lámina durante el número de días referenciado en la tabla 1, para un total de 18 pruebas electroquímicas.

2.2 TIPOS DE REACTIVOS EMPLEADOS Y LÁMINAS DE ESTUDIO

Se adquirieron los reactivos expuestos en la Tabla 2 y 3, y se prepararon las soluciones simuladas necesarias para someter al ataque las láminas suministradas por una empresa nacional productora de acero galvanizado y pintado.

Tabla 2. Reactivos y composición presente en solución simulada de ambiente tropical. [1]

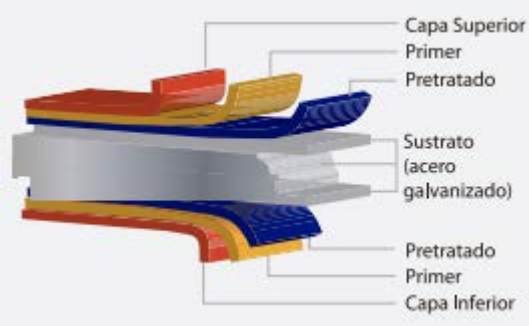
COMPOSICIÓN	**CONCENTRACIONES [mg.L^{-1}]**
Sulfato de Sodio	24.540
Cloruro de Sodio	25.560

Tabla 3. Reactivos y composición presente en solución simulada de lluvia ácida. [8]

COMPOSICIÓN	**CONCENTRACIONES [mg.L^{-1}]**
Ácido Sulfúrico (96%)	31.85
Ácido Nítrico (70%)	15.75
Nitrato de Sodio	21.25
Sulfato de Amonio	46.20
Sulfato de Sodio	31.95
Cloruro de Sodio	84.85

Las láminas presentan un tratamiento especial característico de la empresa suministradora. Los poliésteres para dos de las láminas muestran coloración azul y verde, correspondiente a los recubrimientos con acabado final, mientras que la otra lamina de coloración verde té, corresponde al primer (o capa intermedia del recubrimiento). En la figura 1 se puede observar la distribución de las capas presentes depositadas sobre el metal base.

Figura 1. Ejemplo demostrativo de procesos y recubrimientos realizados a las láminas de acero galvanizado.



Fuente: Ficha Técnica Acero Pre-pintado. [9]

2.3 PREPARACIÓN DE LAS LÁMINAS

Se cortaron las muestras laminadas de acero galvanizado y pintado en dimensiones de 10cmx6cm (Figura 2); cubriendo un área de ellas con un material aislante, de dimensiones 5cmx5cm, y un orificio interno de 2cmx2cm sobre el mismo. Esto se realizó para proteger y evitar la dispersión o contacto de iones sobre toda la superficie, y concentrar el ataque de las soluciones simuladas específicamente en la zona interna.

Figura 2. Dimensiones de las muestras empleadas.

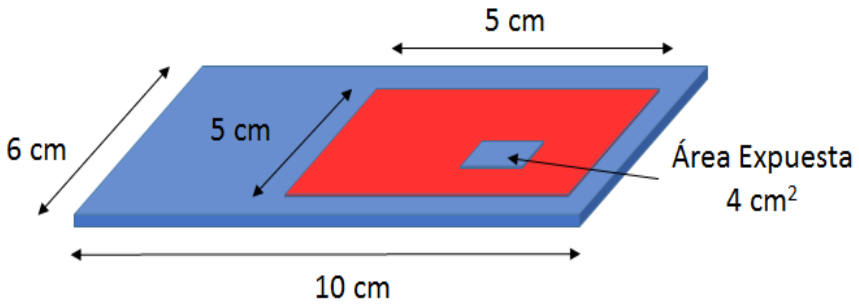
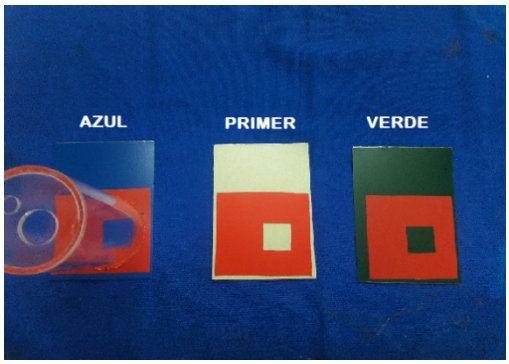


Figura 3. Muestras a Trabajar de Acero Galvanizado y Pintado.



El tamaño del orificio interno expuesto de las láminas, se preparó con las medidas ya descritas anteriormente, y su dimensión es proporcional al área del electrodo de grafito.

2.4 ADECUACIÓN DEL MONTAJE

Se diseñó y empleó un montaje constituido de un cilindro de acrílico hueco en su fondo y con tapa en su extremo superior con dos orificios de entrada. Seguidamente se acoplo a las superficies de cada lámina. Se agregó la solución simulada en la celda y se introdujeron los electrodos de referencia y de grafico

(Figura 4). Seguidamente se conectó el sistema al Potenciostato con el objeto de realizar las pruebas de EIS. (Figura 5).

Figura 4. Montaje empleado para la exposición de las láminas pintadas a las soluciones simuladas.

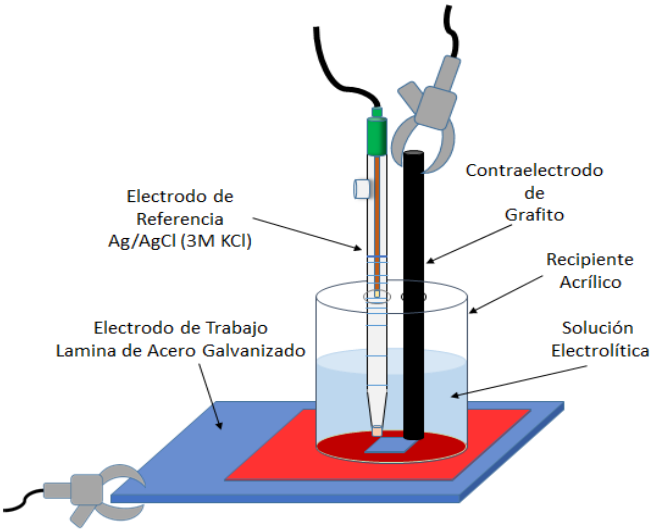
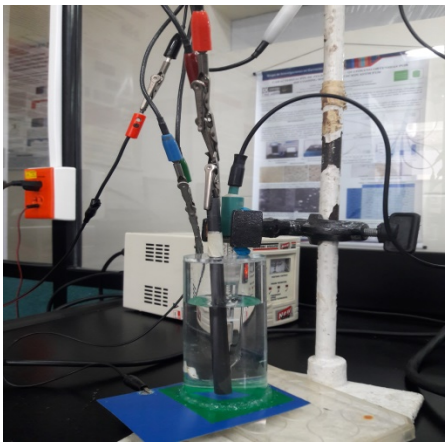
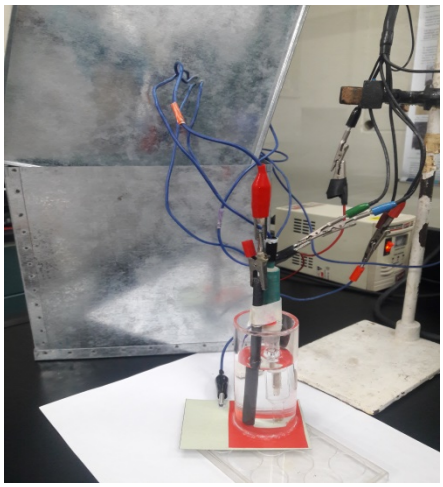


Figura 5. Celda electroquímica empleada para la implementación de la técnica EIS.



Con el objeto de aislar las corrientes parásitas del medio se hizo necesario el empleo de una jaula de Faraday, minimizando así cualquier interferencia eléctrica o magnética que pudiese alterar los resultados, y dificultar la interpretación de los datos obtenidos a través de la técnica de EIS sobre las láminas de acero galvanizado y pintado. (Ver Figura 6).

Figura 6. Sistema aislante de ondas externas eléctricas y electromagnéticas. Jaula de Faraday.



2.5 ANÁLISIS SUPERFICIAL

Para llevar a cabo el estudio, se cortaron fracciones de las láminas y se montaron a través de solidificación por resina, obteniendo las probetas requeridas para el análisis elemental del corte transversal del material a través de las técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y MAPPING, mediante el equipo EVO MA de Carl Zeiss equipado con un detector Oxford X ACT y software Inca.

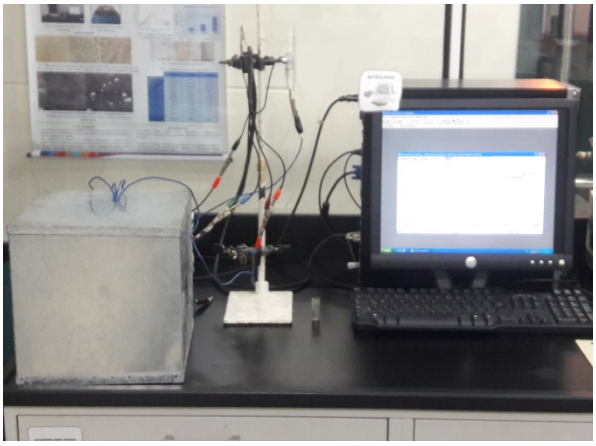
2.6 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

El montaje de la celda electroquímica se elaboró bajo la norma ASTM G109 [10] y para ellos se utilizó, un electrodo de Referencia Plata / Cloruro de Plata (Ag/AgCl) 3,0 M Saturado. Como contra electrodo se utilizó una barra de grafito y el electrodo de trabajo fue cada muestra de acero galvanizado y pintado como se mostró en la Figura 4.

Los recubrimientos fueron monitoreados por EIS. Se manejaron tres tiempos de exposición para cada lámina en cada solución simulada, correspondiente a 0, 7 y 15 días.

Las pruebas electroquímicas se realizaron en un Potenciostato GAMRY PCI4 750 (Figura 7). Las frecuencias empleadas fueron: inicial 100000 (Hz) y final 10 (Hz). Los datos fueron analizados con un software ZPLOT.

Figura 7. Esquema general utilizado para las pruebas electroquímicas.



3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

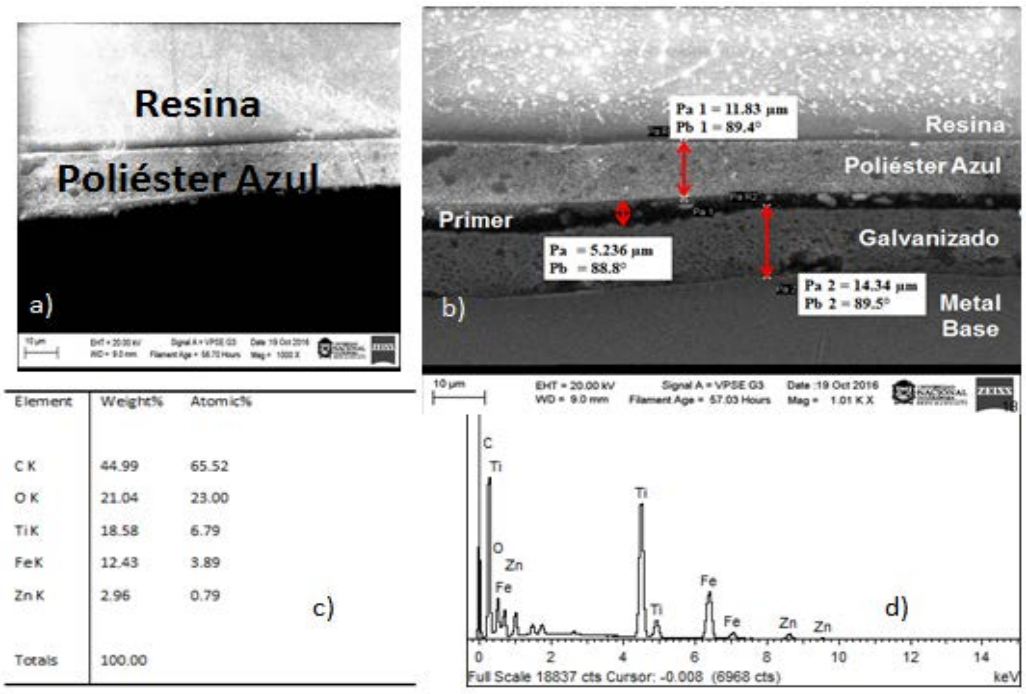
3.1 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM-EDS) Y MAPPING

3.1.1 Acero galvanizado y pintado con poliéster de coloración azul. La microscopia electrónica realizada al acero galvanizado y pintado de color azul nos muestra en sus figuras 8(a) y 8(b), las capas de recubrimientos presentes en la lámina de acero galvanizado y pintado. La imagen se observa un poco difusa; debida a la estática originada durante las pruebas. En la parte inferior se evidencia el acero laminado utilizado; seguido de una brecha de recubrimiento de zinc con un espesor de: 14,34 µm. La capa subsiguiente (parte oscura y delgada) tiene espesor de: 5,236 µm, y corresponde a la capa Primer color verte té aplicado por la empresa que suministro las láminas. Finalmente se muestra la capa de acabado con un espesor de: 11,83 µm. [9]

Se observa la presencia de orificios o puntos oscuros, relacionados con gases atrapados o poros (generados en el proceso de solidificación del zinc), y con la velocidad de secado de las pinturas.

