

**ESTUDIO ELECTROQUÍMICO DE UN ACERO GALVANIZADO PINTADO
EXPUESTO A DIFERENTES MEDIOS DE CLORUROS Y SULFATOS.**

**ALEXANDER CARRASCAL CARRASCAL
LUIS FERNANDO MARTINEZ SUAREZ**

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

2015

**ESTUDIO ELECTROQUÍMICO DE UN ACERO GALVANIZADO PINTADO
EXPUESTO A DIFERENTES MEDIOS DE CLORUROS Y SULFATOS.**

**ALEXANDER CARRASCAL CARRASCAL
LUIS FERNANDO MARTINEZ SUAREZ**

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

DIRECTOR:

**DARIO YESID PEÑA BALLESTEROS
Ph.D CORROSIÓN**

CODIRECTOR:

**JHON EDISSON TORRES RAMIRÉZ
INGENIERO METALURGICO**

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

2015

DEDICATORIA

A Dios por permitirme alcanzar este gran pasó en mi vida, quien me ha sostenido en sus manos en todo momento. Dándome la sabiduría necesaria para terminar este proyecto.

A mi madre Luz Stella Suarez , por brindarme su apoyo, comprensión y sobre todo su gran amor que me brinda todos los días, y permitirme ser la persona que soy hoy en día, por enseñarme a conseguir mis sueños sin descansar, por darme fuerzas cuando sentí que no podía más, eres la mejor madre del mundo mil gracias por todos tus consejos.

A mi tío José Orlando Suarez, quien ha sido un segundo padre para mí, gracias por todo el apoyo en los momentos que lo necesite y por creer siempre en mí

A mi hermana Johanna por acompañarme en todo momento; por tener un abrazo, una sonrisa gracias por todos los momentos felices que hemos pasado.

A mi sobrina Mariana (cachetona) que es un angelito que ha llegado alegrar nuestras vidas con su sonrisa y ternura.

A mis abuelos Ana y Pedro por sus palabras sabias y ayuda brindada a lo largo de toda mi vida.

A mi familia en general que de una u otra forma me brindaron apoyo y colaboración en toda mi carrera mil gracias los quiero mucho.

LUIS FERNANDO MARTINEZ SUAREZ

DEDICATORIA

A mis Familiares a todos y para cada uno que siempre me acompañaron a cumplir esta meta; mi Padre que con su ejemplo me enseñó el caminar en la vida no es fácil; mi Madre que su amor es la esperanza por todo lo que luché día a día, a mis hermanos orgullo y modelos a seguir.

A mis amigos, compañeros, camaradas y parceros que por más de este lustro de estudio, trabajo y sacrificio diario acompañaron en todas circunstancias y por los que ya no también gracias.

A Todos absolutamente a todos muy agradecidos por conseguir esta meta tan añorada y que nunca dejó de ser un sueño de los muchos que quedan por conseguir a todas estas palabras:

*“Dale vida a los sueños que alimentan el alma,
No los confundas nunca con realidades vanas.
Y aunque tu mente sienta necesidad, humana,
De conseguir las metas y de escalar montañas,
Nunca rompas tus sueños, porque matas el alma
No te rindas que la vida es eso,
Continuar el viaje,
Perseguir tus sueños,
Destabar el tiempo,
Correr los escombros,
Y destapar el cielo.”*

(Fragmento de: No te rindas y dale vida a tus Sueños. Mario Benedetti)

Y gracias Dios por que ante todo está la voluntad tuya, si no es por ti estas palabras no serían hechos como hoy los son. Junto a ti grandes metas me esperan.

ALEXANDER CARRASCAL CARRASCAL

AGRADECIMIENTOS

Al Director de proyecto PhD Darío Yesid Peña Ballesteros, por su confianza, su apoyo y guía en el desarrollo de esta investigación.

Al Co-Director Ing. Jhon Edison Torres, sin su colaboración no se hubiese podido llevar a cabo esta investigación.

Al grupo de investigación en corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander estudiantes de pregrado, y de maestría, por la capacitación y colaboración en el desarrollo de esta tesis.

Al laboratorio de Rayos-X del Parque Tecnológico Guatiguará adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión quien nos prestó sus servicios.

Al laboratorio de Microscopia del parque Tecnológico Guatiguará adscrito a la vicerrectoría de investigación y Extensión quien nos prestó sus servicios.

Al Msc. Físico Ferney Vesga por su colaboración, amabilidad y sus conocimientos aportados ayuda.

Ambrosio Carrillo Carrillo técnico adscrito a la escuela ingeniería metalúrgica por su ayuda su gran colaboración y su permanente disponibilidad en el proyecto y ayuda en la cámara salina.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	19
2.1 GENERALIDADES	19
2.2 MECANISMO DE CORROSIÓN EN EL ACERO GALVANIZADO	19
2.2.1 Mecanismo anódico	20
2.2.2 Mecanismo catódico.	21
2.3 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS	22
2.3.1 Espectroscopia de impedancia electroquímica.	22
2.3.2. Resistencia a la polarización (Rp).....	23
3. ESTADO DEL ARTE.....	26
4 METODOLOGÍA	31
4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	32
4.2 ADAPTACION DE LA CELDA PARA LAS PRUEBAS.....	32
4.3 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA	33
4.3.1. Material de trabajo.	33
4.3.2 Solución de trabajo.	36
4.4 DISEÑO EXPERIMENTAL ESTADISTICO.....	36
4.5 PRUEBAS EXPERIMENTALES	37

4.5.1 Cámara salina.....	37
4.5.2 Pruebas Electroquímicas.....	37
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
5.1. VELOCIDADES DE CORROSIÓN EXPERIMENTALES.....	41
5.2 LÁMINAS NORMALES EN CONCENTRACIONES ALTAS EXPUESTAS EN CÁMARA SALINA DURANTE 16 Y 32 DÍAS.....	42
5.3 LÁMINAS RAYADAS EN CONCENTRACIONES BAJA EXPUESTAS EN CÁMARA SALINA DURANTE 16 Y 32 DÍAS.....	48
5.4 CIRCUITO EQUIVALENTE.....	53
5.4.1 Circuito equivalente lamina normal concentraciones alta evaluado en punto extremo.....	53
5.5 ANÁLISIS SUPERFICIAL.....	54
6. CONCLUSIONES.....	57
7. RECOMENDACIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXOS.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades Mecánicas de las láminas galvanizadas	33
Tabla 2. Composición del acero galvanizado y pintado	33
Tabla 3. Variables utilizadas concentraciones de cloruros y sulfatos [g/ 400 ml]	36
Tabla 4. Concentraciones a utilizar	36
Tabla 5. Norma ASTM B 117 para cámara salina de niebla	37

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de las etapas del proyecto de investigación.	31
Figura 2. Microestructura Lámina galvanizada y pintada.	34
Figura 3. Micrografía superficial del Acero Galvanizado y Pintado Mediante SEM lámina no expuesta a cámara salina. Magnificación 200x	35
Figura 4. Espectro EDS de la superficie del Acero Galvanizado y pintado en condiciones de no exposición a cámara salina.	35
Figura 5. Técnicas electroquímicas y condiciones de trabajo	39
Figura 6. Lámina normal la cual muestra los puntos analizados para las pruebas electroquímicas.	40
Figura 7. Lámina Rayada la cual muestra los puntos analizados para las pruebas electroquímicas.	41
Figura 8. Curvas potenciodinámicas obtenidas a 16 y 32 días expuestas en cámara salina a concentraciones altas.	43
Figura 9. Curvas de Nyquist: (a) Punto medio a 32 días de exposición. (b) Punto extremo a 32 días de exposición. (c) punto medio a 16 días de exposición. (d) Punto extremo a 16 días de exposición.	44
Figura 10. Diagrama de Bode para concentraciones altas.	47
Figura 11. Ángulo de fase vs frecuencia para concentraciones altas.	48
Figura 12. Curvas correspondientes a: curvas de polarización potencio dinámicas.	49
Figura 13. Curvas de Nyquist: (a) Punto x_3 a 32 días de exposición. (b) Punto x_1 a 32 días de exposición. (c) punto x_1 a 16 días de exposición. (d) Punto x_3 a 16 días de exposición.	50
Figura 14. Diagrama de Bode para concentraciones bajas en láminas rayadas. ..	52
Figura 15. De ángulo de fase vs impedancia en concentraciones bajas en áminas rayadas.	53

Figura 16. Circuito equivalente.53

Figura 17. SEM para lámina con ralladuras expuestas a 32 días. (a) Zona de mayor concentración de Zn, (b). Zona de concentración de Fe, (c). Zona concentración del producto formado sobre superficie, (d). Producto de corrosión formado en la superficie del material).55

Figura 18. Concentraciones de elementos en la superficie56

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Fotografías del montaje.....	63
Anexo B. Método de cálculo de la velocidad de corrosión a partir de la resistencia a la polarización lineal.....	66
Anexo C. Curvas adicionales correspondientes a Nyquist curvas de polarización potenciodinámicas, bode y ángulo de fase	72
Anexo D. Circuito equivalente.....	77
Anexo E. Análisis de caracterización.....	80
Anexo F. Velocidad de corrosión de un acero galvanizado	82

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO ELECTROQUIMICO DE UN ACERO GALVANIZADO Y PINTADO EXPUESTO A DIFERENTES MEDIOS DE CLORUROS Y SULFATOS.*

AUTORES: MARTINEZ SUAREZ, Luis Fernando; CARRASCAL CARRASCAL, Alexander. **

PALABRAS CLAVES: Corrosión, Impedancia, Recubrimientos

DESCRIPCIÓN: En este trabajo se estudió el comportamiento anticorrosivo de láminas de acero galvanizadas y pintadas con un poliéster estándar. Se expusieron a ensayos de corrosión acelerada por medio de una cámara salina siguiendo la norma ASTM B 117 (niebla salina en NaCl y Na₂SO₄) a un tiempo máximo de 768 horas; luego evaluadas por medio de técnicas electroquímicas como Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), Resistencia a la polarización (RP) y Curvas Potenciodinámicas para mirar la velocidad de corrosión.

La evaluación electroquímica se realizó junto a chequeos visuales, considerados demasiados subjetivos por su alta dependencia de la experiencia de la persona que realiza el chequeo, y además, por su limitación de conocer los mecanismos de degradación de las interfaces. Como respuesta a esta necesidad, aparece la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica, la cual permite acompañar el proceso de degradación de los recubrimientos a lo largo del tiempo, de manera rápida y cuantitativa. Se le hace además seguimiento a la permeabilidad que pueda tener dicha película a agentes que favorezcan la corrosión y a la presencia de procesos corrosivos en la interface.

Por último, se realiza un análisis superficial mediante caracterización de microscopia de barrido óptico (SEM) y difracción de rayos X (DRX) en el material con el fin de examinar la morfología de la superficie como los productos que allí se formaron (SO₄) (OH) 6Cl (H₂O)₆ que ayudaron en la pasivación del recubrimiento.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director. Dr. Darío Yesid Peña Ballesteros. Codirector. Jhon Edison Torres Ramírez.

ABSTRACT

TITLE: ELECTROCHEMICAL STUDY OF A PAINTED GALVANIZED STEEL EXPOSED TO DIFFERENT MEANS OF CHLORIDE AND SULFATE* .

AUTHORS: MARTINEZ SUAREZ, Luis Fernando; CARRASCAL CARRASCAL, Alexander.**

KEYWORDS: Corrosion, Impedance, Coatings

DESCRIPTION: In this study the corrosion behavior of galvanized steel sheets and painted with a standard polyester was studied. Were exposed to accelerated corrosion testing by a salt spray according to ASTM B 117 (salt spray and Na₂SO₄ NaCl) to a maximum of 768 hours; then evaluated by electrochemical techniques such as electrochemical impedance spectroscopy (EIS), the polarization resistance (RP) and potentiodynamic curves to calculate the corrosion rate.