Las Figuras 8(c) y 8(d) presentan el análisis del espectro EDS de la lámina galvanizada y recubierta con poliéster de pigmentación azul, mostrando el espectro de todos los elementos químicos presentes en la superficie y muestran una cantidad representativa tanto de aluminio como de hierro, que probablemente reaccionaron para formar un compuesto intermetálico de Fe-Al que mejora la resistencia del recubrimiento a la corrosión. [12]

Figura 8. Micrografía electrónica del acero Galvanizado más recubrimiento azul. a) y b) Imagen corte transversal galvanizado más recubrimientos. c) Porcentajes composicionales del acabado. d) Espectro acabado final pintura azul.



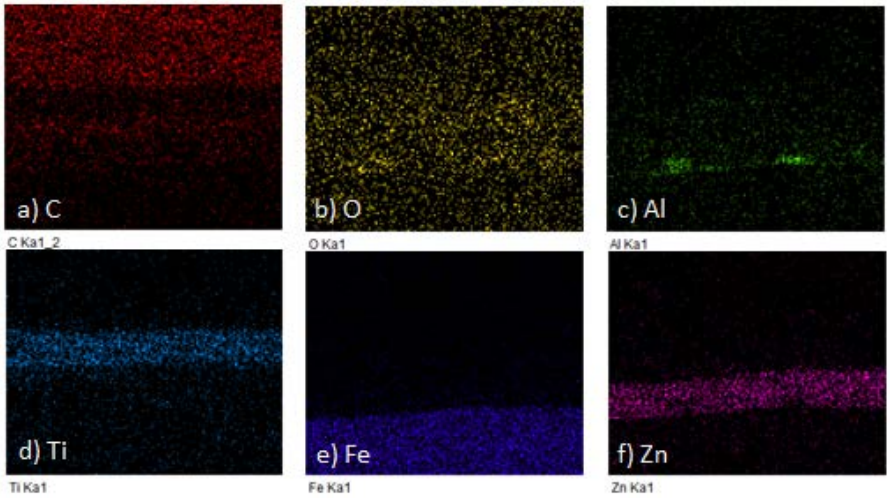
Fuente: los autores

Se observa en la Figura 9, la presencia de los elemento presentes en cada capa del recubrimiento. La figura 9(a), muestra la presencia de carbono en bajas cantidades sobre la muestra estudiada. Cabe aclarar que en la parte superior se observa un alto contenido de carbono; esto es debido a la resina utilizada para el montaje de la probeta estudiada.

En el resto de las imágenes se observa claramente la presencia y distribución de elementos en cada una de las capas del recubrimiento. La figura 9(b), muestra presencia de oxígeno en toda la superficie estudiada; contrario a la figura 9(c), la cual presenta trazas de aluminio, ubicado entre la capa de zinc y el primer, siendo el aluminio uno de los elementos más importantes en el proceso, ya que no solo mejora la resistencia a la corrosión y aumenta el brillo del revestimiento, sino que

asegura una buena adherencia del recubrimiento en el sustrato y le proporciona ductilidad.

Figura 9. Mapping corte transversal. Acero galvanizado más recubrimiento azul

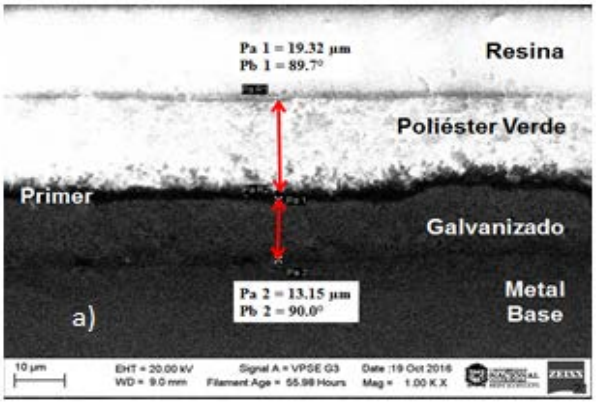


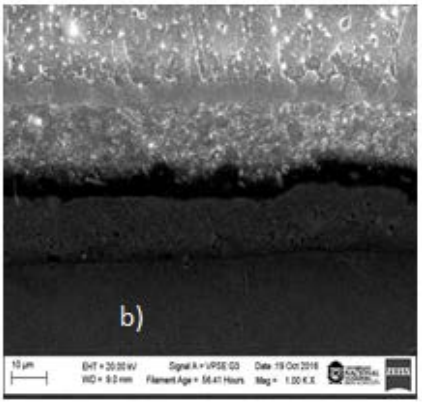
Según la asociación Latinoamericana de zinc – LATIZA – [11], las cantidades de aluminio que debe contener el baño de zinc están entre 0,15 y 0,17% en peso, pero al analizar posteriormente los espectros (anexos Figura C), en la superficie del galvanizado se observa un aumento en la cantidad de este elemento (entre 0,74 y 3,81% en peso); esto se debe a la fuerte afinidad que tiene el aluminio con el hierro, formando una capa de inhibición Fe_2Al_5 que retarda la corrosión, pero no elimina la reacción de compuestos intermetálicos frágiles Fe-Zn. [12]

Para la Figura 9(d), se observa alto contenido de Titanio en la franja correspondiente al acabo de pintura, con un porcentaje del 18,58% en peso, siendo este un alto contenido suministrado como agente retardante de la corrosión. En las Figuras 9(e) y 9(f), se corrobora la presencia de hierro y zinc, afirmando que son las muestra de acero original y su recubrimiento de zinc, con porcentajes de 34,41% en peso, para el zinc (anexos Figura B).

3.1.2 Acero galvanizado y pintado con poliéster de coloración verde. Se muestra un corte transversal de la lámina galvanizada y pintada, con variaciones en el espesor de los recubrimientos, comparada con la muestra galvanizada con acabado pintado de color azul. La capa inferior evidencia un espesor del galvanizado de magnitud: 13,15 µm, y un espesor del acabado final con magnitud de: 19,32 µm. También se observa para el aparte (b), brillo referentes a la luminiscencia generada por el haz y a la orientación de la microestructura de la pintura final. (Figura 10)

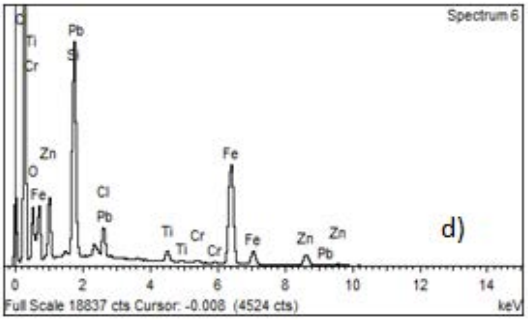
Figura 10. Micrografía electrónica del acero galvanizado más recubrimiento Verde. a) y b) Imagen corte transversal galvanizado más recubrimientos. c) Porcentajes composicionales del acabo. d) Espectro acabado final pintura verde.





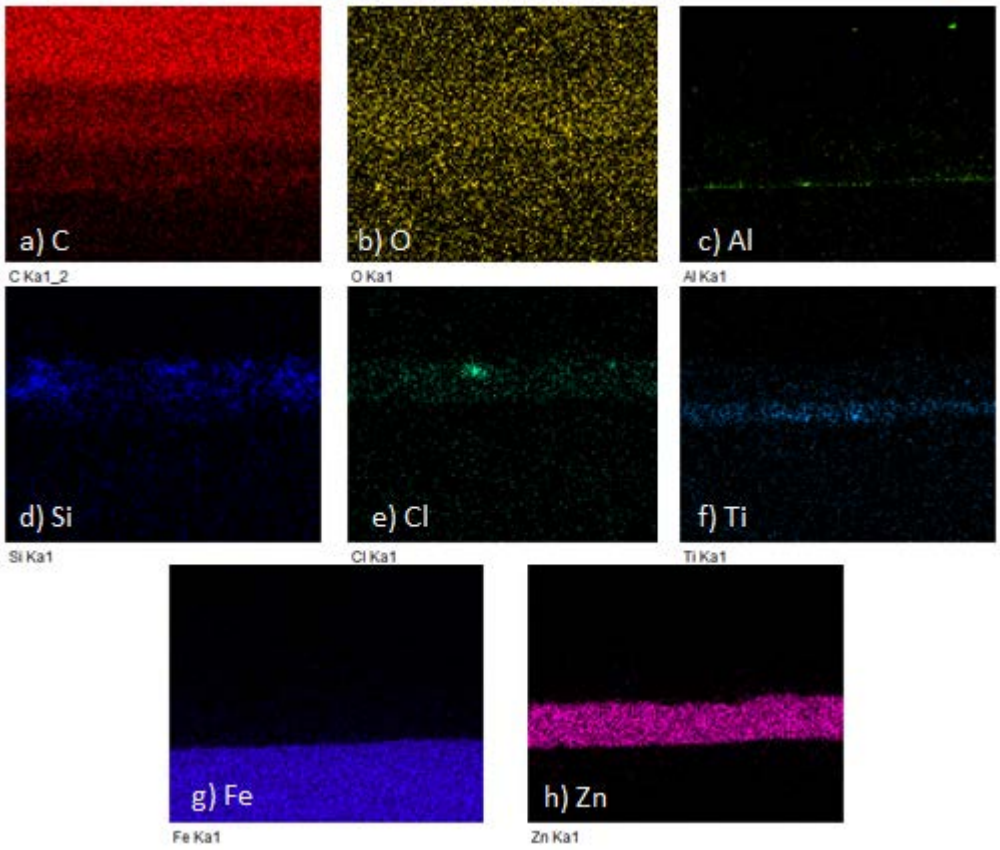
Element	Weight%	Atomic%
O K	18.68	38.93
Si K	23.07	27.39
Cl K	4.09	3.85
Ti K	2.18	1.52

c)



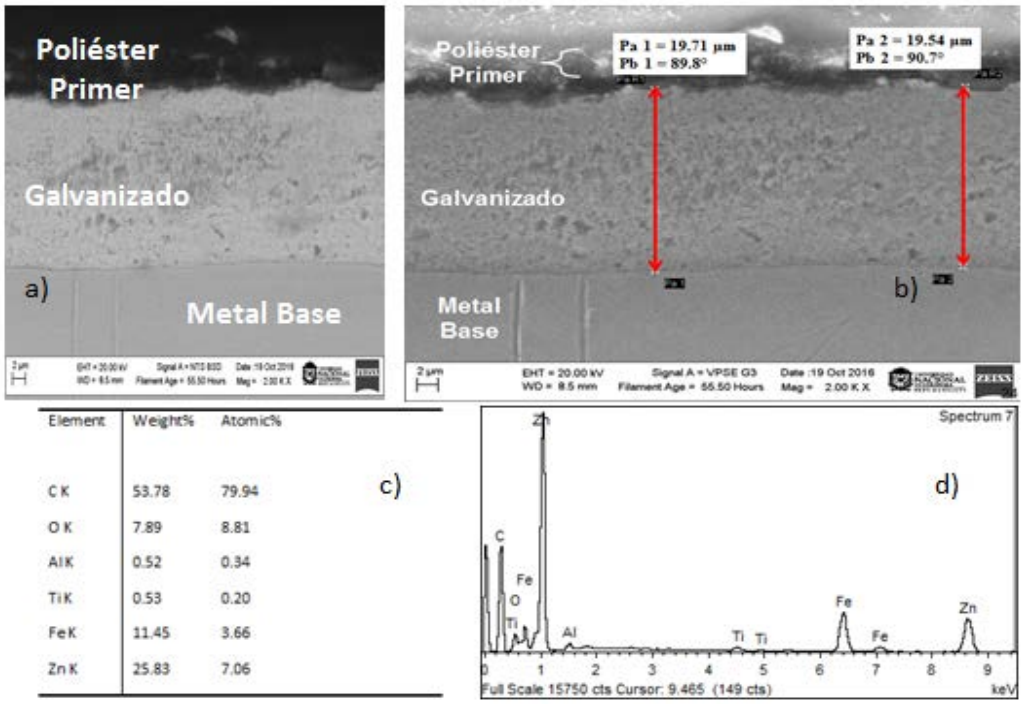
Se muestra en su corte transversal un contenido de Fe del orden de 8.90% en peso sobre la capa galvanizada (Figura 11(g)), presentando una distribución uniforme sobre esta, la cual favorece la interacción metalúrgica de la capa. También se detectó una pequeña cantidad de aluminio, correspondiente al 0,54% en peso (anexo Figura F) añadido al baño de zinc para prevenir el crecimiento de compuestos intermetálicos Fe-Zn. [13]. La Figura 11(c), muestra la presencia de aluminio en toda la superficie, haciendo notable una pequeña traza que corresponde al pre tratado realizado por la empresa.

Figura 11. Mapping corte transversal. Acero galvanizado más recubrimiento Verde.