The electrochemical evaluation was performed by visual checks, considered too subjective for its high dependence on the experience of the person performing the check, and also for its limited understanding of the mechanisms of degradation of the interfaces. In response to this need, the technique appears electrochemical impedance spectroscopy, which allows following the degradation of the coating over time, quickly and quantitatively. It also makes monitoring the permeability that the film may have agents that promote corrosion and the presence of corrosive processes at the interface.

Finally hits a surface analysis is performed by optical microscopy characterization (SEM) and X-ray diffraction (XRD) in the material in order to examine the surface morphology as products formed there (SO₄) (OH) 6Cl (H₂O) ₆ which helped passivation coating

* Project degree

** Faculty of Engineering Physicochemical. School of Metallurgical Engineering and Materials Science, Director. Dr. Peña Darío Yesid Ballesteros. Co. Jhon Edison Torres Ramirez.

INTRODUCCIÓN

La corrosión debido al medio ambiente es un problema para la industria en general ocasionando grandes pérdidas por reparos y sustituciones de elementos degradados. El recubrimiento galvanizado se ha venido considerando como un sistema de protección del acero eficaz y duradero, por lo tanto no necesita un tratamiento adicional.

El galvanizado se perjudica cuando aparecen iones de cloruros y sulfatos, que con suficiente concentración, pueden llegar a causar su deterioro de tal modo que afecta las propiedades del material.

Se recurre con más frecuencia al recubrimiento del acero galvanizado, sobre todo después de que los estudios de corrosión del acero galvanizado y pintado, realizados en diferentes lugares y muy especialmente en el Stichting Doelmatig Verziken (Holanda), han demostrado que la combinación de recubrimiento galvanizado más pintura proporciona protección por un periodo de tiempo que es de 1.8 a 2.2 veces superior a la protección que daría este sin la pintura¹.

Con este trabajo de investigación se busca determinar el comportamiento del acero galvanizado y pintado expuesto a cámara salina (Niebla Salina) en diferentes concentraciones de cloruros y sulfatos ya que en ambientes tropicales actúan en conjunto lo cual representa grandes daños; analizar como el recubrimiento de pintura ayuda a combatir los ataques corrosivos de las soluciones iónicas de cloruro y sulfatos promoviendo la vida útil del material.

¹ EL NERVION, S.A. ¿Por qué pintar el acero galvanizado? .Pinturas nervion. [en línea] [citado 15 de febrero de 2015] Disponible en: <http://www.nervion.com.mx/web/certificados/POR%20QUE%20PINTAR%20GALVANIZADO.pdf>

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento electroquímico de un acero galvanizado pintado expuesto a diferentes medios de cloruros y sulfatos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la velocidad de corrosión por medio de las técnicas de resistencia a la polarización y curvas de polarización potenciodinámica de un acero galvanizado pintado con un poliéster estándar.
- Identificar la morfología y el tipo de productos de corrosión que se forman en láminas galvanizadas expuestas en ambientes relacionados en el objetivo (A) mediante microscopia electrónica de barrido y difracción de rayos X.
- Establecer la influencia que tiene el tiempo de exposición de las muestras en diferentes medios de cloruros y sulfatos en el deterioro de un acero galvanizado.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 GENERALIDADES

Los daños y reparación de la corrosión son problemas de millones de dólares. La galvanización en caliente después de la fabricación es un proceso adaptable para controlar la corrosión, que resuelve muchos de los problemas provocados por la corrosión que existen en la mayoría aplicaciones industriales. El acero galvanizado en caliente se ha usado de manera extensa en las industrias de procesos químicos y en las instalaciones de transporte y públicas para combatir la corrosión.²

2.2 MECANISMO DE CORROSIÓN EN EL ACERO GALVANIZADO

El producto inicial de la corrosión de zinc en el aire es la forma de óxido de zinc (ZnO) que se caracteriza por ser una película muy dura. Este óxido al reaccionar con la humedad del aire, forma el hidróxido de zinc ($Zn(OH)_2$) como segundo producto de corrosión. Posteriormente, este reacciona con el CO_2 de la atmósfera para formar carbonato de básico de zinc. Esta película de carbonato básico de zinc es altamente adherente, relativamente insoluble y es la responsable de la protección contra la corrosión en variadas condiciones atmosféricas.

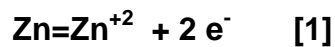
Sin embargo, la presencia del sulfato y cloruros modifican la composición de los productos de corrosión formados, aumentando su solubilidad y por tanto su velocidad de corrosión.

² AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Galvanización en caliente para la protección contra la corrosión de los productos de acero. (1996)

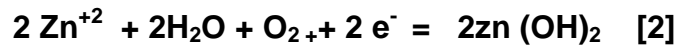
Reacciones que ocurren en la capa de zinc en presencia de iones cloruros y sulfatos.³

2.2.1 Mecanismo anódico

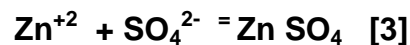
1. ocurre la oxidación del zinc:



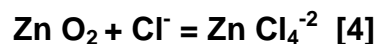
2. se forma la primera capa compuesta de hidróxidos de zinc



3. Esta capa $2 \text{Zn}(\text{OH})_2$ se caracteriza por ser porosa, y por lo tanto permite el paso de los iones SO_4^{2-} y Cl^- , y continúan reaccionando primero lo hace el ion SO_4^{2-} ya que este es más pequeño que el ion Cl^- .



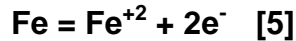
4. Esta capa de ZnSO_4 es estable en el sistema, sin embargo al entrar en contacto con el ion Cl^- , este es capaz de difundir a través de esta capa.



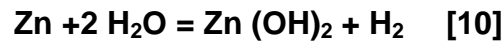
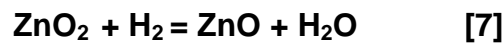
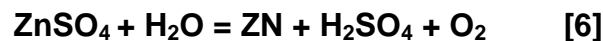
El ZnCl_4^{-2} es un compuesto soluble, que se va acumulando debajo de las capas de hidróxido y sulfato de zinc, hasta romperlas, y que al estar en presencia de agua se disuelven, creando cráteres en la superficie del acero galvanizado, estos

³ ECHEVERRIA, C.A. Corrosión atmosférica del acero en condiciones climáticas de cuba: influencia del aerosol Marino 15BN: 959 -16 -0188-3032 (2002).

lugares son puntos en donde se desencadena la corrosión localizada, esta corrosión alcanza la interface del acero y originando la reacción anódica.⁴

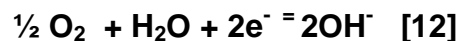


Simultáneamente, es posible que ocurran las siguientes reacciones:

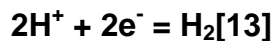


Estas reacciones proporcionan un mecanismo de corrosión autosuficiente que progresa en la medida en que entran cada uno de sus componentes⁵.

2.2.2 Mecanismo catódico. En cuanto a la reacción catódica, ocurre la reducción del oxígeno disuelto.



Dependiendo de las características del electrolito en contacto con la superficie del metal se da la reacción de evolución del hidrogeno.



⁴ QUINTERO ASCANIO Leydy Mayerly. Estudio del comportamiento de la corrosión de un acero galvanizado, en un ambiente que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas. Universidad Industrial De Santander. 2012

⁵ Ibid

2.3 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

A continuación se presenta una descripción de las pruebas electroquímicas que se desarrollaron en este trabajo de investigación.

2.3.1 Espectroscopia de impedancia electroquímica. Es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, que se basa en el uso de una señal de corriente alterna que es aplicada a un electrodo para determinar la respuesta correspondiente.⁶

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

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica, utilizado en circuitos de corriente alterna. En un circuito de corriente directa la relación entre la corriente y el potencial está dada por la Ley de Ohm, según la ecuación [14]

$$E = IR \quad [14]$$

Que para el caso de impedancia esta ecuación se transforma de forma equivalente en la ecuación [15]

$$E = IZ \quad [15]$$

Donde Z representa la impedancia del circuito.

⁶ MONTESDEOCA, JJ SANTANA, FJ SANTANA, JE GONZÁLEZ, Univ. De las palmas de gran canaria, caracterización electroquímica del efecto de los iones cloruro y sulfato sobre el cinc 2001

La impedancia de un sistema a cada frecuencia está definida por: la razón entre la amplitud de la señal de corriente alterna y la amplitud de la señal de potencial alterno y el ángulo de fase. Un listado de estos parámetros a diferentes frecuencias constituye el espectro de impedancia.⁷

2.3.2. Resistencia a la polarización (Rp). La técnica electroquímica, comúnmente referida como la técnica LPR o de Resistencia a la Polarización, es el único método para el monitoreo de la corrosión que permite medir las velocidades de corrosión de forma directa, en tiempo real. Aunque está limitado su uso a medios conductivos líquidos, el tiempo de respuesta y la calidad de los datos que aporta esta técnica es claramente superior, donde sea aplicable, frente a otros medios de monitoreo de la corrosión⁸.

La técnica Rp es particularmente útil como un método de rápida identificación de la velocidad de corrosión presente y el efecto de las acciones tomadas contra ésta, prolongando así la vida útil de la planta. Esta técnica es utilizada para un máximo efecto, cuando es instalada como un continuo sistema de monitoreo.⁹

Cuando un electrodo metálico o de aleación es inmerso en un líquido electrolíticamente conductivo con suficiente poder oxidante, éste se empezará a corroer a través de un fenómeno típico electroquímico. Este proceso involucra dos reacciones simultáneas y complementarias. En la zona anódica, el metal molecular empezará a pasar a través de la superficie sólida hacia la solución adyacente, y de esta forma, deja un excedente de electrones en la superficie metálica. El exceso de electrones fluirá a las zonas cercanas adyacentes, designadas como áreas catódicas, las cuales serán oxidadas por los agentes¹⁰.

⁷ SUPLIEQUIP SERVICIOS. Monitoreo de resistencia a la polarización [en línea] [Acceso el 02 de agosto de 2013]. Disponible en: <http://www.suplequip.com/pdf/Introduccionapolarizacionlineal.pdf>

⁸ Ibid.

⁹ J.R. Conrad, material Sci. Engin (1987) page. 169, 197

¹⁰ Ibid p. 169, 197

La corriente de corrosión (i_{corr}), generada del flujo de electrones de la zona anódica a la catódica, puede ser usada para calcular la velocidad de corrosión, mediante la aplicación de una versión modificada de la Ley de Faraday, según se muestra en la ecuación [16].

$$C = \frac{i_{corr} \cdot E \cdot 128,67}{(A \cdot D)} \quad [16]$$

Donde C es la velocidad de corrosión en (mpy), E es el peso equivalente del metal en corrosión, A es el área del electrodo en corrosión y D es la densidad del metal en corrosión.

El comportamiento de esta corriente externa aplicada es gobernado, así como la corriente i_{corr} , por el grado de dificultad con el cual el proceso de corrosión entre el ánodo y el cátodo se esté dando. A mayor dificultad, menor sería el valor de la corriente i_{corr} y menor el valor de ΔI en forma proporcional. De hecho, a pequeñas magnitudes de ΔE , el valor de ΔI es directamente proporcional a i_{corr} , y por lo tanto, a la velocidad de corrosión. Esta relación está formulada teóricamente por la ecuación Stern-Geary.

$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{ba \cdot bc}{2,3 I_{corr}(ba+bc)} \quad [17]$$

Los números ba y bc son constantes empíricas, las constantes de Tafel, pero la relación puede ser expresada de forma más simple de la siguiente manera:

$$I_{corr} = \frac{\Delta I}{\Delta E} Const \quad [18]$$

2.3.3 Extrapolación de Tafel. Es una polarización de alto campo, en la que se aplican sobre potenciales de 250 a 300 mV tanto en sentido catódico, como anódico.¹¹

Con esta técnica se obtiene la i_{corr} por la extrapolación de las regiones catódicas y anódicas en el potencial de corrosión. Además, es posible calcular las pendientes de Tafel, que son parámetros cinéticos útiles en el cálculo de la i_{corr} con R_p .

⁹ WALCH, Frank. Un primer curso de ingeniería electroquímica. Editorial Club Universitario, (2000) pág. 86-95

3. ESTADO DEL ARTE

ESTUDIO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DEL ZINC Y EL ACERO GALVANIZADO - AUTOR: DÍAZ RODRÍGUEZ, FRANCISCO MIGUEL (2001)

Se han realizado ensayos electroquímicos para estudiar el poder protector de los productos de corrosión en el proceso de picado de las placas de zinc. El estudio se ha realizado utilizando placas que corresponden a estaciones instaladas en atmósferas con menor salinidad, y ha permitido establecer que: En las atmósferas de tipo rural (aquellas en las que las velocidades de depósito de Cl^- y SO_2 son inferiores a 15 mg/día.m^2) la capa de carbonato de zinc inicialmente formada, sigue creciendo lentamente, observándose que la velocidad de penetración de la corrosión (expresada en mm/año) disminuye, de forma aproximadamente lineal con el tiempo de exposición, lo que pone en evidencia su carácter protector. En placas de zinc expuestas en atmósferas marinas, y como consecuencia del depósito de Cl^- (superior a 15 mg/día.m^2), a los pocos días de exposición se forman, sobre la superficie del metal, islas de cloruro básico, $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, que van creciendo lateralmente hasta unirse y cubrir toda la superficie. En estas condiciones, la velocidad de corrosión que se mide, no disminuye de forma lineal con el tiempo, lo que parece indicar que el cloruro básico de zinc es menos protector que el carbonato básico.

COMPORTAMIENTO FRENTE A LA CORROSIÓN EN AMBIENTES MARINO DE ACEROS GALVANIZADOS Y ACERO GALVANIZADO PINTADO (DÚPLEX) AUTORES: R.M VERA, F.J CAÑAS. (2005)

Mediante técnicas electroquímicas comprendieron las determinaciones de potencial de corrosión a circuito abierto, curvas de polarización potencioestática y

además se expusieron en una cámara de niebla controlada y luego las muestras se evaluaron por microscopia de barrido SEM ; cómo conclusión tomando la corriente como variable que permite medir la corrosión demostraron los buenos resultados de los aceros con la capa dúplex frente a los galvanizados, donde la capa de pinturas sobre el galvanizado dependía del grado de envejecimiento y daño mecánico que pueda sufrir en el servicio .

CONTROL DE LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ACERO GALVANIZADO EN CONDICIONES HÚMEDAS – SECAS CÍCLICAS REVISTA METALURGICA .2006

El comportamiento de la corrosión de un acero galvanizado fue investigado en ambientes húmedos-secos cíclicos utilizando técnicas electroquímicas.

La resistencia de polarización R_p del acero galvanizado se monitorizó durante los ciclos de mojado-seco por el método de impedancia de CA. Simultáneamente, el potencial de corrosión E_{corr} se midió sólo cuando la muestra se sumergió en la solución.

Se concluye en este artículo que la corrosión del acero subyacente comienza cuando el recubrimiento de zinc no actúa como ánodo de sacrificio debido a la acumulación de productos de corrosión de zinc en la superficie de recubrimiento.

Los métodos electroquímicos, como la impedancia y mediciones de potencial de corrosión, son una herramienta eficaz para el control de la degradación del recubrimiento metálico en ambientes atmosféricos.

El monitoreo de la impedancia y potencial de corrosión son muy útiles para la estimación de tiempo hasta la aparición de óxido rojo que indica el inicio de la

corrosión del acero subyacente, así como la velocidad de corrosión de los materiales de recubrimiento.

MECANISMO DE CORROSIÓN E INHIBICIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ACERO GALVANIZADO – AUTORES: M.A ARENAS Y J.J DE DABORENEA (2006)

Mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica para mecanismo de corrosión del proceso de galvanizado como tal acero galvanizado recocido en cloruro sodio revelan que el sistema está controlado bajo difusión en capa finita. Este hecho a partir de los porcentajes de inhibición, estimados a partir de las curvas de polarización, del orden del 85 %, después de 24 h de inmersión en una solución de cloruro sódico con concentraciones a partir de 500 ppm de inhibidor.

DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTOS BASE ZINC EN UN AMBIENTE TROPICAL DE ELEVADA AGRESIVIDAD. – AUTORES: ORLANDO SALAS, NATHALIE ROMERO, OLADIS TROCONIS DE RINCÓN, MIGUEL SÁNCHEZ, ÁLVARO RINCÓN Y DOUGLAS LINARES (2008)

El objetivo de esta investigación es estudiar el efecto de diferentes aplicaciones de recubrimiento base zinc (galvanizado discontinuo) en un ambiente marino-costero tropical, durante 24 meses de exposición. Para esto, se evaluaron láminas de acero al carbono (SAE 1010), recubiertas con zinc.

Concluyen que las velocidades de corrosión del cinc, en esta atmósfera tropical-marina, para todos los sistemas sobrepasan el valor máximo establecido en las normas ISO 9223 (Corrosion of metals, and alloys- Corrosivity of atmospheres. Measurement of pollution” (Geneva, Switzerland: ISO, 1992)).

Los recubrimientos de zinc resultaron inapropiados en este medio de exposición. En ninguna de las probetas analizadas se percibió que el desempeño del esquema de protección fuese aceptable; por el contrario, resulta muy sensible a la corrosión-erosión. Es recomendable que la utilización de estos recubrimientos, esté acompañada de un recubrimiento polimérico que permita protegerlos del ataque directo de agentes agresivos.

ASPECTOS BÁSICOS EN LA INTERPRETACIÓN DE DIAGRAMAS DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA. AUTORES: PIRATOBA MORALES, Ulises. VERA LÓPEZ, Enrique. ORTIZ OTÁLORA, Cesar. (2009)

En este trabajo fueron revisados los aspectos básicos de la representación mediante diagramas de Bode de circuitos usados en EIS.

La espectroscopia de impedancia electroquímica es una técnica muy importante debido a las aplicaciones en la evaluación del desempeño de metales desnudos o recubiertos en diferentes ambientes, el seguimiento de procesos electroquímicos y la evaluación de su cinética.

En este trabajo se estudió los datos de impedancia de la interfase acero laminado en frío – solución acuosa de NaCl al 5%. En donde mediante el EIS se ilustran los diagramas y el efecto que sobre dichos diagramas produce variar algunos de los parámetros de impedancia de algunas interfases electrolito- electrodo metálico y facilitan la interpretación de los fenómenos allí presentes.

TÉCNICA ELECTROQUÍMICAS DE CORRIENTE DIRECTA PARA MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN. AUTOR: JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ. (2010)

Mediante la técnica de resistencia a la polarización empleado para la determinación de la corrosión en sistemas tan diversos como el hormigón, pinturas y hasta alimentos lo que nos demuestra la gran versatilidad. Para el sistema de recubrimientos (pinturas) aplicando la norma ASTM B119 se evaluó el daño o el defecto de la pintura realizando mediciones de RP con velocidades de barrido de 20mv /min para un espesor de 50 a 100 um. En este caso la impedancia total del sistema disminuye porque las probetas incisión, y además se incluye un pigmento metálico como es el aluminio.

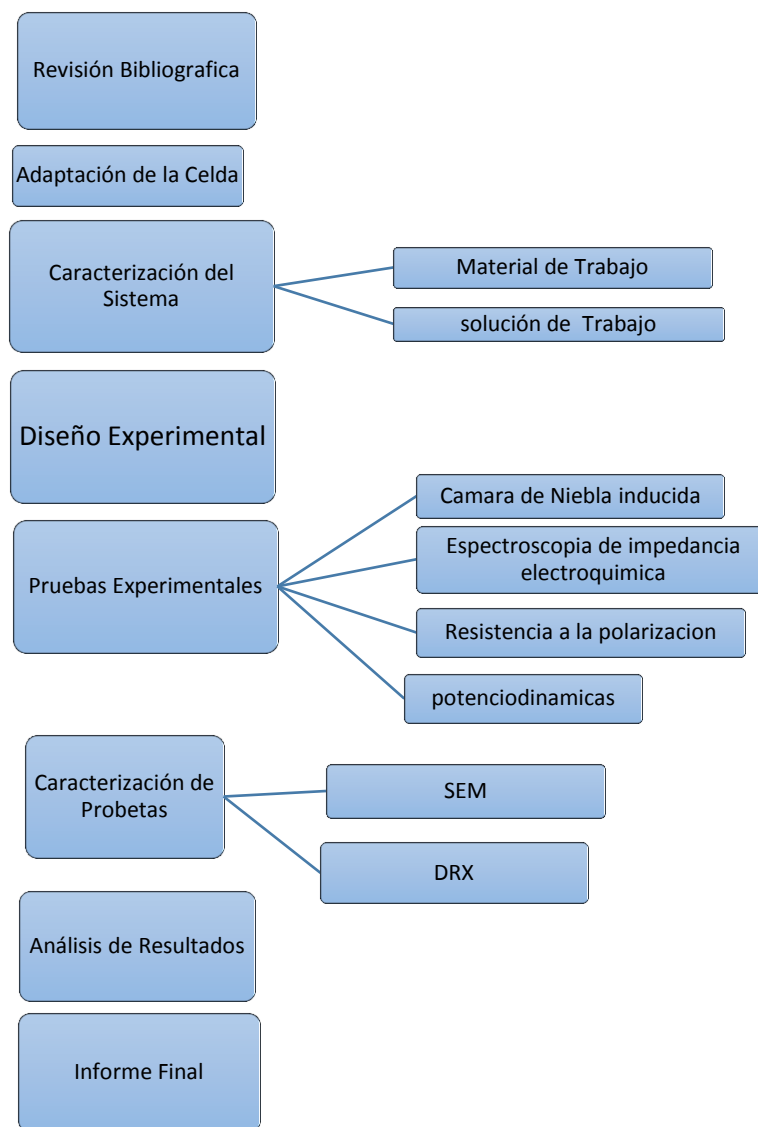
ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DETERMINADOS POR ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PINTURAS. AUTORES: BEDOYA LORA, Franky Esteban. CALDERÓN GUTIÉRREZ, Jorge Andrés. (2012)

La utilización de diferentes parámetros obtenidos por la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) para la determinación del desempeño de pinturas, muchos de los cuales además son utilizados con miras a establecer correlaciones para predicción del deterioro a largo en ambientes reales o respecto a ensayos acelerados. El uso de circuitos equivalentes para el análisis de los espectros de impedancia experimentales puede describir el comportamiento de un recubrimiento en términos tangibles, que además se pueden complementar con otros parámetros como lo son los tiempos de falla y la frecuencia de ruptura para evaluar el desempeño del recubrimiento durante el tiempo de exposición.

4 METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto de investigación consta de las siguientes etapas:

Figura 1. Diagrama de las etapas del proyecto de investigación.



4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó la búsqueda y recopilación de información en libros, revistas, artículos, trabajos de grado y normas, referente a pruebas de caracterización como: las curvas de Tafel, Resistencia a la polarización, espectroscopia de impedancia electroquímica, microscopia electrónica de barrido, difracción de rayos X, utilizando para ellos la base de datos de la Universidad Industrial de Santander.