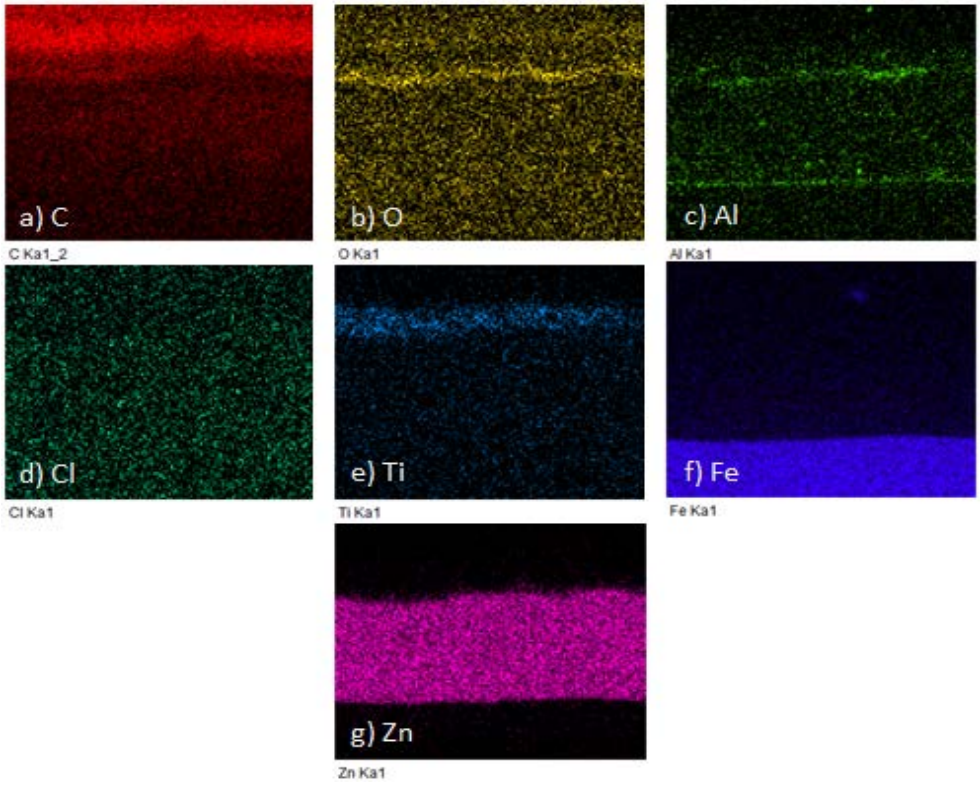
3.1.3 Acero galvanizado y pintado con capa de Primer color verde té. En la microscopia realizada al acero galvanizado y pintado con capa Primer se evidencia a simple vista, una mayor rugosidad (ver Figura 12b) en la superficie comprendida entre la capa Primer (franja oscura) y la capa galvanizada y también se observa la ausencia de defectos por corrosión sobre la superficies de las pinturas. Se registraron dos espesores para la franja correspondiente al recubrimiento galvanizado con el fin de obtener mejor precisión en su medida, esto debido a la no homogeneidad entre los límites del Primer y el galvanizado. Los espesores del galvanizado presentan longitudes de: 19,71 µm y 19,54 µm, mostrando que es una lámina con mayor espesor en comparación con las ya estudiadas; condición que puede atribuirse al bajo desempeño en servicio que puede ofrecer la capa de Primer como único recubrimiento protector del acero galvanizado respecto de los poliéster azul y verde que presentan además del Primer, un acabado final; haciéndose necesario el uso de una capa mayor de galvanizado para compensar dicha deficiencia.

Figura 12. Micrografía electrónica del acero galvanizado más capa de Primer. a) y b) Imagen corte transversal galvanizado más recubrimientos. c) Porcentajes composicionales capa Primer. d) Espectro capa Primer.



En la identificación de elementos presentes a través del Mapping, se encontró para este acero galvanizado, el cual presenta un solo recubrimiento como capa anticorrosiva o capa Primer, la presencia de una zona de pretratado (Figura 13c) depositada entre la superficie de la capa galvanizada y la capa de Primer. Esto con el fin de contrarrestar la precipitación de óxidos de zinc y ofrecer mayor adherencia entre las capas. Se observan elementos propios de la composición de las pinturas tales como O, C, Fe. Igualmente se evidencia un alto contenido de titanio, debido muy seguramente a la presencia de dióxido de titanio como pigmento inhibidor, que forma películas protectoras que retardan el avance de la corrosión hacia el sustrato. [14]

Figura 13. Mapping corte transversal. Acero galvanizado con recubrimiento Primer



3.2 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS)

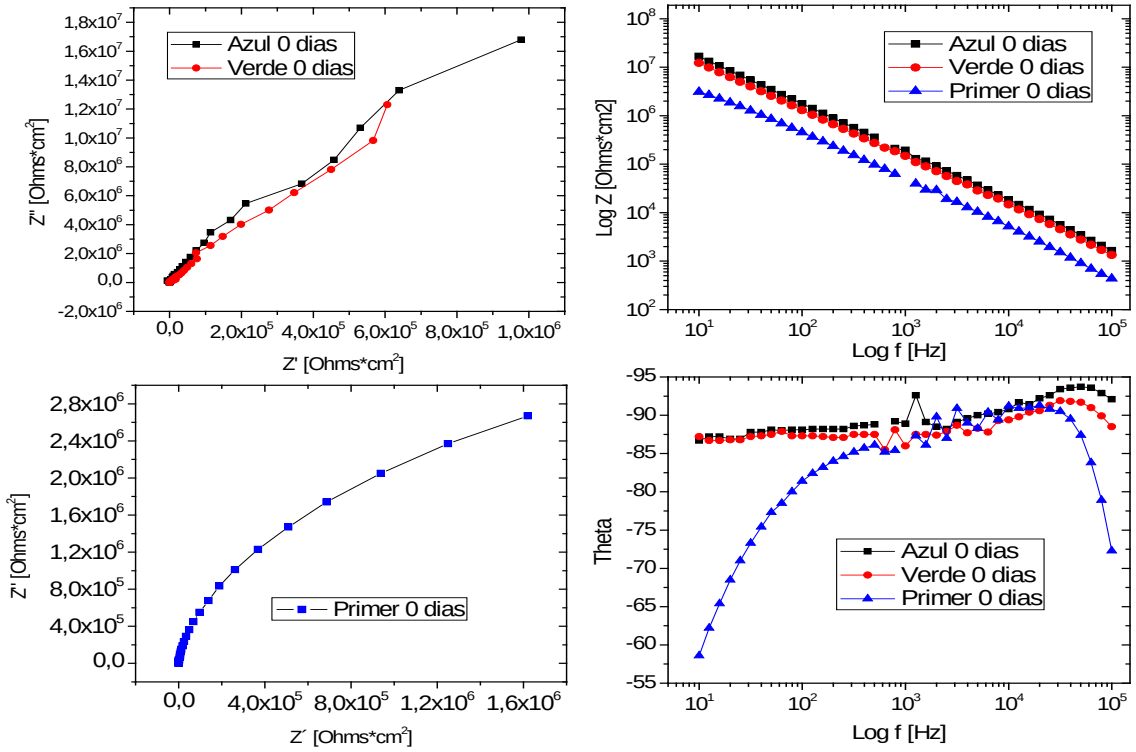
Para los análisis de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) sobre láminas de acero galvanizado y pintado, se realizaron los estudios ya descritos anteriormente para cada lámina a diferentes tiempos de inmersión en las dos soluciones simuladas tanto de lluvia ácida como de ambiente tropical.

3.2.1 Solución que simula ambiente de lluvia ácida. De acuerdo con los diagramas de impedancia (Figura 14), se verifica la trayectoria mostrada por los tres recubrimientos. Se evidencia en el diagrama de Nyquist una similitud en la tendencia de sus recorridos, con algunas variaciones moderadas para las curvas de los recubrimientos azul y verde, denotando un gran aumento tanto en el eje real

como en el imaginario. Se observa la formación de un solo domo en ambas pruebas, mostrando arco capacitivo característico de un recubrimiento intacto o protector [14]. De igual forma, la capa Primer describe un arco capacitivo, pero a diferencia de los otros recubrimientos, se evidencia un valor de impedancia menor (diagrama de Bode donde las pendientes son negativas), lo que lo hace mayormente vulnerable al ataque corrosivo.

Para cero días de inmersión, de los recubrimientos poliésteres azul y verde la impedancia continuó mostrando la misma constante de tiempo (Anexo Figura L y LL).

Figura 14. Diagrama de Nyquist y Bode para t=0 días en solución simulada a lluvia ácida.

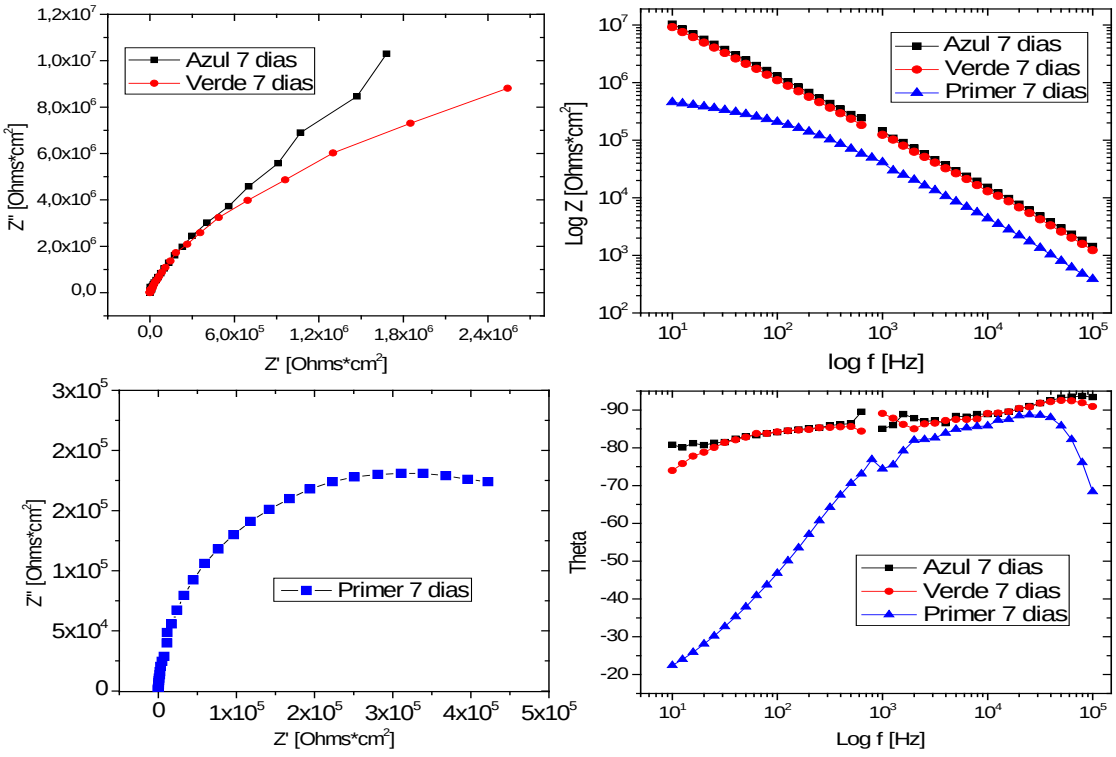


En el diagrama de Nyquist (Figura 15) se muestra, la depresión a la que tiende el arco que describe el comportamiento de la capa Primer. La tendencia es a formar

un semicírculo que representa el deterioro que inicia a sufrir la pintura por acción del ataque corrosivo. Los recubrimientos azul y verde, describen un arco capacitivo característico de un recubrimiento protector [14]. En el diagrama de Bode, se verifica que el valor de impedancia es menor para la capa Primer comparado con los otros dos recubrimientos, la cual es mayor en valor respecto del primer; característica que confiere un mejor desempeño contra la corrosión a los recubrimientos azul y verde. El arco capacitivo del Primer evidencia que su región de acción es controlada por la transferencia de carga [15]. El circuito propuesto para el sistema por ajuste de los datos experimentales se muestra en el Anexo figura M.

Para t=7 días de inmersión de los recubrimientos poliésteres Azul y Verde la impedancia continuó mostrando la misma constante de tiempo (Anexo Figura N y Ñ).

Figura 15. Diagrama de Nyquist y Bode para t=7 días en solución simulada a lluvia ácida.



Para el diagrama de Nyquist (Figura 16), se evidencia que los poliésteres verdes y azul continúan presentando el comportamiento característico de un recubrimiento protector, describiendo un arco capacitivo [14], el cual actúa como un dieléctrico que separa algunas de las cargas del electrólito, de aquellas que son inducidas en el electrodo metálico [16]. En contraposición con lo anterior se observa para la capa Primer, una depresión significativa del arco capacitivo con tendencia a la formación de un semicírculo típico de un recubrimiento al cual han penetrado los agentes corrosivos. Dicho semicírculo es achatado (es decir su centro no estará sobre el eje real de la impedancia), probablemente debido a las heterogeneidades en la superficie o a la acción de productos de corrosión sólidos del substrato que avanzan sobre los defectos del recubrimiento [14]. Se verificarse por comparación en los diagramas de Bode, la caída marcada en el valor de la impedancia para el primer respecto de los otros dos sistemas, lo que también es un indicador importante de la pérdida de capacidad del material para contrarrestar la acción corrosiva. El circuito propuesto para el sistema por ajuste de los datos experimentales se verifica en el Anexo figura O.

Para t=15 días de inmersión de los recubrimientos, poliésteres azul y verde la impedancia continuó mostrando la misma constante de tiempo (Anexo Figura P y Q).

Figura 16. Diagrama de Nyquist y Bode para t=15 días en solución simulada a lluvia ácida.