4.2 ADAPTACION DE LA CELDA PARA LAS PRUEBAS

La celda consta de dos partes principales: Un cuerpo y unos desprendimientos laterales. El cuerpo está fabricado de un vidrio pírex con una capacidad de solución aproximadamente de 400 ml tiene una forma cilíndrica con 9 cm de largo y un diámetro de 6.4 cm con tres desprendimientos, donde se articula el capilar del tubo Luggin, dentro del cual se sumerge el electrodo de referencia, para este caso, un electrodo de plata – cloruro de plata ($\text{Ag} \backslash \text{AgCl}$) También se trabaja con un electrodo Auxiliar en este caso, un electrodo de grafito (C) (Ver fig.A-4, Anexo A).

Fue necesario la utilización de una jaula de Faraday para evitar interferencia de ruido y afecte el sistema cuando se está empleando la técnica de Espectroscopia de Impedancia (EIS) ya que es trabajaba con corriente alterna (AC) (Ver Fig. A-4, Anexo A).

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

4.3.1. Material de trabajo. El material utilizado para el desarrollo de esta investigación fue un acero galvanizado recubierto de poliéster estándar, el cual fue cortado siguiendo las especificación de la norma ASTM B117 con dimensiones de 10 x 20 cm para su exposición en cámara salina como se muestra en la figura. A-3, Anexo A. Las propiedades mecánicas, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades Mecánicas de las láminas galvanizadas

PROPIEDADES MECÁNICAS			
Calidad	Fluencia (Mpa)	Resistencia (Mpa)	Elongación %
Comercial	N / A	N / A	N / A
SS grado 40	275	380	16

Fuente: Empresa que manufactura recubrimientos.

Para la realización de los ensayos las probetas fueron limpiadas con agua y detergente, luego expuestas en cámara salina bajo la norma ASTM B 117 (niebla salina), por último, se retiraron y se llevó a cabo las pruebas electroquímicas.

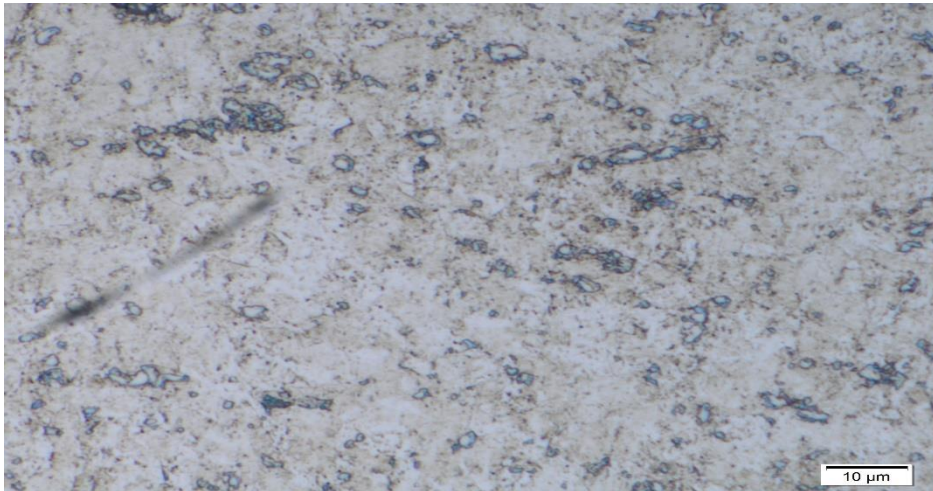
Previo a este proceso, se revisó la composición del acero, cuya caracterización fue realizada mediante análisis de chispa, conforme a la Tabla 2.

Tabla 2. Composición del acero galvanizado y pintado

Elemento	C	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
%	0.069	0.209	0.0050	0.150	0.012	0.010	0.0097	0.012	0.18

Las probetas se llevaron al laboratorio de caracterización de materiales para su corte en adecuación al tamaño para analizar, luego se realizó la preparación metalográfica según las normas ASTM E 3 -11, realizando ataque con Nital al 2% para revelar su microestructura (Ver figura 2).

Figura 2. Microestructura Lámina galvanizada y pintada.



Utilizando la técnica microscopía electrónica de barrido (SEM) se pudo examinar la capa de Recubrimiento de poliéster estándar que se había realizado en el material sobre el galvanizado para mejorar la protección.

Esta técnica de caracterización se realizó con el objeto de conocer un variado rango de informaciones procedentes de la superficie de la muestra. Se pudo conocer los diferentes elementos que se encontró en el análisis de la capa externa del recubrimiento, En la figura (4) se muestra la zona del material en donde se realizó el barrido electrónico y en la figura (3) se muestra la proporción de elementos que se encontraron en esta zona¹².

¹² GRÁGEDA ZEGARRA, Mario MONTESINOS, Susana. Aplicaciones de microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de fractura de una aleación de Cu – 10 Al. Universidad de Chile.

Figura 3. Micrografía superficial del Acero Galvanizado y Pintado Mediante SEM lámina no expuesta a cámara salina. Magnificación 200x

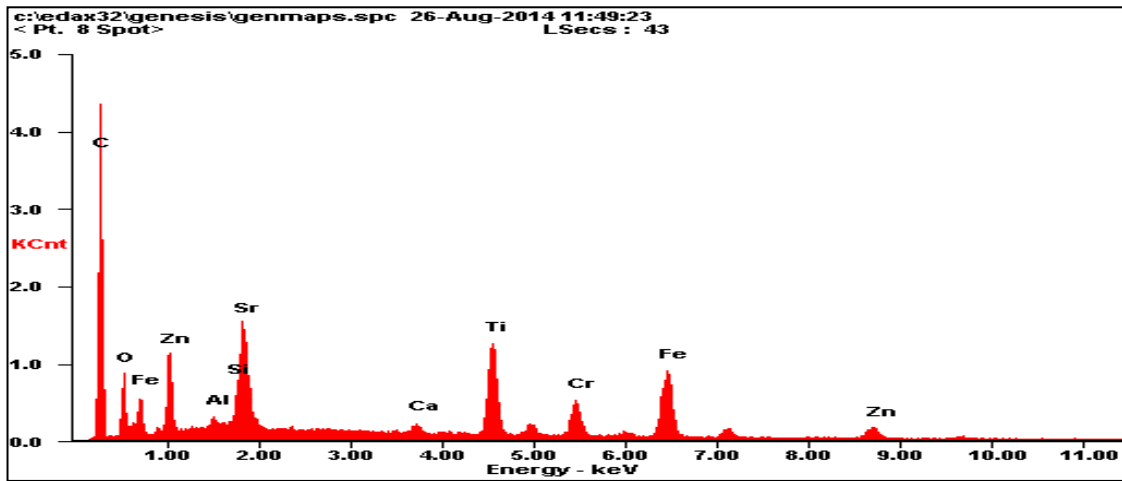
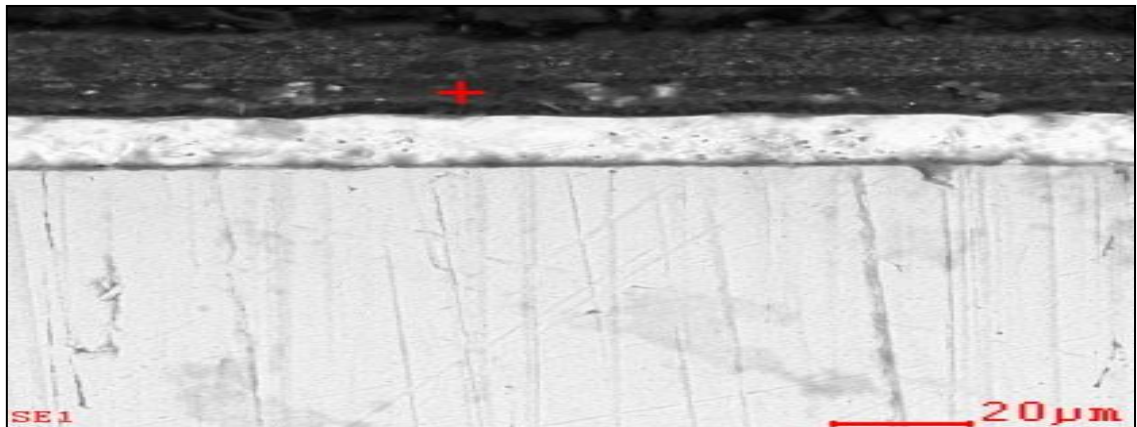


Figura 4. Espectro EDS de la superficie del Acero Galvanizado y pintado en condiciones de no exposición a cámara salina.



Fuente: Universidad industrial de Santander – Parque tecnológico Guatiguará – Laboratorio de microscopía

Se puede observar en la Figura 3 que hay gran cantidad de elementos en el recubrimiento, como Titanio y hierro, que sirven para dar la pigmentación empleada como componente en su fabricación. Esto ayuda que la naturaleza de la pintura sea anticorrosiva. El contenido de estroncio se debe a que este elemento

contiene la misma longitud de onda que el silicio siendo que ambos estén en el mismo lugar del diagrama.

4.3.2 Solución de trabajo. La solución de trabajo se compuso de agua ionizada, 3% p/v de NaCl, con 4% p/v de NaSO₄.

4.4 DISEÑO EXPERIMENTAL ESTADISTICO

En este procedimiento experimental se tuvo en cuenta las variables que se podían manipular en el sistema las concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) y sulfato de sodio (Na₂SO₄), el tiempo de permanencia de las láminas en la cámara salina es de 16 y 32 días la Tabla 3 muestra la variables que se van a utilizar, en la Tabla 4 se muestran las concentraciones para cada una de las soluciones.

Tabla 3. Variables utilizadas concentraciones de cloruros y sulfatos [g/ 400 ml]

NIVEL			
VARIABLES	TIPO	VALORES MIN	MAX
[Cl ⁻]	variante	4.33	15.15
[So ₄ ⁻²]	variante	5.36	16.08
TIEMPO	variante	16	32

Tabla 4. Concentraciones a utilizar

UNIDADES		1	2
[CL ⁻]	[g/400ml]	4.33	15.15
[SO ₄ ⁻²]	[g/400ml]	5.36	16.08
[CL ⁻]	M	0.18	0.64
[SO ₄ ⁻²]	M	0.09	0.28

En este caso se habla de un punto mínimo (-1, -1) y uno máximo (1, 1), lo cual corresponde a una concentración de cloruros de (5.36 g /400 ml), y de sulfatos de

(4.33 g / 400 ml)para el punto mínimo y una concentración de cloruros (15.15 g/400 ml) y para sulfatos (16.08 g /400 ml) como máximo. El tiempo máximo de 32 días y un mínimo de 16 días.

4.5 PRUEBAS EXPERIMENTALES

4.5.1 Cámara salina. Para la realización experimental se utilizaron 6 probetas (laminas galvanizadas y pintadas) las cuales fueron expuestas en cámara salina con especificaciones según norma ATM B- 117. Se utilizó este tipo de ensayo que es especial para simular condiciones en regiones tropicales por medio de condensaciones de agua, debido a los cambios de temperatura.

Para ello se cumplió con ciertos parámetros bajo la norma (ASTM B -117) [ver tabla 5]

Tabla 5. Norma ASTM B 117 para cámara salina de niebla

Norma	Geometría del espacio interior	Temperatura	Humedad Relativa %	Nebulizador
ASTM B 117	15 pies ³	33.3 a 37	95 a 98	Precipitación de la niebla en un Área de 80 cm ² .

Fuente: NORMA ASTM B 117 - Normas Prácticas para la Operación de Aparatos de Niebla Salina

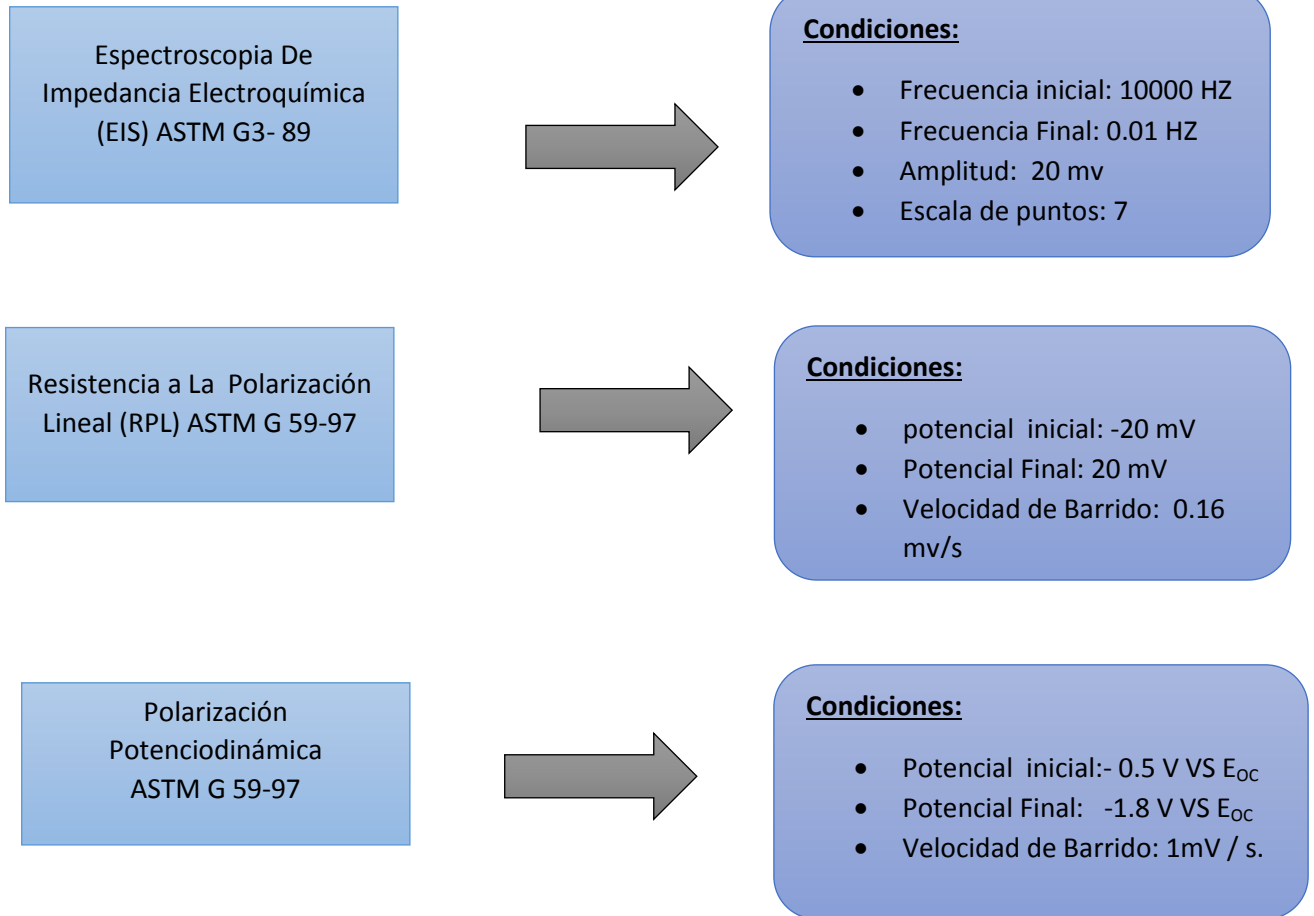
4.5.2 Pruebas Electroquímicas. Para la realización de los ensayos experimentales se utilizó una celda electroquímica del GIC, la cual fue conectada a un potencióstato/galvanostato GAMRY 750. El desarrollo de las pruebas experimentales se llevó a cabo en una etapa, una electroquímica. Bajo las siguientes condiciones, ver Figura 5.

Esta etapa se inicia con la prueba de Potencial a Circuito Abierto (OCP) durante 60 minutos, tiempo en el cual el sistema se estabiliza. Luego se procede a realizar la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (norma ASTM G106-89), cuya duración es de 40 minutos. Realizado lo anterior, se requiere estabilizar nuevamente el sistema con Potencial a Circuito Abierto (OCP) durante 10 minutos. Transcurridos estos 10 minutos se aplicó la Resistencia a la Polarización Lineal (norma ASTM G59-97), durante 8 minutos, para determinar la velocidad de corrosión en ese instante, es decir transcurridos 18 minutos. Finalmente, se procedió a realizar la Curva de Polarización Potenciodinámica (norma ASTM G5-94).

Completada la etapa electroquímica, se procede a caracterizar la superficie del material mediante microscopía electrónica de barrido, y caracterizar las fases cristalinas presentes en las láminas por medio de difracción de rayos¹³.

¹³ Técnicas, difracción de rayos X [en línea] [Acceso el 30 de enero de 2013] Disponible en: <http://www.ehu.es/imacris/PIE06/web/DRXP.htm>

Figura 5. Técnicas electroquímicas y condiciones de trabajo



5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

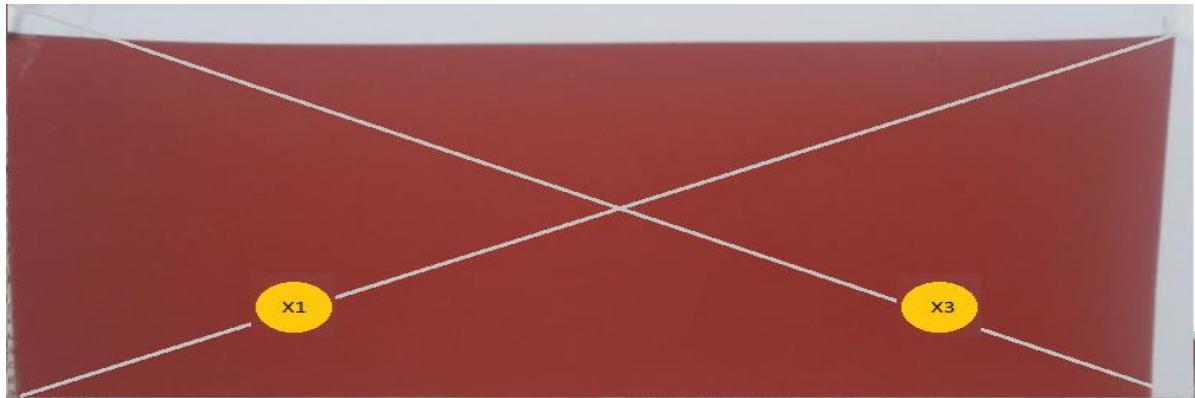
El resultado de las evaluaciones realizadas en el estudio electroquímico son descritas en este capítulo se analizaron dos puntos tanto en las láminas normales como rayadas, iniciando con las pruebas potenciodinámicas, la espectroscopia de impedancia electroquímica y seguido con el estudio de análisis químico (difracción de rayos x, Microscopia de barrido óptico).

La figura 6 se observa las zonas donde se evaluaron los puntos en la lámina sin daño superficial en el recubrimiento y en la figura 7 se observan los dos puntos donde se realizó los respectivos estudios electroquímicos para evaluar esa zona de la ralladura sobre la superficie del material

Figura 6. Lamina normal la cual muestra los puntos analizados para las pruebas electroquímicas.



Figura 7. Lámina Rayada la cual muestra los puntos analizados para las pruebas electroquímicas.



5.1. VELOCIDADES DE CORROSIÓN EXPERIMENTALES.

Las velocidades de corrosión se hallaron experimentalmente por medio de las curvas de Tafel¹⁴.

Tabla 6. Velocidades de corrosión a partir de curvas potenciodinámicas.

Prueba	Concentración	Tiempo en cámara salina	CR (mmpy)
1 Lámina normal P	Baja	16 días	0,002692
2 lámina normal E	Baja	16 días	0,005368
3 lámina rayada x1	Baja	16 días	0,001564
4 lámina rayada x3	Baja	16 días	0,01501
5 Lámina normal P	Baja	32 días	0,0009459
6 Lámina normal E	Baja	32 días	0,0005315
7 Lámina rayada x1	Baja	32 días	0,07524
8 Lámina rayada x3	Baja	32 días	0,2691
9 Lámina normal P	Alta	16 días	0,00005439
10 Lámina normal E	Alta	16 días	0,0004542
11 lámina rayada x1	Alta	16 días	0,00003116

¹⁴ ENOS D.g., SCRIBNER L.L., The potentiodynamic polarization scan. Solartron technical report 33. 1997. pp. 1-13

Prueba	Concentración	Tiempo en cámara salina	CR (mmpy)
12 lámina rayada x3	Alta	16 días	0,00005291
13 Lámina normal P	Alta	32 días	0,07669
14 Lámina normal E	Alta	32 días	0,1503
15 lámina rayada x1	Alta	32 días	0,05086
16 lámina rayada x3	Alta	32 días	0,00002346

Se observa que la velocidad en la lámina rayada en bajas concentraciones en el punto x₃ resulto ser la mayor en todos los puntos a comparación de las demás laminas analizadas, como también la velocidad en la lámina en concentración alta normal a 32 días demuestra ser representativa en las altas concentraciones.

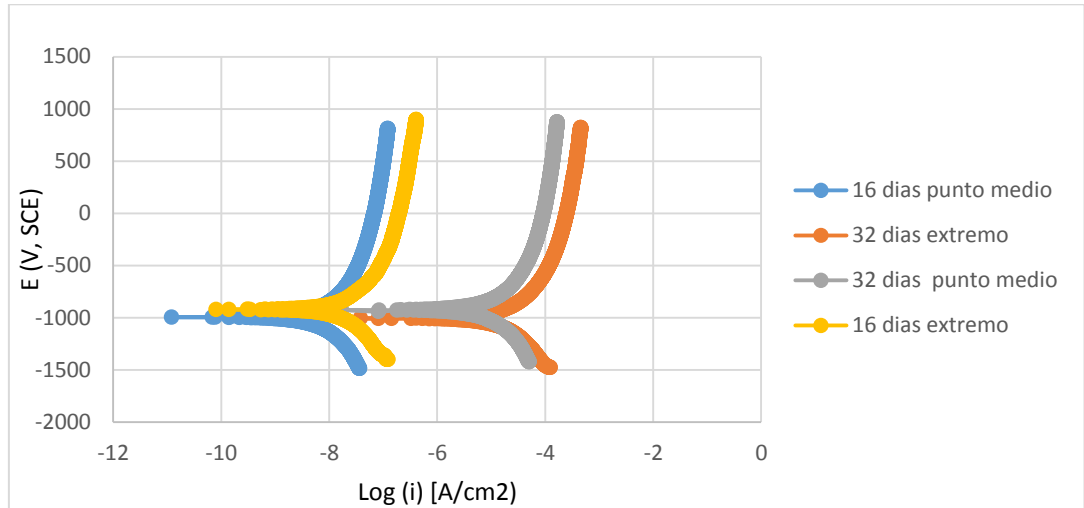
Siendo estos dos tipos de láminas las escogidas para el análisis electroquímico.

5.2 LÁMINAS NORMALES EN CONCENTRACIONES ALTAS EXPUESTAS EN CÁMARA SALINA DURANTE 16 Y 32 DÍAS

Del análisis de la Figura.8 sobre las curvas potenciodinámicas se puede decir que la exposición de las láminas en un periodo de tiempo de 32 días en la cámara salina determinó una densidad de corriente superior con valores más nobles desde el punto de vista termodinámico que las curvas que estuvieron expuestas a 16 días¹⁵.

¹⁵ Y. Xu, J.M. Sykes, The influence of electrode polarization on corrosion beneath paint. Progress in Organic Coatings Volumen, Pagés 549–554 2001

Figura 8. Curvas potenciodinámicas obtenidas a 16 y 32 días expuestas en cámara salina a concentraciones altas.