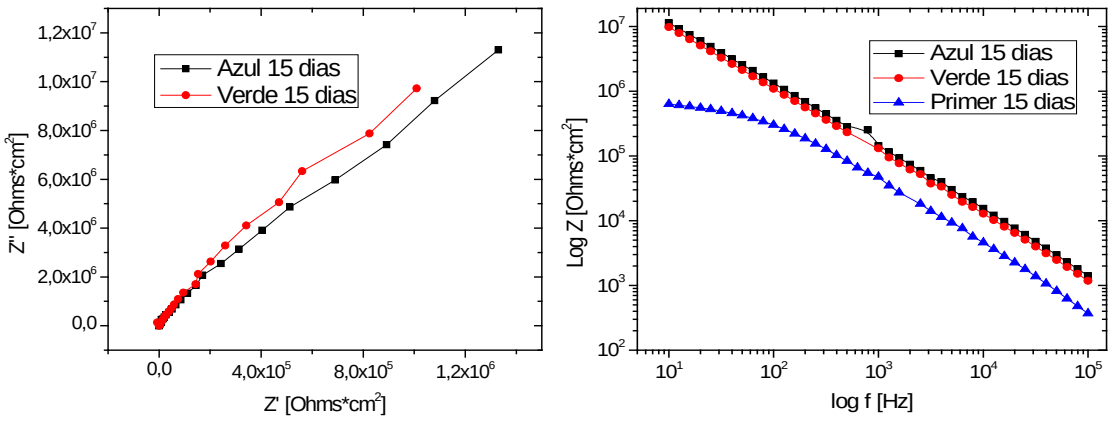
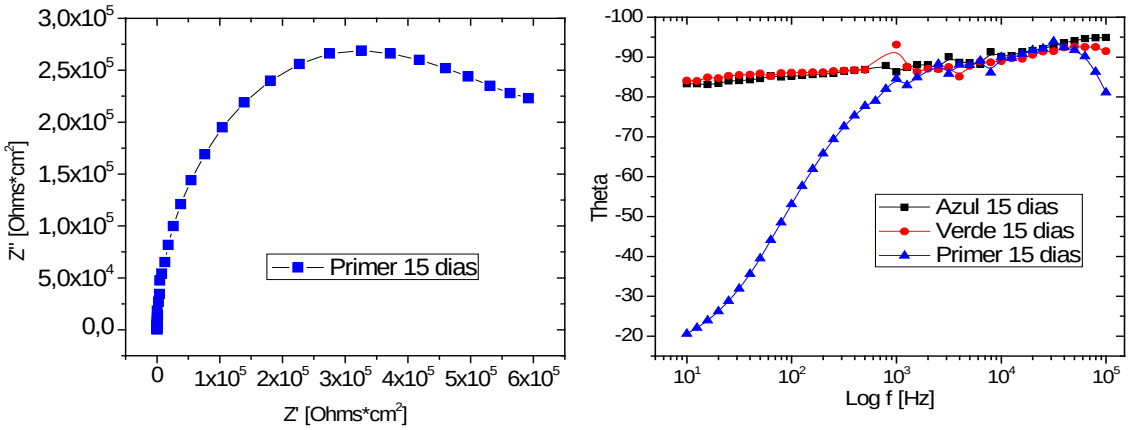


Figura 16. Continúa…

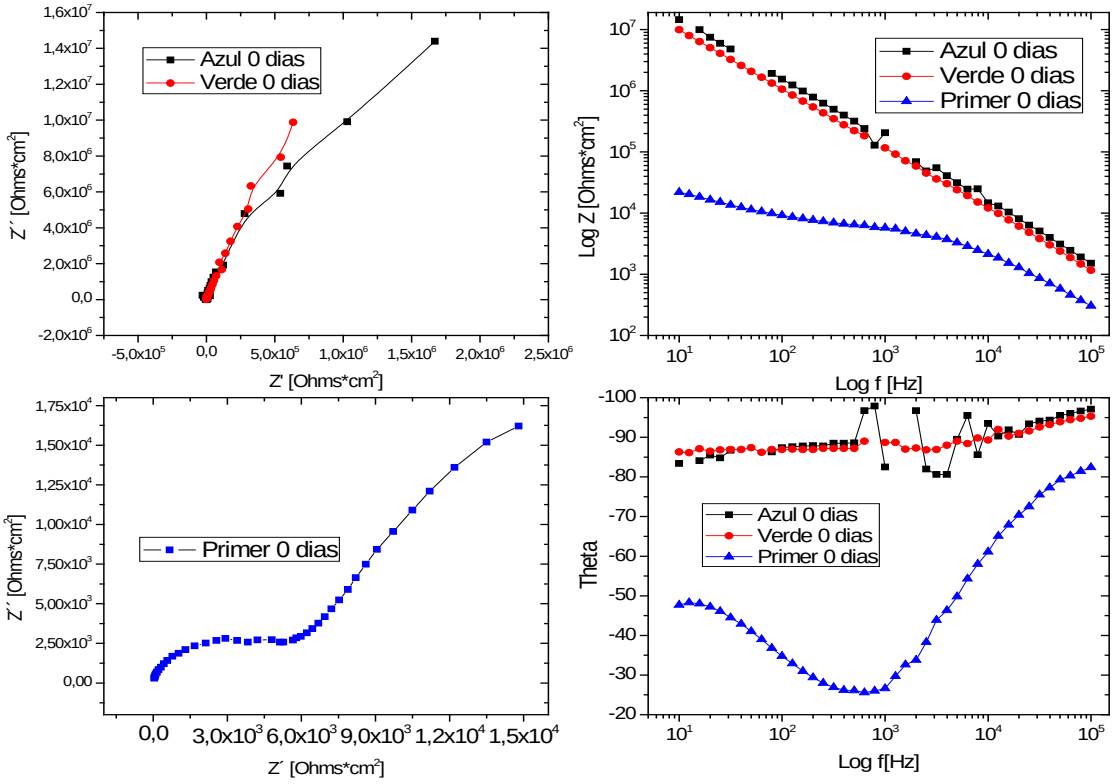


3.2.2 Solución que simula ambiente tropical. Al analizar los diagramas de impedancia de la Figura 17, se observa para la curva descrita por el acero galvanizado pintado con capa de Primer color verde té, la aparición de dos puntos de inflexión, indicando que hay dos constantes de tiempo (diagrama de Bode donde las pendientes son negativas) en la reacción de corrosión; lo cual conlleva a la formación de dos semicírculos o rizos. El espectro característico de un recubrimiento expuesto a alto deterioro por ataque corrosivo. Dichos semicírculos o rizos se relacionan con las dos constantes de tiempo RpCPE y RC [16]. El primer semicírculo se forma a altas frecuencias y se atribuye al proceso de transferencia de carga faradáica o resistencia a la polarización [16-20]; y ofrece información sobre el deterioro al que estuvo sometido el recubrimiento (capa de Primer pintada color verde té) [14]. El segundo semicírculo, se desarrolla a frecuencias intermedias, como respuesta a los procesos relacionados con las reacciones desarrolladas en la superficie del electrodo. Puede verificarse también en el diagrama de Nyquist, que la trayectoria casi recta de la línea del segundo semicírculo, forma entre 45 y 70 grados respecto del eje real de impedancia; comportamiento generado por la difusión de especies a través de la interfase, el cual es simulado en el círculo equivalente por una impedancia de Warburg. [19]

El circuito propuesto para el sistema, por ajuste de los datos experimentales se verifica en el Anexo figura R.

Las contantes de tiempo de los recubrimientos azul y verde para cuando t=0 días fueron distintas respecto de la del primer. (Anexo Figura S y T)

Figura 17. Diagrama de Nyquist y Bode para t=0 días en solución simulada a ambiente tropical.

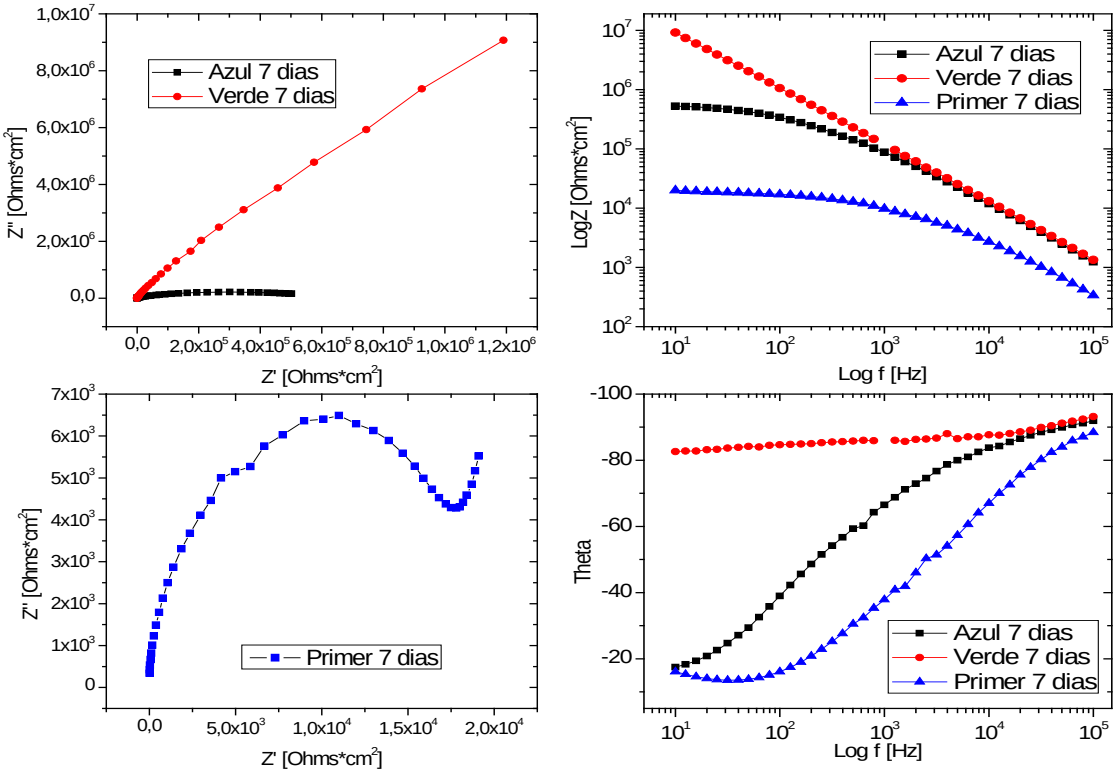


Interpretando los diagramas de impedancia para la Figura 18, para la solución que simula ambiente tropical, se establece una diferencia en el valor de impedancia, principalmente para los recubrimientos poliésteres verde y azul (diagrama de Bode donde las pendientes son negativas) siendo menor par el recubrimiento azul; lo cual refleja un mejor rendimiento frente al ambiente tropical para el poliéster de pigmentación verde. El espectro de la capa Primer color verde té, preserva su

valor de impedancia, frente a la medición anterior para t=0 días. El circuito equivalente obtenido por ajuste de los datos para cuando t=7 días, para el primer se indica en los anexos figura U.

Las contantes de tiempo de los recubrimientos azul y verde para cuando t=7 fueron distintas respecto de la del primer. (Anexo Figura V y W)

Figura 18. Diagrama de Nyquist y Bode para t=7 días en solución simulada a ambiente tropical.

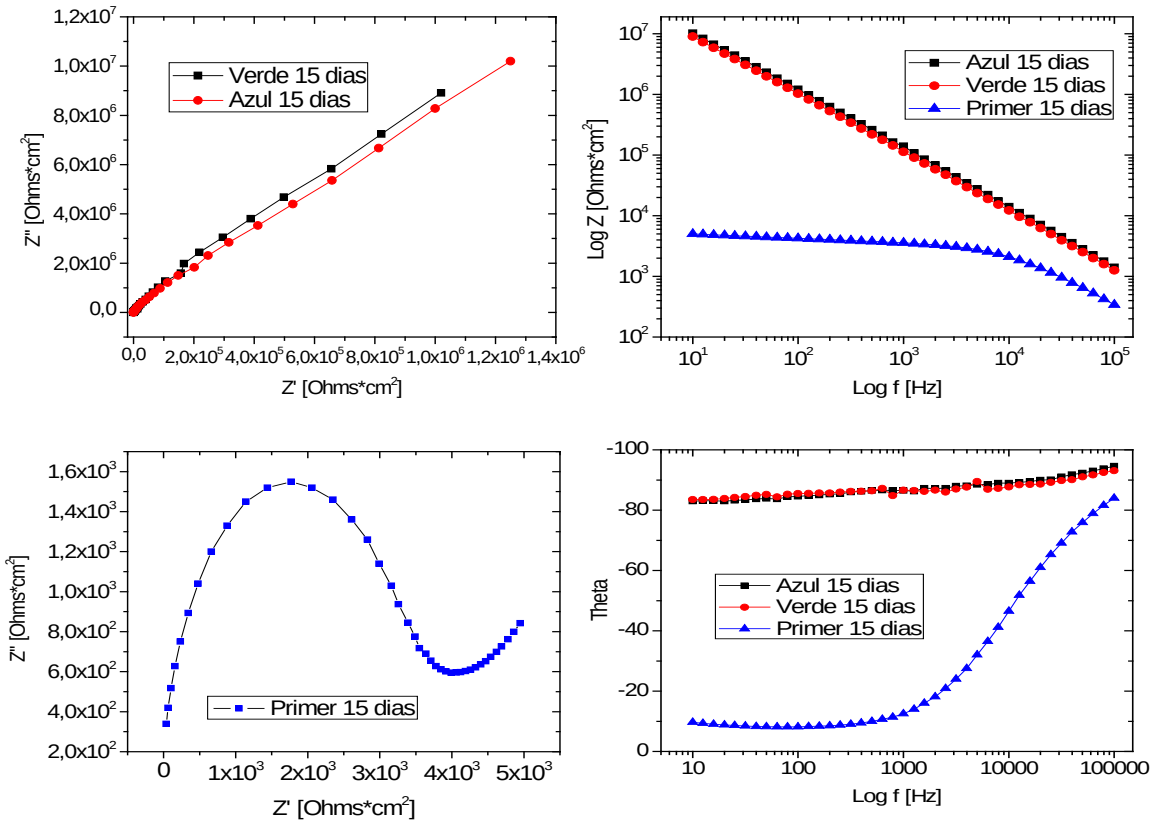


Para el sistema expuesto Figura 19, el aplanamiento en los semicírculos (diagrama de Nyquist. Primer para t=15 días) característico del empleo de elementos de fase constante [16]; obedece según varios autores a la presencia de rugosidades o a superficies heterogéneas, defectología que facilita la acción corrosiva sobre el recubrimiento y en su fase subsiguiente sobre el substrato