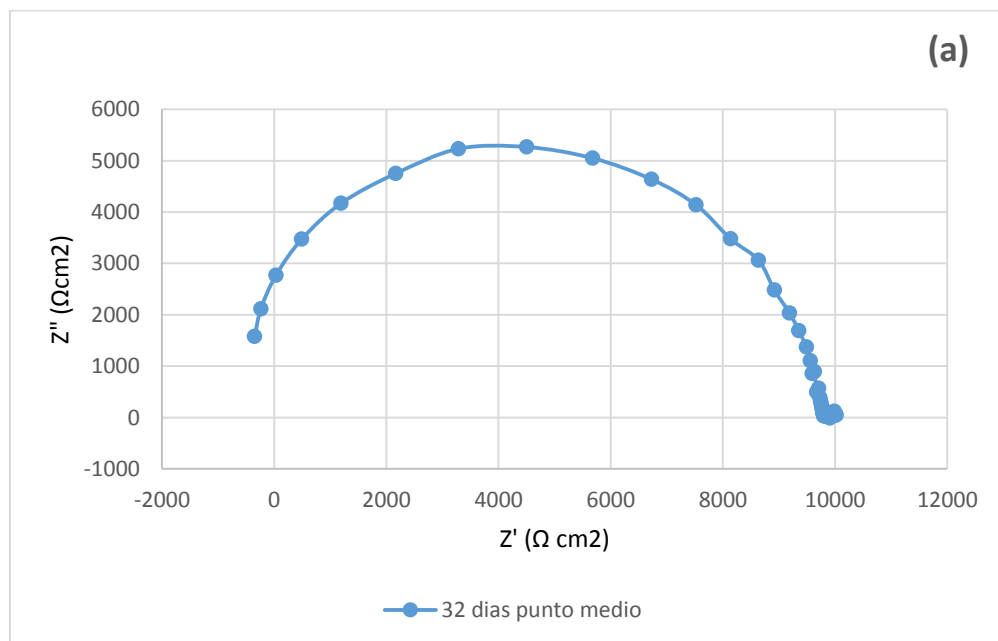
En las gráficas de polarización potenciodinámicas se observa el aumento de la densidad de corriente y un desplazamiento hacia la derecha debido a que estas laminas estuvieron más expuestas en cámara salina, también hay un aumento en la cinética de la reacción por lo cual su velocidad de corrosión es mayor que se presenta en las curvas de 32 días, las cuales son muy similares, indica la estabilidad termodinámica del metal.

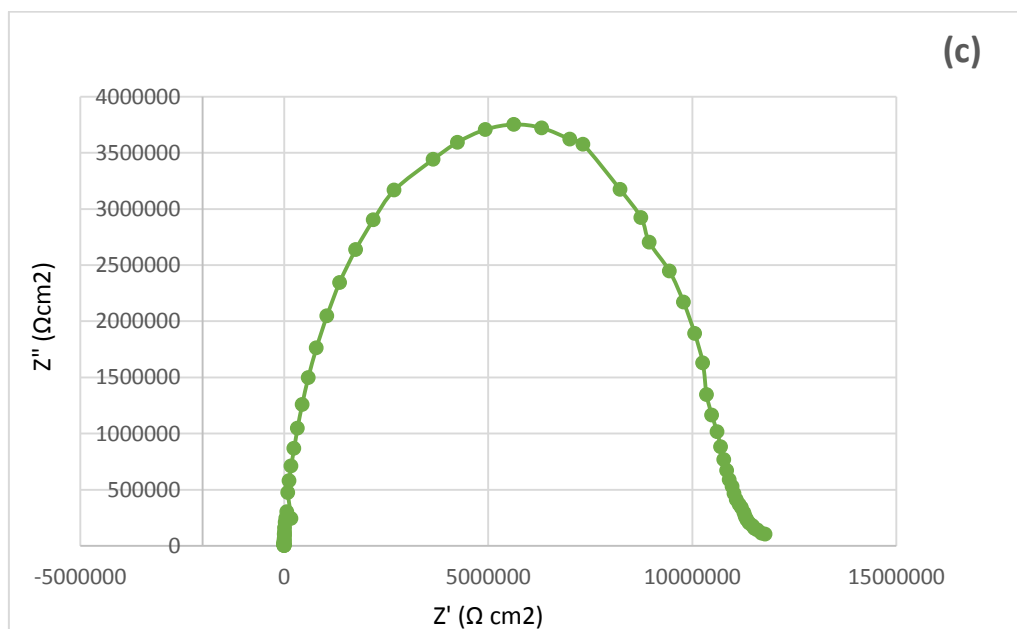
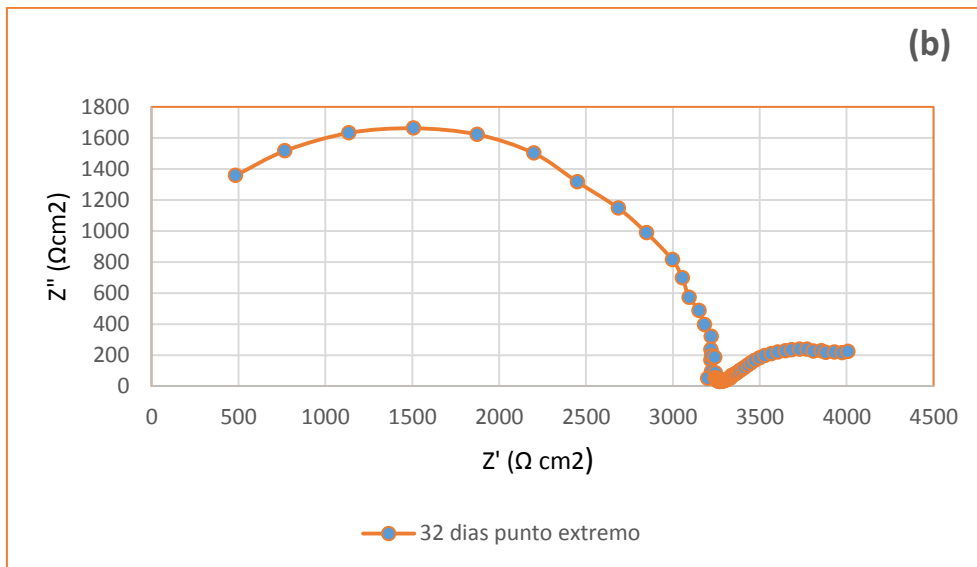
El comportamiento de las láminas expuestas a 16 días se debe al inicio de la formación de una capa de óxido protectora y no porosa, debido a que estas curvas tienden a potenciales más positivos y densidad de corrientes negativas lo cual es la evidencia de la formación de la capa protectora que tiene buena resistencia a la corrosión, y por consiguiente, se obtienen los valores más bajos de velocidad de corrosión; esto se corrobora en las fotografías tomadas mediante el SEM (Fig. E-3 Anexo E), donde presenta productos de corrosión de cinc de color blanco, principalmente $\text{NaZn}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_6$, el cual se caracteriza por ser una capa poco adherente que presenta fisuras.

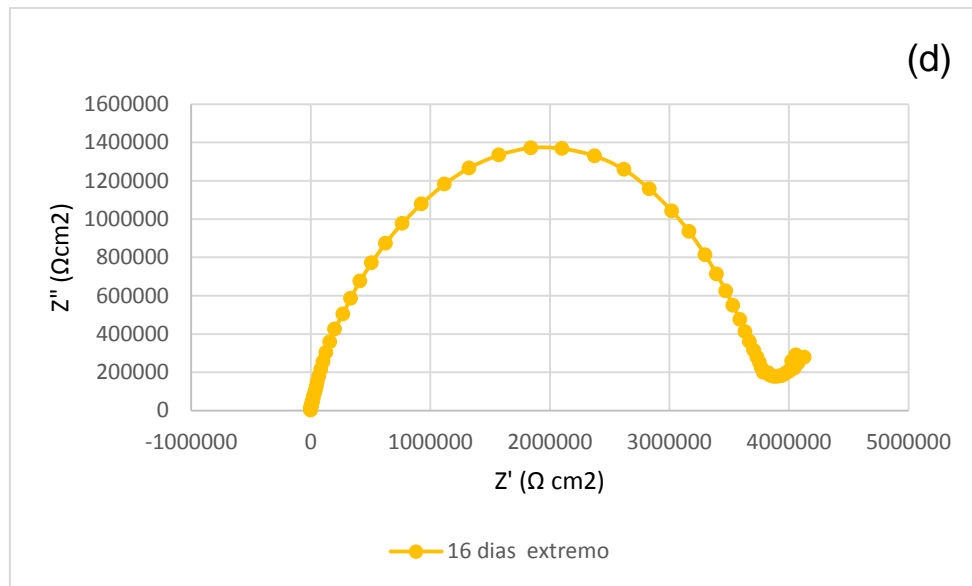
Analizando los diagramas de Nyquist mostrados en la figura 9. Se puede observar la diferencia de los diámetros de los domos entre los de 16 días con los de 32 días, los cuales representa diferencia de impedancias a gran escala. En las curvas (a) y (b) indica una disminución de la resistencia de transferencia de carga, y así un aumento de velocidad de corrosión.

Se observa en la curva (b) que la velocidad de corrosión es la más alta con un valor de 0,1503 mmpy en comparación de las láminas expuestas a los 16 días

Figura 9. Curvas de Nyquist: (a) Punto medio a 32 días de exposición. (b) Punto extremo a 32 días de exposición. (c) punto medio a 16 días de exposición. (d) Punto extremo a 16 días de exposición.







Con ayuda de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica se realizó un análisis de los productos de corrosión formados, observando los fenómenos que ocurren en la doble capa electroquímica.¹⁶

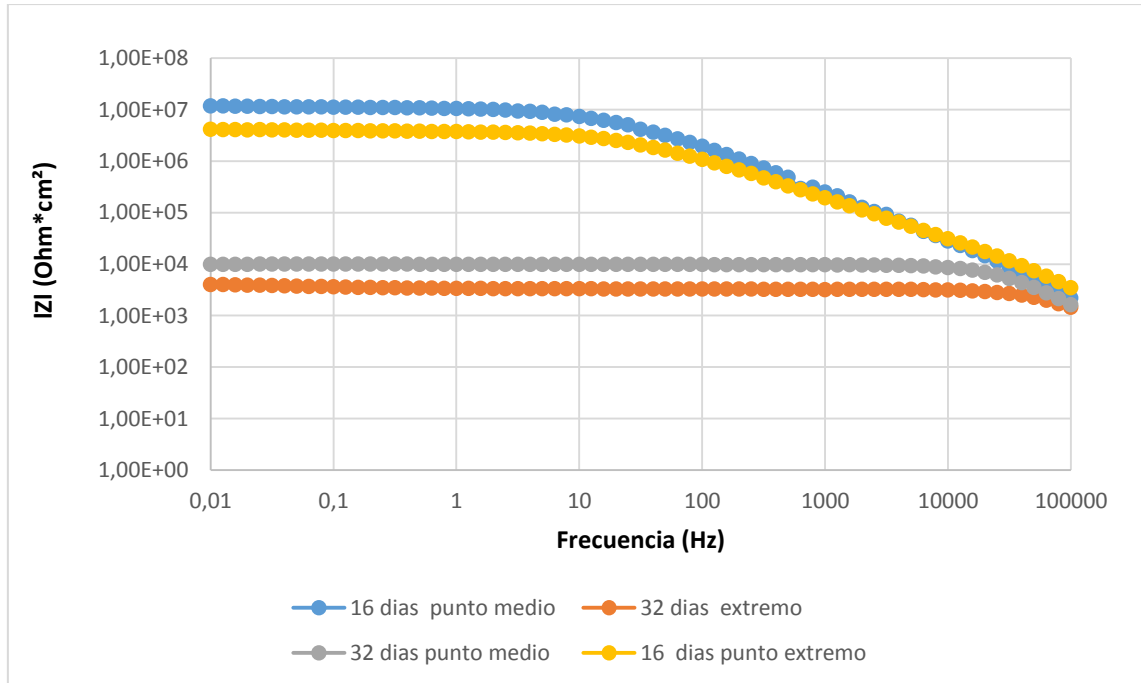
En las curvas de frecuencia impedancia vs frecuencia Figura.10 se observa como la impedancia disminuye para las láminas expuestas a 32 días en comparación con las expuestas a 16 días, lo que concluye en un aumento de la corrosión de éstas láminas como se había analizado en las curvas potenciodinámicas. Se puede decir que a menores impedancias la velocidad de corrosión es mayor ya que según la literatura la impedancia relacionada con la ley de ohm tiene un comportamiento resistivo.^{17 18}

¹⁶ ULISES, morales. VERA, López.ORTIZ.Cesar. Aspectos básicos en la interpretación de diagramas de impedancia electroquímica. Universidad nacional de Colombia. 2014

¹⁷ VESGA Luis Ferney "Estudio acerca de los mecanismos de protección contra la corrosión de recubrimientos orgánicos usando Espectroscopia de impedancia electroquímica (eis) " Universidad industrial de Santander (2004)

¹⁸ ARIAS, Chehin. Estudio del comportamiento de un ambiente corrosivo con cloruros y sulfatos, sobre una lámina de acero galvanizado. Universidad industrial de Santander. (2011)

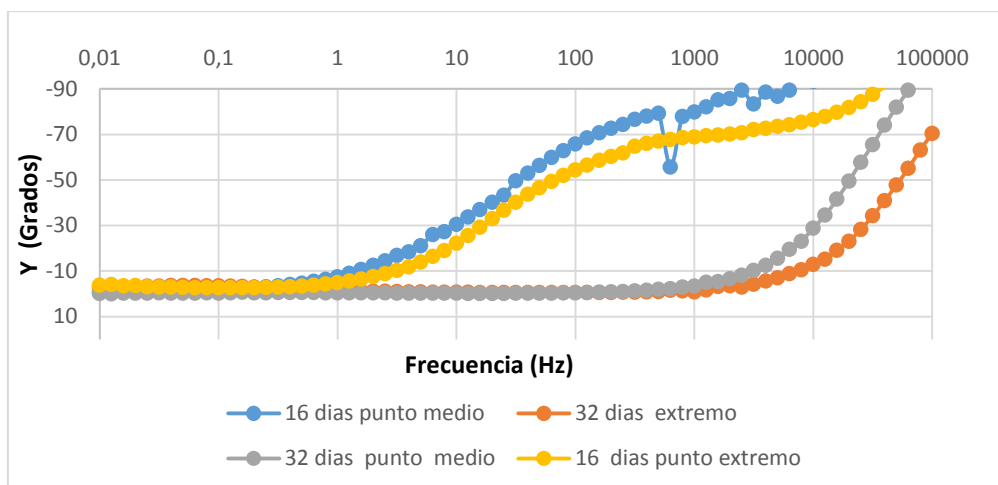
Figura 10. Diagrama de Bode para concentraciones altas.



En la Figura. 11 se corroboró lo explicado donde la curva de 32 días en el punto extremo tiene una mayor afectación donde el ángulo de fase disminuyó en todo el tiempo de exposición debido a la interacción con el medio ambiente corrosivo. Esto posiblemente a que la solución se permea gradualmente dentro del recubrimiento, generando ampollas sobre la superficie ya que el agua y el oxígeno se difunden hacia las interfaz recubrimiento- galvanizado incrementando la capacitancia, y como resultado, la corriente que puede fluir a través del revestimiento es mayor.¹⁹

¹⁹ GUZMAN, Andrés. Evaluación de la resistencia a la corrosión del sistema primer epóxico rico en zinc/acabado polisiloxano por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica. Universidad industrial de Santander. 2011

Figura 11. Ángulo de fase vs frecuencia para concentraciones altas.



Cuando el ángulo de fase toma valores cercanos a 0, indica que la impedancia medida, corresponde a una resistencia al disminuir la frecuencia, el capacitor tarda más en permitir el flujo de corriente y tendrá una caída de potencial.²⁰

5.3 LÁMINAS RAYADAS EN CONCENTRACIONES BAJA EXPUESTAS EN CÁMARA SALINA DURANTE 16 Y 32 DÍAS

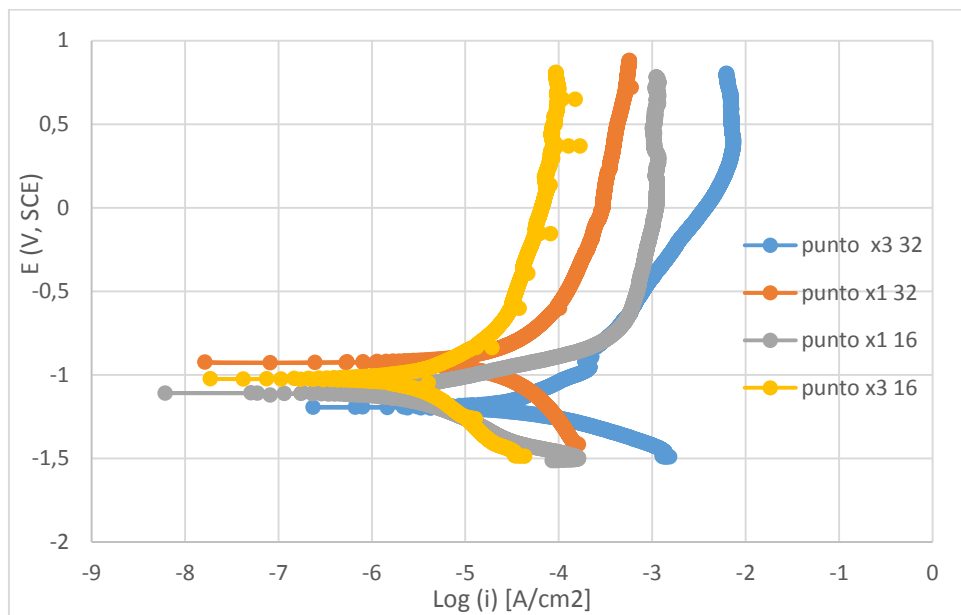
En la figura 12, analizando el comportamiento potenciodinámico puede observarse las láminas rayadas en el punto x_3 de los 32 días donde es la curva más pronunciada hacia la derecha con densidad de corriente mayor siendo más corrosivo que los demás puntos.

En el gráfico del punto x_1 en los 32 días es la curva que, aunque no está tan desplazada hacia la derecha, si es la que representa el potencial de corrosión más noble lo que indica una mayor estabilidad termodinámica. Para la probeta x_3 se tiene una pendiente catódica mayor que la pendiente anódica lo que indica una

²⁰ GONZÁLEZ GUZMÁN, Jorge Antonio. Protección frente a la corrosión metálica con recubrimientos poliméricos. Estudio electroquímico y micro electroquímico 2009

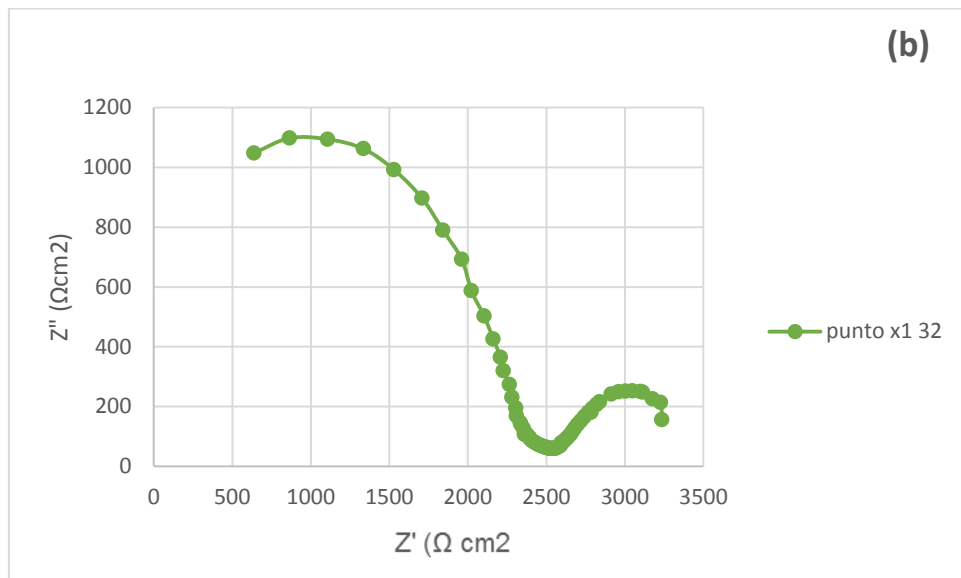
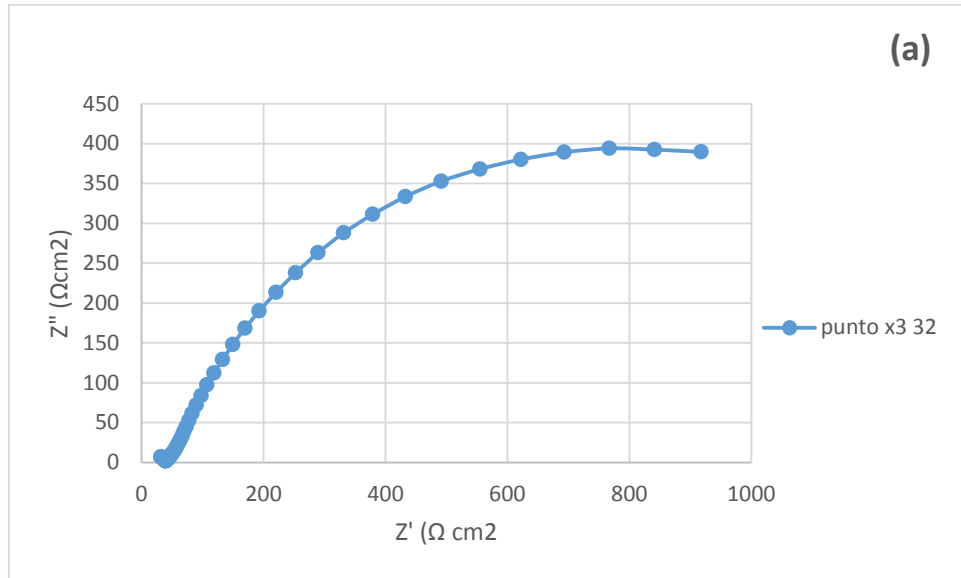
mayor pasivación. Bajo los mismos criterios establecidos en el sistema anterior se infiere que el mecanismo de disolución activa domina el comportamiento anódico, que el sistema está controlado por la transferencia de masa y activación, es decir un control mixto.