metálico. Dicho achatamiento, se sustenta, con el hecho de que cuando en el circuito equivalente, deben incluirse más de un circuito RC (ver anexo figura Y. Primer), la respuesta es una envolvente de varios semicírculos, resultando diagramas de Nyquist aplanados y en consecuencia, ocasionando una disminución en la parte imaginaria de la impedancia. Se observa una recuperación del valor de la impedancia perdido por el recubrimiento azul para t=15 días respecto del sistema cuando t=7 días (ver figura 18 y 19) y por ende la recuperación de su desempeño capacitivo; fenómeno electroquímico que quizá indica, la presencia de una zona pasiva desarrollada durante la reacción de corrosión. Desde el punto de vista técnico los recubrimientos azul y verde mostraron un mejor desempeño de trabajo frente a la acción de los agentes corrosivos en solución simulada tanto de lluvia ácida como de ambiente tropical para los sistemas, correspondientes a 0, 7 y 15 días; esto debido al efecto inhibidor de los pigmentos presentes en ellos frente a las reacciones de corrosión; a mencionar principalmente el silicio, contenido en la resina plástica verde, y el zinc para la pintura azul. El deterioro sufrido por la capa Primer, se atribuye principalmente a la presencia de defectologia, tales como rugosidades y superficies heterogéneas las cuales facilitan el avance de los productos de corrosión a través de la película. El circuito equivalente obtenido por ajuste de los datos a la función de transferencia impedancia cuando t=15 días para el Primer, se muestra en los anexos Figura X.

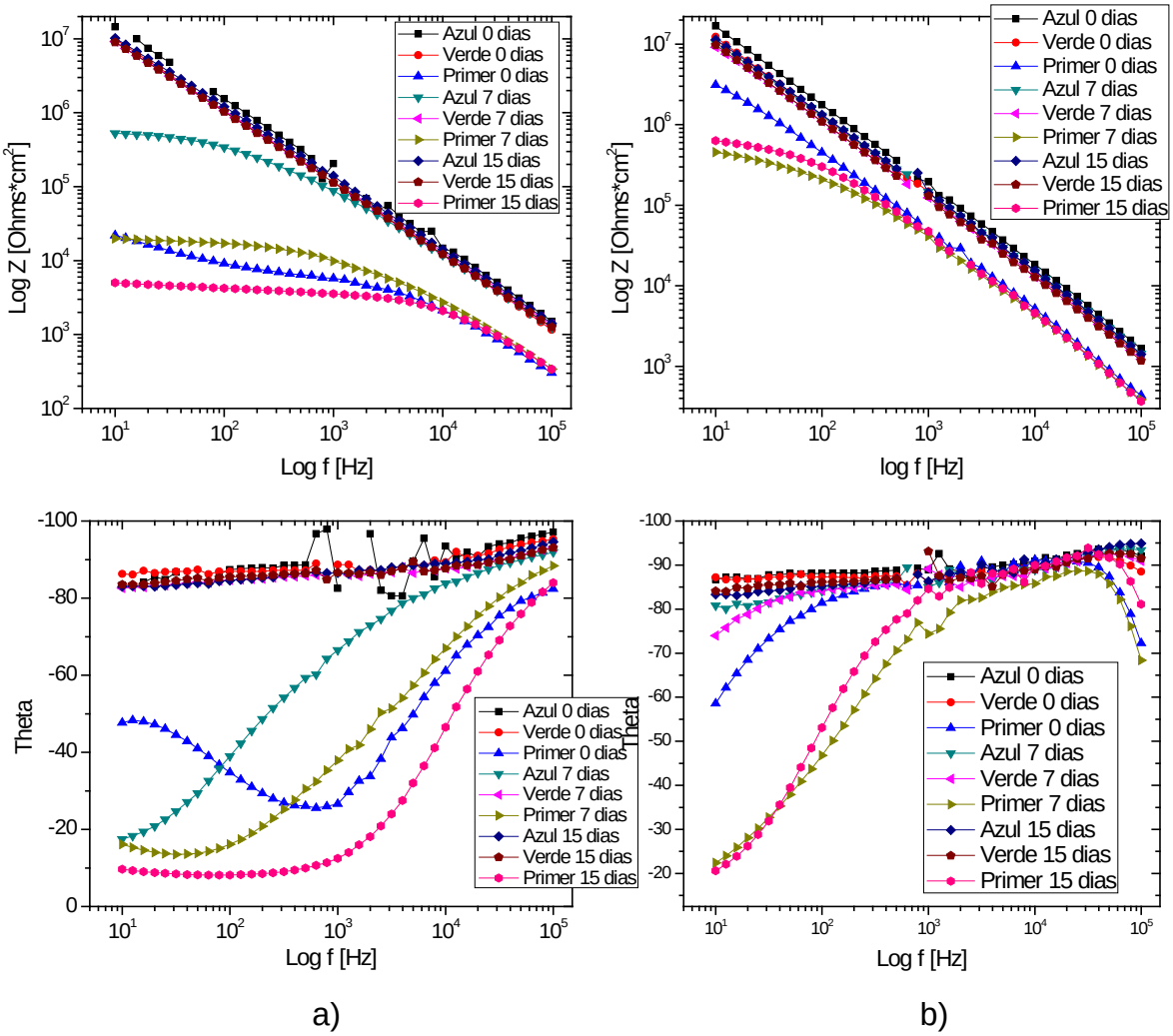
Las constantes de tiempo de los recubrimientos azul y verde para cuando t=15 días fueron distintas respecto de la del Primer. (Anexo: Figura Y y Z)

Figura 19. Diagrama de Nyquist y Bode para t=15 días en solución simulada a ambiente tropical.



Claramente puede verificarse como la impedancia total del sistema (Figura 20), disminuye con el tiempo (en mayor grado para ambiente tropical a) de exposición, de forma análoga la diferencia de fases a altas frecuencias (10exp^5 Hz), también disminuye, mientras que a menores frecuencias (10exp^1 Hz), la diferencia de fase se incrementa (este fenómeno se muestra con claridad para las curvas correspondientes al primer en ambiente tropical), evidenciando de esta forma, la existencia de reacciones electroquímicas en la superficie metálica [20], y mostrando de este modo que este tipo de ambiente (tropical) es más agresivo.

Figura 20. Evolución de los espectros EIS con el tiempo de exposición a las soluciones simuladas. (a) ambiente tropical y (b) ambiente ácido.



Se verifica en la Tabla 4 y 5 la evolución de la resistencia de poro (Rp), de los poliésteres azul, verde y Primer, en función del tiempo y del ambiente simulado. Se concluye que el mejor desempeño ante el ataque corrosivo, en función de las dos variables en mención, y para el mayor periodo de tiempo, lo presenta el poliéster de pigmentación azul respecto de los sistemas verde y Primer, reportando unos valores de resistencia de poro (Rp) de 4.7137E07 y 1.4985E08

para los ambientes simulados a lluvia ácida y tropical respectivamente para cuando t=15 días. El análisis descrito anteriormente, está en concordancia con lo sugerido por Hu et al. de 2009 [21] quien destaca el empleo de la resistencia de poro (Rp) como parámetro electroquímico en la evaluación de la resistencia a la corrosión de un recubrimiento epóxico para un sistema analizado a través de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) a temperatura ambiente. Los valores de Rp descritos en las tablas 4 y 5, se reportan en los circuitos equivalentes anexos.

Tabla 4. Resistencia de poro (Rp) en función del tiempo y el ambiente simulado a lluvia ácida para los poliésteres verde, azul y Primer.

Rp	Resistencia de poro (Ohm*cm^2). poliésteres		
Tiempo (días)	AZUL	VERDE	PRIMER
0	2,117E08	2,5339E08	6,539E06
7	3,2757E07	4,0806E07	2,8991E05
15	4,7137E07	1,934E08	5,343E05

Tabla 5. Resistencia de poro en función del tiempo y el ambiente simulado a ambiente tropical para los poliésteres verde, azul y Primer.

Rp	Resistencia de poro (Ohm*cm^2). poliésteres		
Tiempo (días)	AZUL	VERDE	PRIMER
0	1,4637E08	5,0658E08	5558
7	6,12E05	1,409E08	19508
15	1,4985E08	1,4357E08	3807

4. CONCLUSIONES

Los valores de Rp indicaron, que el mejor desempeño frente a la corrosión, lo muestran los recubrimientos azul y verde, comparada con el Primer. Indicando una superioridad moderada para el poliéster de pigmentación azul respecto del verde.

Se obtuvieron circuitos equivalentes para la evaluación de los datos experimentales en muy buena concordancia con los teóricos; lo que facilita el diseño de mecanismos de protección para los materiales en estudio.

El deterioro de los recubrimientos, es función directa del ambiente al que fue sometido, y del tiempo de exposición; puesto que el mayor deterioro para los recubrimientos, lo generó el ambiente tropical para el mayor tiempo de exposición.
El análisis de SEM-EDS y MAPPING reveló que a temperatura ambiente, la superficie se encuentra cubierta por elementos que retardan la corrosión y cuenta con películas protectoras que brindan mejores propiedades resistivas al deterioro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PEÑA-BALLESTEROS, D.Y.; AMADOR, A.S.; ESTUPIÑÁN-DURAN, H.A.; SIERRA-FAJARDO, D., y QUINTERO-ASCANIO, L. "Corrosión de un Acero Galvanizado en un Ambiente que contiene Cloruros y Sulfatos mediante Técnicas Electroquímicas", Informador Técnico (Colombia), vol. 79 (2), Julio-Dic. 2015. 127-136

[2] F.J SÁNCHEZ, Alejandra, R. RUIZ Lucas. Causas y Consecuencias de la Corrosión de una Tubería de Acero Galvanizado / / Dpto. Construcciones Arquitectónicas II, K.U.A.T. de Sevilla. 2001.

[3] "The influence of electrode polarization on corrosion beneath paint". Volume 74, Issue 3, July 2001, Pages 549–554

[4] Mechanism degradation of galvanized steel in dry cyclic environment containing ions of clorure¨ Corrosion science / volume 46, issue 2. 2004.

[5] GONZÁLEZ GUZMÁN, Jorge Antonio Protección Frente a la Corrosión Metálica con Recubrimientos Poliméricos: Estudio Electroquímico y Micro Electroquímico" /. 2009.

[6] Efectos de pH y Cl^- concentración en el comportamiento de la corrosión del acero galvanizado en solución capa de óxido simulada. Revista Ciencia de la Corrosión / Volumen 65. 2012.

[7] SUÁREZ CORRALES, Xenia, VILLAR-LÓPEZ René Valentino, CORVO-PÉREZ, Francisco Eduardo. Resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento. Centro de Investigación en Corrosión - Universidad

Autónoma de Campeche / Laboratorio de Ensayos de Tropicalización - Centro de Servicios Tecnológicos, La Habana, Cuba. Marzo de 2013.

[8] L. FENG, S. TING-WEI, S. DA-YONG, H. EN-HOU. “Corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy in simulated acid rain solution”, Stake Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 11oo16, China. 2010.

[9] Ficha Técnica “Acero Pre-Pintado” ACESCO. Disponible en: http://www.acesco.com/archivos/descargas/acero-pre-pintado-ficha-tecnica.pdf.

[10] ASTM G109-97 – 2003 – Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixture on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments.

[11] ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE CINC -LATIZA-. GalvinfoNotes, El rol del aluminio en el galvanizado continúo por inmersión en caliente. Junio de 2007.

[12] RAMÍREZ-JEREZ, J.A.; VALERO-ALVARADO, M.; PEÑA-BALLESTEROS, D.Y. y TORRES-RAMÍREZ, J.E. "Influencia del tamaño del cristal de cinc de láminas de acero galvanizadas en ambientes que contienen cloruros y sulfatos", Fac. Ing., vol. 24 (39), pp. 99–108, Mayo-Ago. 2015.

[13] P. R. SERÉ, C. DEYÁ, C. I. ELSNER, A. R. Di SARLI., “Corrosion of Painted Galvanneal Steel”, Science Direct 8 (2015) 1 – 10.

[14] VESGA LOPEZ, L.F.; “Estudio Acerca de los Mecanismos de Protección Contra la Corrosión de Recubrimientos Orgánicos Usando Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)”. Bucaramanga, 2004. Trabajo de Maestría

(Escuela de Física). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Básicas.

[15] MENDOZA FLORES, J., DURAN ROMERO, R., GENESCA LLONGUERAS, J.; “Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión

[16] PIRATOBA MORALES, U., MARIÑO CAMARGO, A., OLAYA FLOREZ, J.J.; “Impedancia Electroquímica – Interpretación de Diagramas Típicos con Circuitos Equivalentes”. Dyna, Año 77, Nro. 164, pp. 69-75. Medellin, (2010).

[17] DA SILVA, P.S.G., COSTA, A.N.C., MATTOS, O.R.; “Evaluation of the corrosión behavior of galvannealed Steel in chloride aqueous solution and in tropical marine environment. Journal of Applied Electrochemistry”, (2006) 36: 375-383.

[18] SIKA. “Manual de Recubrimientos para Metal”. Edición 2005. Disponible en: col.sika.com/dms/getdocument.

[19] TAYLOR, R., and GILEADI, E.; “Physical Interpretation of the Warburg impedance”. Corrosion Science Vol. 51 Issue 9.

[20] VESGA, L.F., VERA, E., PANQUEVA Y.; “El uso de los Análisis de EIS para el Reconocimiento de los Diferentes Mecanismos de Protección de Pigmentos Anticorrosivos en Recubrimientos Orgánicos”. 6to Congreso Colombiano de Protección y Corrosión. Santa Fe de Bogotá. Octubre 31-Noviembre 2 (2001).

[21] HU, J., X. Li, J. Gao, and Q. Zhao, UV aging characterization of epoxy varnish coated steel upon exposure to artificial weathering environment. Materials & Design, 2009. 30(5): p. 1542-1547.

BIBLIOGRAFÍA

ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE CINC -LATIZA-. GalvinfoNotes, El rol del aluminio en el galvanizado continúo por inmersión en caliente. Junio de 2007.

ASTM G109-97 – 2003 – Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixture on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments.

DA SILVA, P.S.G., COSTA, A.N.C., MATTOS, O.R.; “Evaluation of the corrosión behavior of galvannealed Steel in chloride aqueous solution and in tropical marine environment. Journal of Applied Electrochemistry”, (2006) 36: 375-383.

Efectos de pH y Cl^- concentración en el comportamiento de la corrosión del acero galvanizado en solución capa de óxido simulada. Revista Ciencia de la Corrosión / Volumen 65. 2012.

F.J SÁNCHEZ, Alejandra, R. RUIZ Lucas. Causas y Consecuencias de la Corrosión de una Tubería de Acero Galvanizado / / Dpto. Construcciones Arquitectónicas II, K.U.A.T. de Sevilla. 2001.

Ficha Técnica “Acero Pre-Pintado” ACESCO. Disponible en: http://www.acesco.com/archivos/descargas/acero-pre-pintado-ficha-tecnica.pdf.

GONZÁLEZ GUZMÁN, Jorge Antonio Protección Frente a la Corrosión Metálica con Recubrimientos Poliméricos: Estudio Electroquímico y Micro Electroquímico” /. 2009.

HU, J., X. Li, J. Gao, and Q. Zhao, UV aging characterization of epoxy varnish coated steel upon exposure to artificial weathering environment. Materials & Design, 2009. 30(5): p. 1542-1547.

L. FENG, S. TING-WEI, S. DA-YONG, H. EN-HOU. “Corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy in simulated acid rain solution”, Stake Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 11oo16, China. 2010.

Mechanism degradation of galvanized steel in dry cyclic environment containing ions of clorure¨ Corrosion science / volume 46, issue 2. 2004.

MENDOZA FLORES, J., DURAN ROMERO, R., GENESCA LLONGUERAS, J.; “Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión

P. R. SERÉ, C. DEYÁ, C. I. ELSNER, A. R. Di SARLI., “Corrosion of Painted Galvanneal Steel”, Science Direct 8 (2015) 1 – 10.

PEÑA-BALLESTEROS, D.Y.; AMADOR, A.S.; ESTUPIÑÁN-DURAN, H.A.; SIERRA-FAJARDO, D., y QUINTERO-ASCANIO, L. “Corrosión de un Acero Galvanizado en un Ambiente que contiene Cloruros y Sulfatos mediante Técnicas Electroquímicas”, Informador Técnico (Colombia), vol. 79 (2), Julio-Dic. 2015. 127-136

PIRATOBA MORALES, U., MARIÑO CAMARGO, A., OLAYA FLOREZ, J.J.; “Impedancia Electroquímica – Interpretación de Diagramas Típicos con Circuitos Equivalentes”. Dyna, Año 77, Nro. 164, pp. 69-75. Medellin, (2010).

RAMÍREZ-JEREZ, J.A.; VALERO-ALVARADO, M.; PEÑA-BALLESTEROS, D.Y. y TORRES-RAMÍREZ, J.E. "Influencia del tamaño del cristal de cinc de láminas de

acero galvanizadas en ambientes que contienen cloruros y sulfatos", Fac. Ing., vol. 24 (39), pp. 99–108, Mayo-Ago. 2015.

SIKA. “Manual de Recubrimientos para Metal”. Edición 2005. Disponible en: col.sika.com/dms/getdocument.

SUÁREZ CORRALES, Xenia, VILLAR-LÓPEZ René Valentino, CORVO-PÉREZ, Francisco Eduardo. Resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento. Centro de Investigación en Corrosión - Universidad Autónoma de Campeche / Laboratorio de Ensayos de Tropicalización - Centro de Servicios Tecnológicos, La Habana, Cuba. Marzo de 2013.

TAYLOR, R., and GILEADI, E.; “Physical Interpretation of the Warburg impedance”. Corrosion Science Vol. 51 Issue 9.

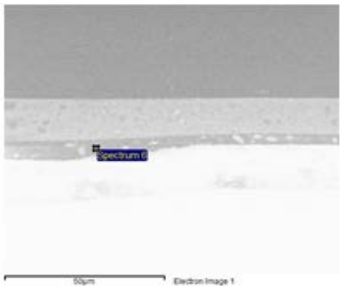
The influence of electrode polarization on corrosion beneath paint. Volume 74, Issue 3, July 2001, Pages 549–554.

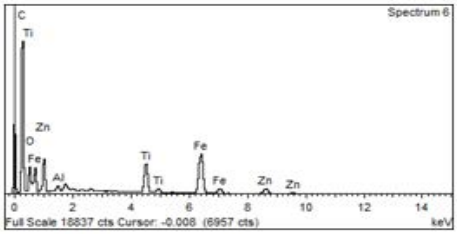
VESGA LOPEZ, L.F.; “Estudio Acerca de los Mecanismos de Protección Contra la Corrosión de Recubrimientos Orgánicos Usando Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)”. Bucaramanga, 2004. Trabajo de Maestría (Escuela de Física). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Básicas.

VESGA, L.F., VERA, E., PANQUEVA Y.; “El uso de los Análisis de EIS para el Reconocimiento de los Diferentes Mecanismos de Protección de Pigmentos Anticorrosivos en Recubrimientos Orgánicos”. 6to Congreso Colombiano de Protección y Corrosión. Santa Fe de Bogotá. Octubre 31-Noviembre 2 (2001).

ANEXOS

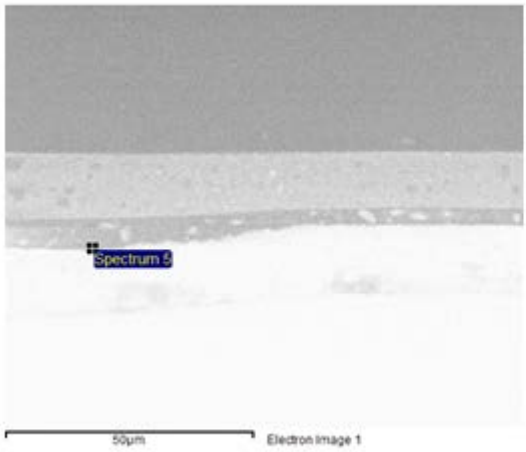
ANEXO A. SEM PARA LAMINAS DE ACERO GALVANIZADO Y PINTADO

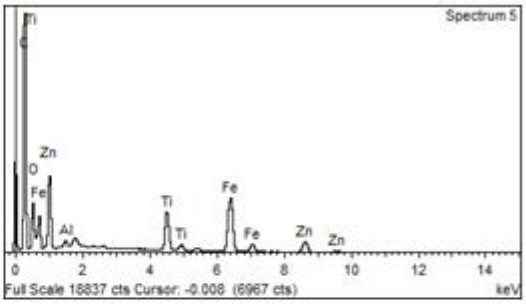




Element	Weight%	Atomic%
C K	57.76	75.89
O K	17.01	16.78
Al K	0.44	0.26
Ti K	5.50	1.81
Fe K	14.60	4.13
Zn K	4.70	1.13

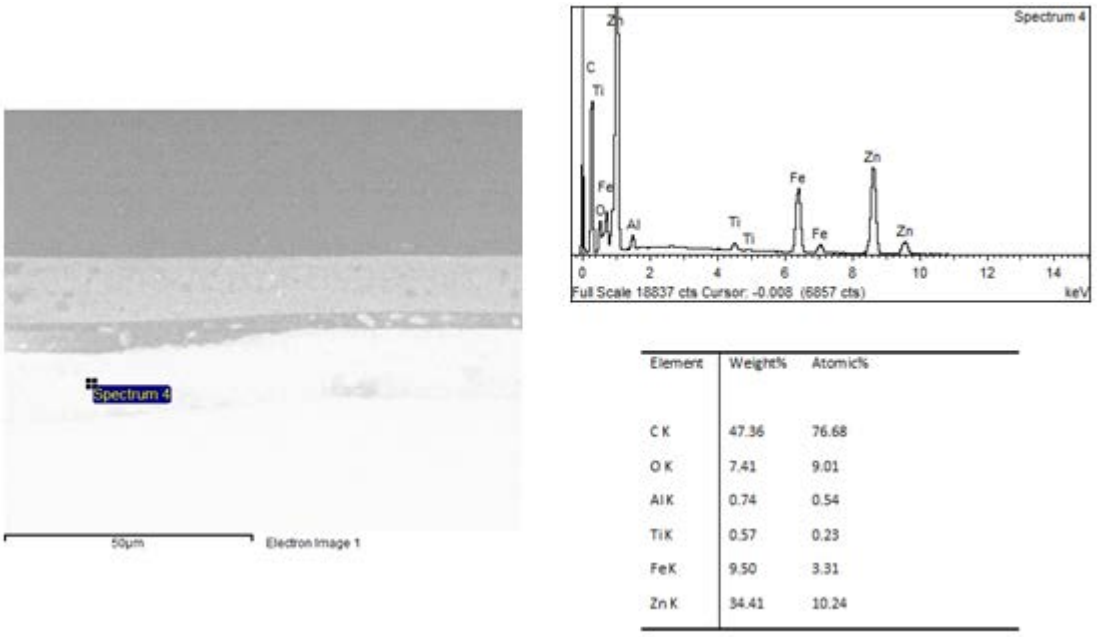
Figura A. Espectro y composición sobre el recubrimiento Primer (Acero galvanizado con poliéster azul)





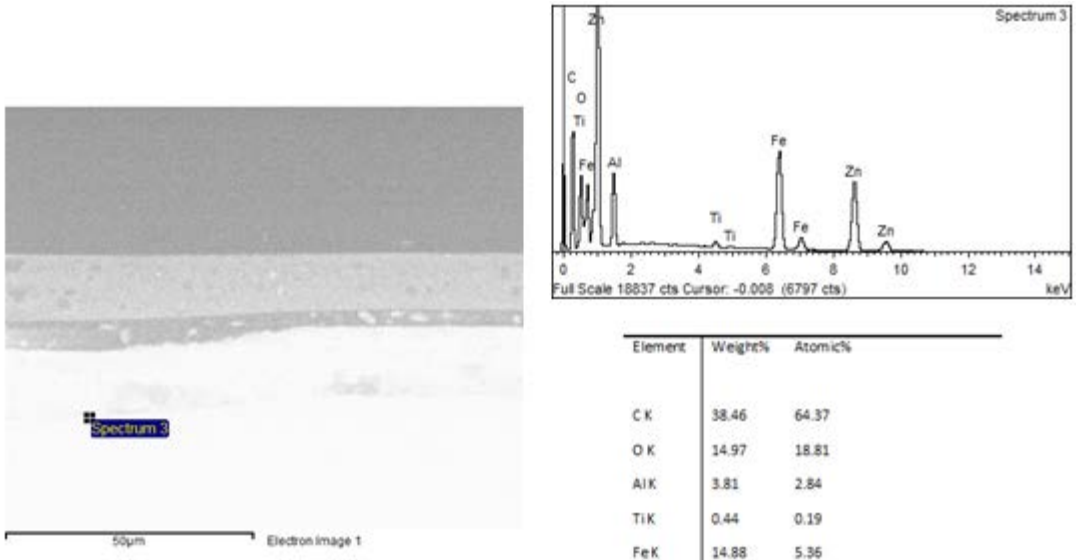
Element	Weight%	Atomic%
C K	57.27	74.56
O K	19.22	18.79
Al K	0.35	0.20
Ti K	4.53	1.48
Fe K	12.61	3.53
Zn K	6.02	1.44

Figura B. Espectro y composición sobre el Primer-galvanizado (Acero galvanizado con poliéster azul)



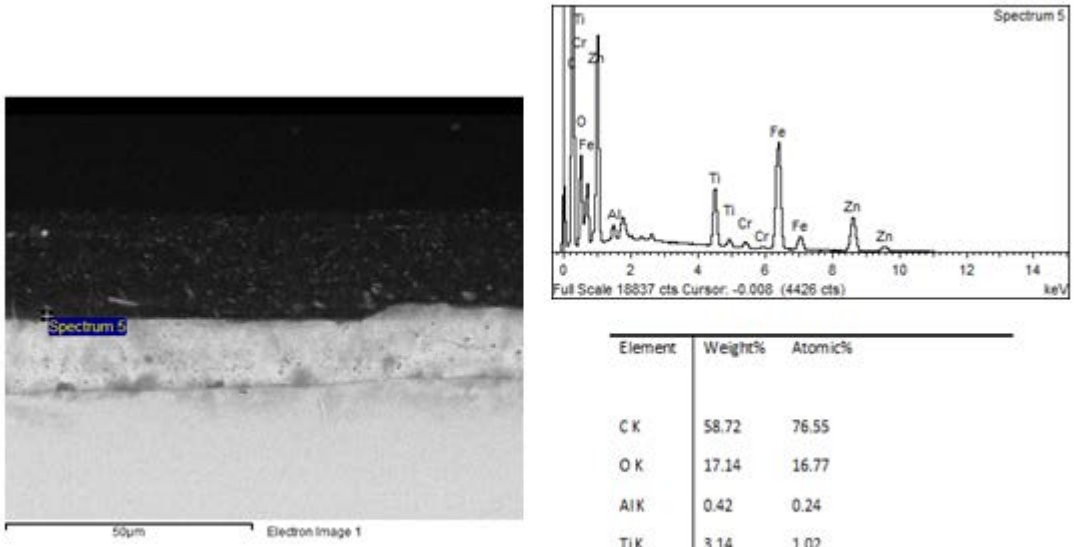
Element	Weight%	Atomic%
C K	47.36	76.68
O K	7.41	9.01
Al K	0.74	0.54
Ti K	0.57	0.23
Fe K	9.50	3.31
Zn K	34.41	10.24

Figura C. Espectro y composición sobre el galvanizado (Acero galvanizado con poliéster azul)



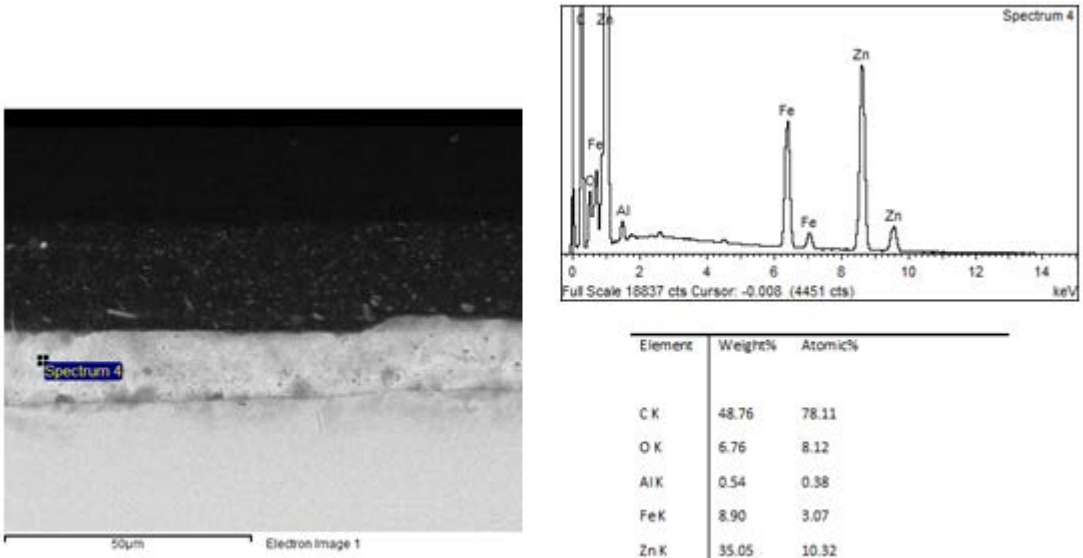
Element	Weight%	Atomic%
C K	38.46	64.37
O K	14.97	18.81
Al K	3.81	2.84
Ti K	0.44	0.19
Fe K	14.88	5.36
Zn K	27.43	8.44

Figura D. Espectro y composición sobre galvanizado-acero (Acero galvanizado con poliéster azul)



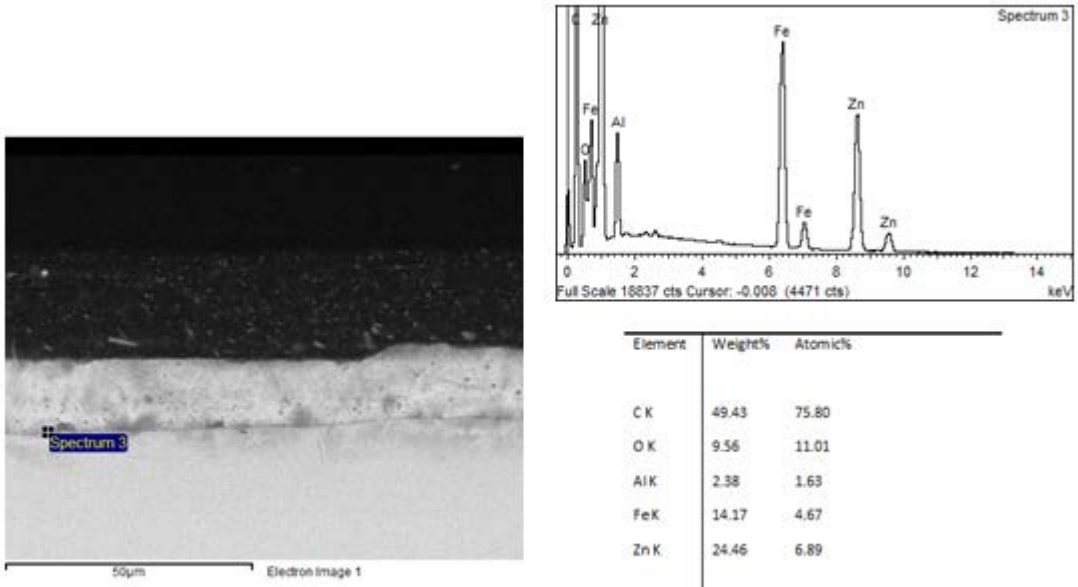
Element	Weight%	Atomic%
C K	58.72	76.55
O K	17.14	16.77
Al K	0.42	0.24
Ti K	3.14	1.02
Cr K	0.42	0.13

Figura E. Espectro y composición sobre Primer (Acero galvanizado con poliéster verde)



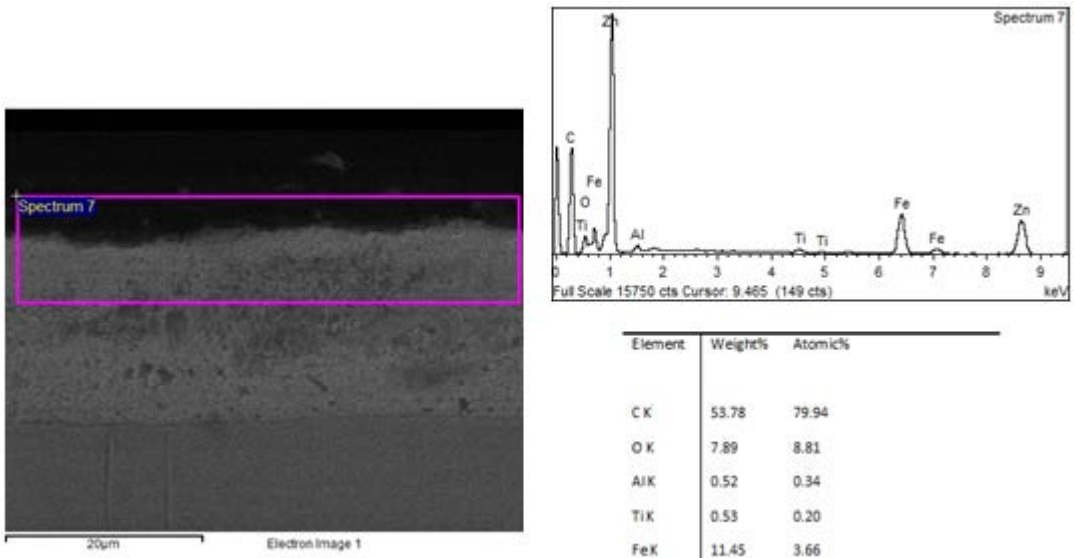
Element	Weight%	Atomic%
C K	48.76	78.11
O K	6.76	8.12
Al K	0.54	0.38
Fe K	8.90	3.07
Zn K	35.05	10.32
Totals	100.00	

Figura F. Espectro y composición sobre galvanizado (Acero galvanizado con poliéster verde)



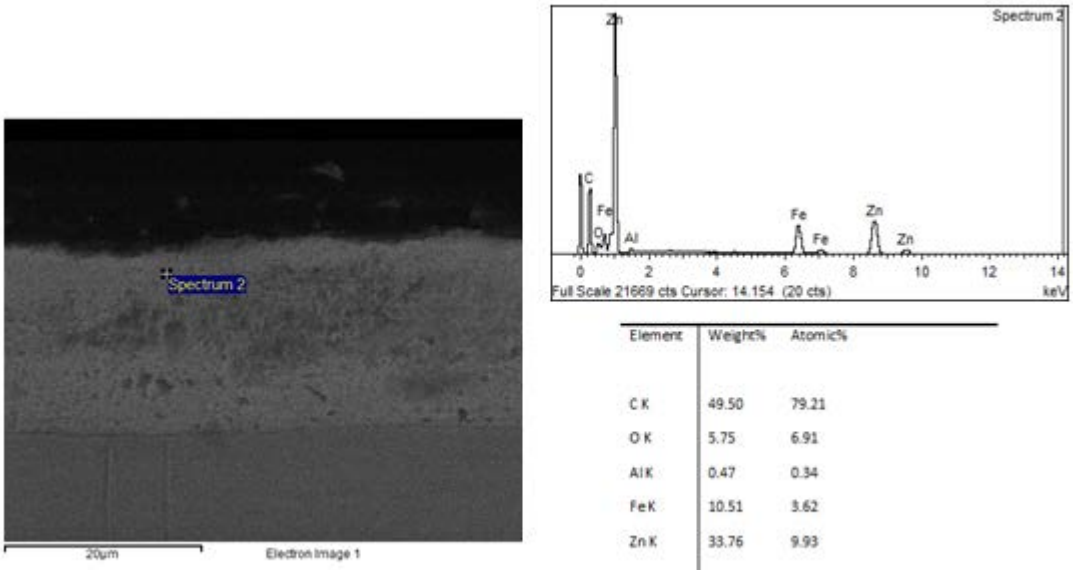
Element	Weight%	Atomic%
C K	49.43	75.80
O K	9.56	11.01
Al K	2.38	1.63
Fe K	14.17	4.67
Zn K	24.46	6.89
Totals	100.00	

Figura G. Espectro y composición sobre galvanizado-acero (Acero galvanizado con poliéster verde)



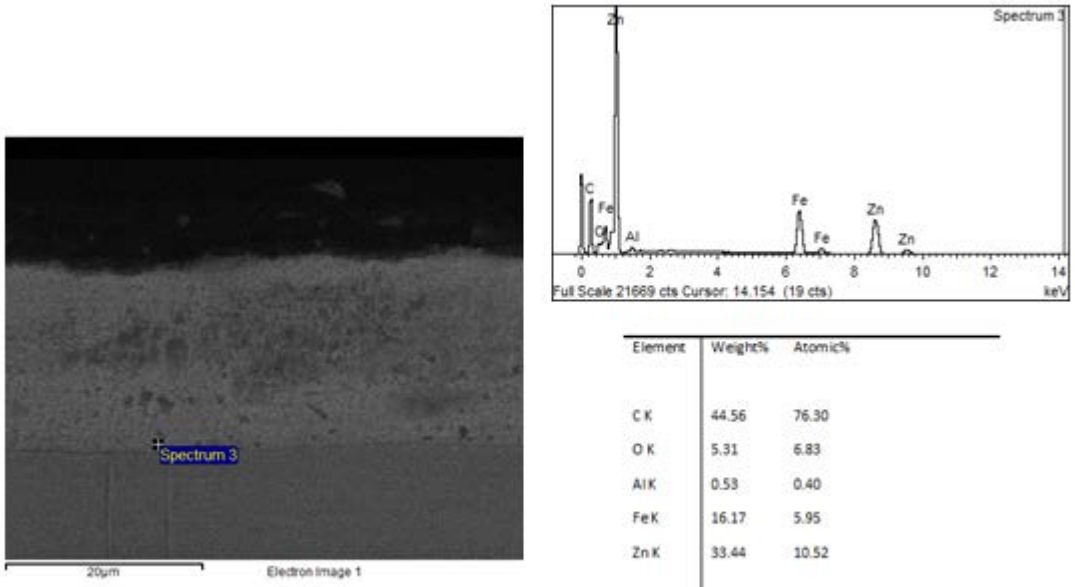
Element	Weight%	Atomic%
C K	53.78	79.94
O K	7.89	8.81
Al K	0.52	0.34
Ti K	0.53	0.20
Fe K	11.45	3.66
Zn K	25.83	7.06

Figura H. Espectro y composición sobre Primer-galvanizado (Acero galvanizado superficie Primer)



Element	Weight%	Atomic%
C K	49.50	79.21
O K	5.75	6.91
Al K	0.47	0.34
Fe K	10.51	3.62
Zn K	33.76	9.93
Totals	100.00	

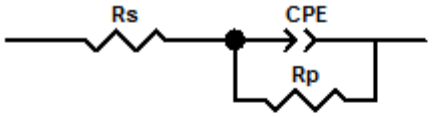
Figura I. Espectro y composición sobre galvanizado (Acero galvanizado superficie Primer)



Element	Weight%	Atomic%
C K	44.56	76.30
O K	5.31	6.83
Al K	0.53	0.40
Fe K	16.17	5.95
Zn K	33.44	10.52
Totals	100.00	

Figura J. Espectro y composición sobre galvanizado-acero (Acero galvanizado superficie Primer)

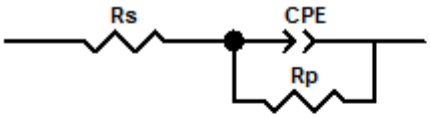
ANEXO B. DIAGRAMAS EQUIVALENTES PARA LAMINAS DE ACERO GALVANIZADO Y PINTADO



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-559,5	334,89	59,855
CPE-T	Free(±)	4,9097E-09	1,9842E-10	4,0414
CPE-P	Free(±)	0,95199	0,0052874	0,5554
Rp	Free(±)	6,539E06	3,8822E05	5,937

Chi-Squared:	0,0096226
Weighted Sum of Squares:	0,15396

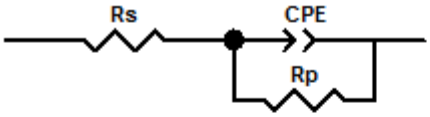
Figura K. Circuito equivalente para la solución simulada a lluvia ácida, t=0 días (Primer).



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-552,9	66,232	11,979
CPE-T	Free(±)	9,8008E-10	8,5962E-12	0,87709
CPE-P	Free(±)	0,98799	0,0010388	0,10514
Rp	Free(±)	2,2117E08	4,0243E07	18,196

Chi-Squared:	0,0027001
Weighted Sum of Squares:	0,032401

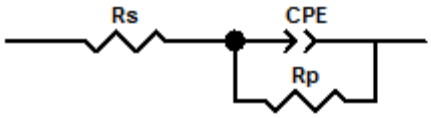
Figura L. Circuito equivalente para la solución simulada a lluvia ácida, t=0 días (poliéster azul)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-262,5	50,884	19,384
CPE-T	Free(±)	1,4091E-09	2,1822E-11	1,5486
CPE-P	Free(±)	0,97777	0,0017106	0,17495
Rp	Free(±)	2,5339E08	1,3902E08	54,864

Chi-Squared:	0,0091895
Weighted Sum of Squares:	0,16541

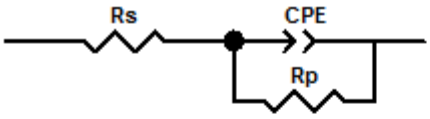
Figura LL. Circuito equivalente para la solución simulada a lluvia ácida, t=0 días (poliéster verde)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-75,31	47,832	63,513
CPE-T	Free(±)	6,5626E-09	5,3378E-10	8,1337
CPE-P	Free(±)	0,9488	0,0081578	0,8598
Rp	Free(±)	2,8991E05	19107	6,5907

Chi-Squared:	0,014089
Weighted Sum of Squares:	0,19725

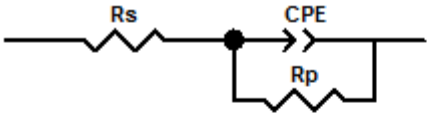
Figura M. Circuito equivalente para la solución simulada a lluvia ácida, t=7 días (Primer).



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-393	66,474	16,915
CPE-T	Free(±)	1,5204E-09	3,4082E-11	2,2416
CPE-P	Free(±)	0,96715	0,0023934	0,24747
Rp	Free(±)	3,2757E07	5,7727E06	17,623

Chi-Squared:	0,0086536
Weighted Sum of Squares:	0,13846

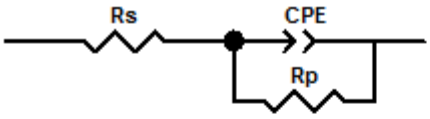
Figura N. Circuito equivalente para la solución simulada a lluvia ácida, t=7 días (poliéster azul)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-405	70,712	17,46
CPE-T	Free(±)	1,918E-09	3,9575E-11	2,0633
CPE-P	Free(±)	0,95802	0,0023584	0,24617
Rp	Free(±)	4,0806E07	3,5058E06	8,5914

Chi-Squared:	0,0073662
Weighted Sum of Squares:	0,13259

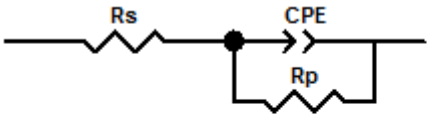
Figura Ñ. Circuito equivalente para la solución simulada a lluvia ácida, t=7 días (poliéster verde)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-235,4	69,06	29,337
CPE-T	Free(±)	5,0166E-09	2,6552E-10	5,2928
CPE-P	Free(±)	0,96568	0,005662	0,58632
Rp	Free(±)	5,343E05	21066	3,9427

Chi-Squared:	0,0083468
Weighted Sum of Squares:	0,11685

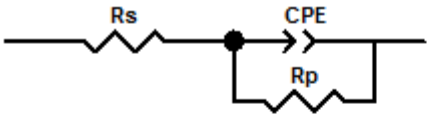
Figura O. Circuito equivalente para la solución simulada a lluvia ácida, t=15 días (Primer).



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-453,6	72,274	15,933
CPE-T	Free(±)	1,4262E-09	3,4675E-11	2,4313
CPE-P	Free(±)	0,97206	0,0025976	0,26723
Rp	Free(±)	4,7137E07	1,2426E07	26,361

Chi-Squared:	0,0091925
Weighted Sum of Squares:	0,14708

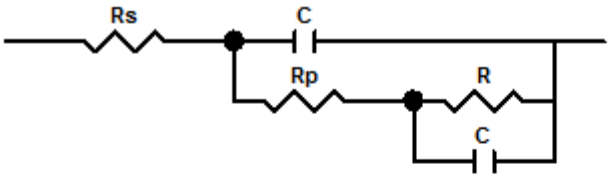
Figura P. Circuito equivalente para la solución simulada a lluvia ácida, t=15 días (poliéster azul)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-491,1	117,11	23,846
CPE-T	Free(±)	1,8661E-09	3,4644E-11	1,8565
CPE-P	Free(±)	0,96193	0,0022269	0,2315
Rp	Free(±)	1,934E08	6,5982E07	34,117

Chi-Squared:	0,0073332
Weighted Sum of Squares:	0,132

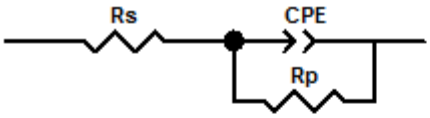
Figura Q. Circuito equivalente para la solución simulada a lluvia acida, t=15 días (poliéster verde)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(+)	192,3	88,439	45,99
C	Free(+)	7,1761E-09	4,2292E-10	5,8935
Rp	Free(+)	5558	272,89	4,9099
R	Free(+)	10002	3073,7	30,731
C	Free(+)	1,7449E-07	2,5634E-08	14,691

Chi-Squared:	0,015938
Weighted Sum of Squares:	0,17532

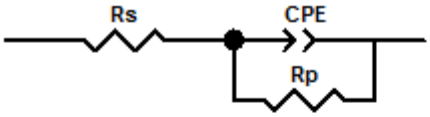
Figura R. Circuito equivalente para la solución simulada a ambiente tropical, t=0 días (Primer).



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-351,4	524,31	149,21
CPE-T	Free(±)	1,1345E-09	2,4158E-11	2,1294
CPE-P	Free(±)	0,98683	0,0029714	0,30111
Rp	Free(±)	1,4637E08	2,1937E07	14,987

Chi-Squared:	0,006841
Weighted Sum of Squares:	0,041046

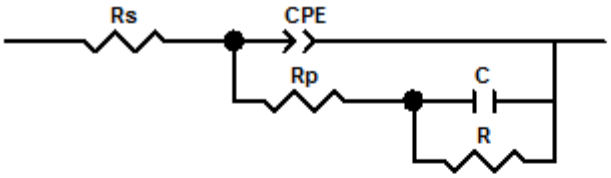
Figura S. Circuito equivalente para la solución simulada a ambiente tropical, t=0 días (poliéster azul)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-494,7	57,189	11,56
CPE-T	Free(±)	1,8242E-09	9,7509E-12	0,53453
CPE-P	Free(±)	0,96968	0,00071201	0,073427
Rp	Free(±)	5,0658E08	1,2036E08	23,759

Chi-Squared:	0,0006539
Weighted Sum of Squares:	0,0078468

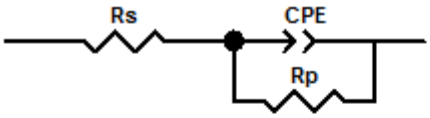
Figura T. Circuito equivalente para la solución simulada a ambiente tropical, t=0 días (poliéster verde)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-352,1	58,738	16,682
CPE-T	Free(±)	1,0167E-07	1,6234E-08	15,967
CPE-P	Free(±)	0,73618	0,015751	2,1396
Rp	Free(±)	19508	573,64	2,9405
C	Free(±)	2,6247E-06	3,8765E-07	14,769
R	Free(±)	38552	45872	118,99

Chi-Squared:	0,0069438
Weighted Sum of Squares:	0,13888

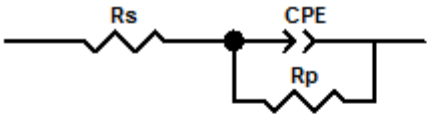
Figura U. Circuito equivalente para la solución simulada a ambiente tropical, t=7 días (Primer).



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-6945	1814,2	26,122
CPE-T	Free(±)	1,4061E-08	2,1103E-09	15,008
CPE-P	Free(±)	0,76121	0,018452	2,424
Rp	Free(±)	6,12E05	26284	4,2948

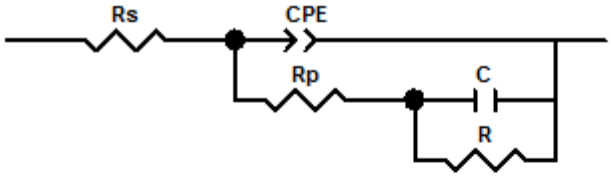
Chi-Squared:	0,0097788
Weighted Sum of Squares:	0,15646

Figura V. Circuito equivalente para la solución simulada a ambiente tropical, t=7 días (poliéster azul)



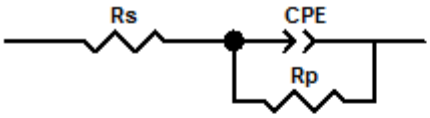
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-388	68,972	17,776
CPE-T	Free(±)	2,0706E-09	2,2005E-11	1,0627
CPE-P	Free(±)	0,9512	0,0012745	0,13399
Rp	Free(±)	1,409E08	2,1468E07	15,236
Chi-Squared:		0,0017331		
Weighted Sum of Squares:		0,034661		

Figura W. Circuito equivalente para la solución simulada a ambiente tropical, t=7 días (poliéster verde)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-71,88	15,696	21,836
CPE-T	Free(±)	2,0396E-08	2,9027E-09	14,232
CPE-P	Free(±)	0,88131	0,012483	1,4164
Rp	Free(±)	3807	62,795	1,6495
C	Free(±)	1,5264E-06	2,4348E-07	15,951
R	Free(±)	1076	105,13	9,7704
Chi-Squared:		0,0027127		
Weighted Sum of Squares:		0,048828		

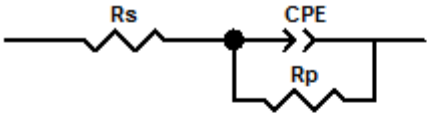
Figura X. Circuito equivalente para la solución simulada a ambiente tropical, t=15 días (Primer).



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-946,1	287,8	30,42
CPE-T	Free(±)	1,8013E-09	3,9861E-11	2,2129
CPE-P	Free(±)	0,95382	0,002787	0,29219
Rp	Free(±)	1,4985E08	4,1326E07	27,578

Chi-Squared:	0,0072625
Weighted Sum of Squares:	0,13072

Figura Y. Circuito equivalente para la solución simulada a ambiente tropical, t=15 días (poliéster azul)



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rs	Free(±)	-218,4	37,591	17,212
CPE-T	Free(±)	2,0334E-09	2,4038E-11	1,1822
CPE-P	Free(±)	0,95984	0,0013962	0,14546
Rp	Free(±)	1,4357E08	2,5981E07	18,096

Chi-Squared:	0,0032775
Weighted Sum of Squares:	0,052441

Figura Z. Circuito equivalente para la solución simulada a ambiente tropical, t=15 días (poliéster verde)