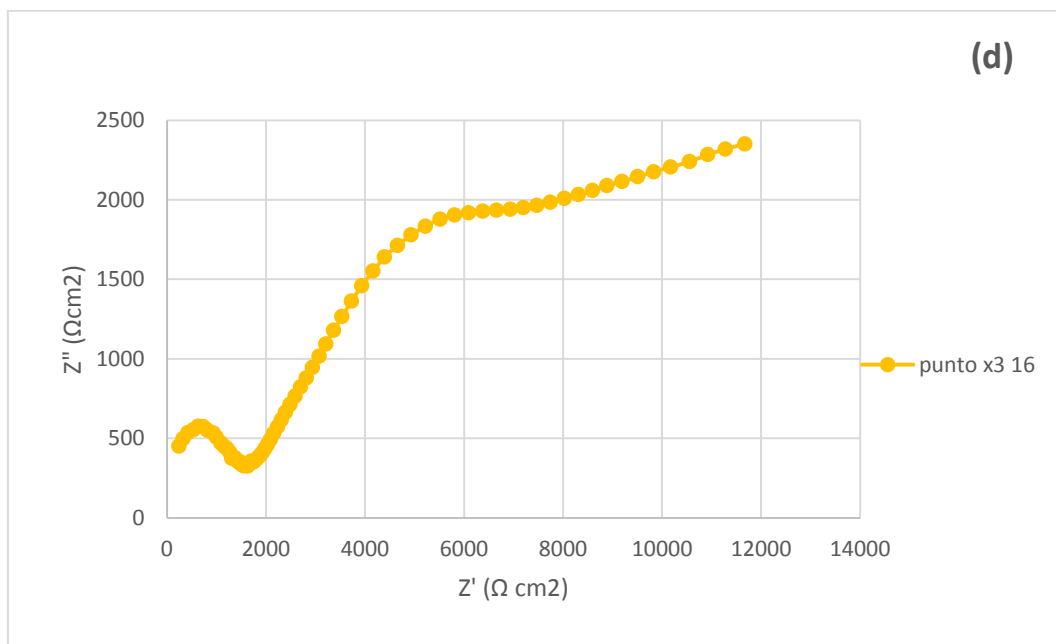
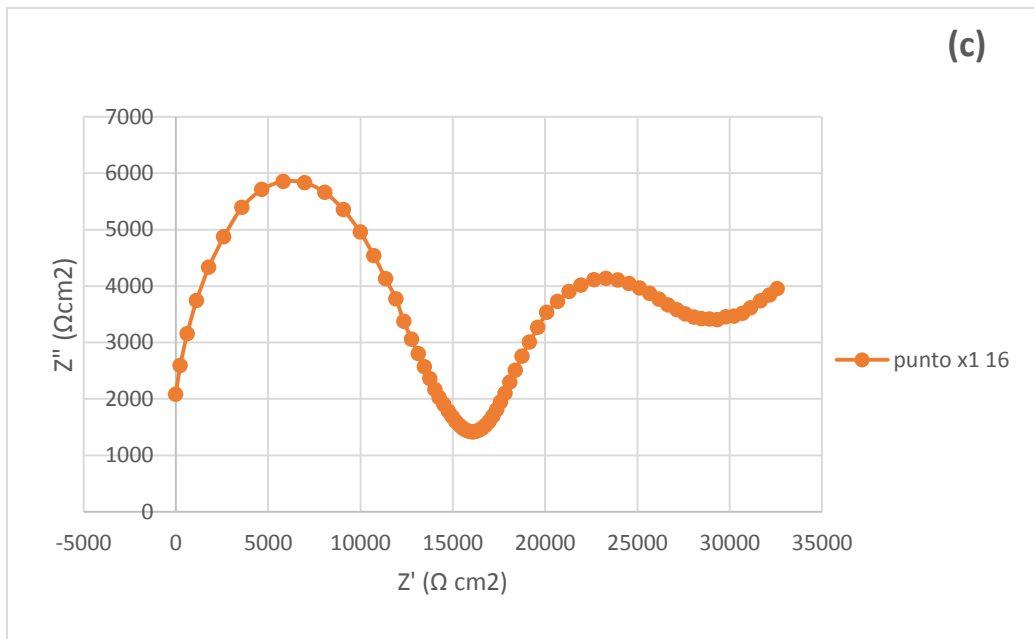
Figura 12. Curvas correspondientes a: curvas de polarización potencio dinámicas.



Analizando los resultados se puede deducir del comportamiento de las curvas de Nyquist en la figura 13. Existe una disminución de la resistencia del electrolito, a medida que se aumenta el tiempo en que se expuso en la cámara salina, produciendo posiblemente una formación mayor de la capa oxidante sobre el material en las láminas expuestas a 32 días que las de 16 días. Con impedancia se observa que a los 16 días (figura c) se alcanza impedancia de 6000 ($\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$) donde el sistema es más resistivo, y a los 32 días no se alcanza 400 ($\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$) (figura 13a), esto se debe a la transferencia de carga que experimenta el material.

Figura 13. Curvas de Nyquist: (a) Punto x_3 a 32 días de exposición. (b) Punto x_1 a 32 días de exposición. (c) punto x_1 a 16 días de exposición. (d) Punto x_3 a 16 días de exposición.

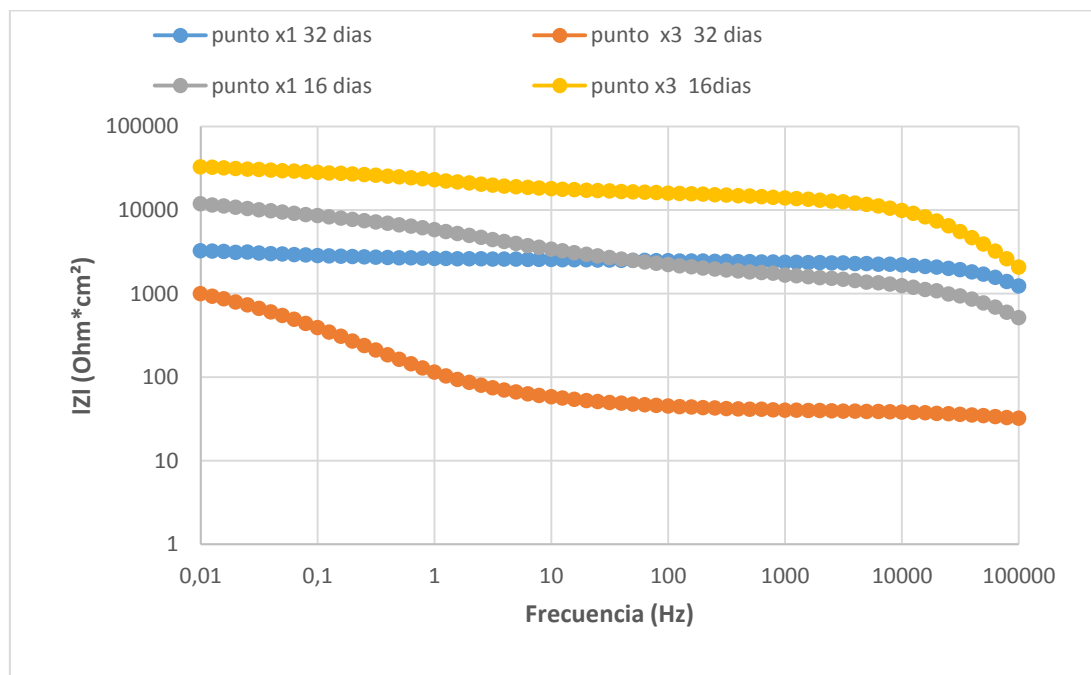




Se observa que las curvas representativas de impedancia vs frecuencia (bode) Figura 14 en los puntos expuestos en a 32 días mostraron la menor impedancia lo que indica una mayor velocidad de corrosión, y en el punto X_3 a 32 días, es la que dio la mayor velocidad de corrosión ((ver Tabla B – 4) anexo B), y cuando se

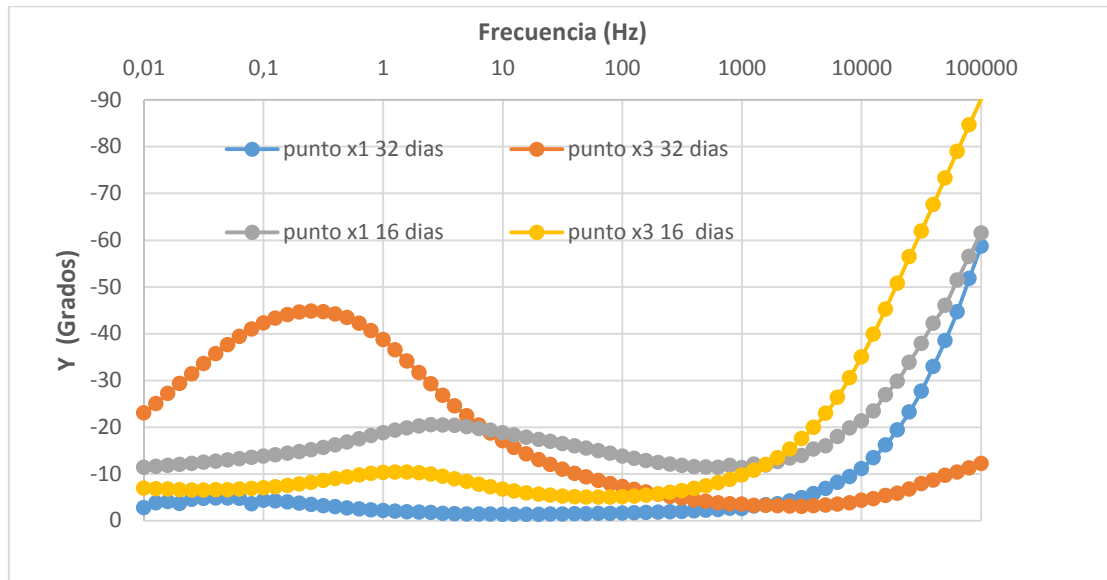
aumenta la frecuencia tiende a una impedancia constante por la formación de la capa de óxido de cinc (ZnO) (ver figura E-3 (anexo E) que pasiva el material hacia la corrosión.

Figura 14. Diagrama de Bode para concentraciones bajas en láminas rayadas.



En la Figura 15, de ángulo de fase vs frecuencia observa la curva del punto X3 a 32 días dos picos máximos de ángulo de fase el primero con un ángulo mayor de -45 grados lo cual se debe a fenómenos de difusión debido a los productos de pasivación, y el segundo pico fue muy bajo debido a la afectación (rayadura) que contiene la superficie del material.

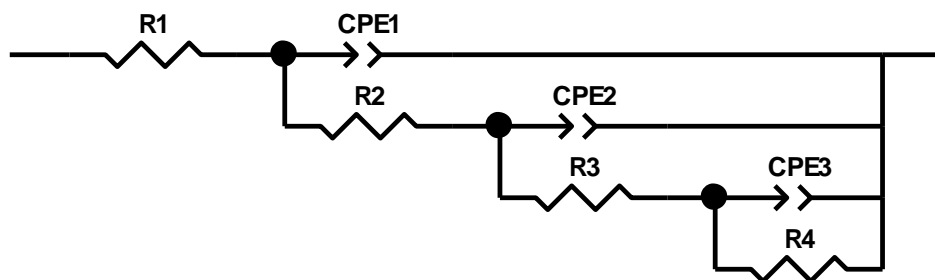
Figura 15. De ángulo de fase vs impedancia en concentraciones bajas en láminas rayadas



5.4 CIRCUITO EQUIVALENTE

5.4.1 Circuito equivalente de lámina normal en concentración alta evaluado en punto extremo. En la Figura 16 se muestra el circuito equivalente que se ajusta a los resultados obtenidos con la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (eis). Para simular el efecto de dispersión por el semicírculo capacitivo presente en el rango de altas frecuencias. (Ver anexo D)

Figura 16. Circuito equivalente.



De acuerdo con lo observado en los ensayos y consultas bibliográficas, se puede describir los elementos constituyentes del circuito como:

R₁: Resistencia Del electrolito o solución.

CPE1y R2: Capacitancia asociada a la película de recubrimiento, y su respectiva Resistencia a la transferencia de carga (reacción química) del Proceso de oxidación.

CPE2yR3: Capacitancia asociada al intercambio de iones de cinc de la superficie de la capa del galvanizado con los iones de sulfato y cloruros, que se lleva a cabo por la reacción con la solución y formación de productos de corrosión (NaZn₄) (SO₄) (OH)₆Cl(H₂O)₆

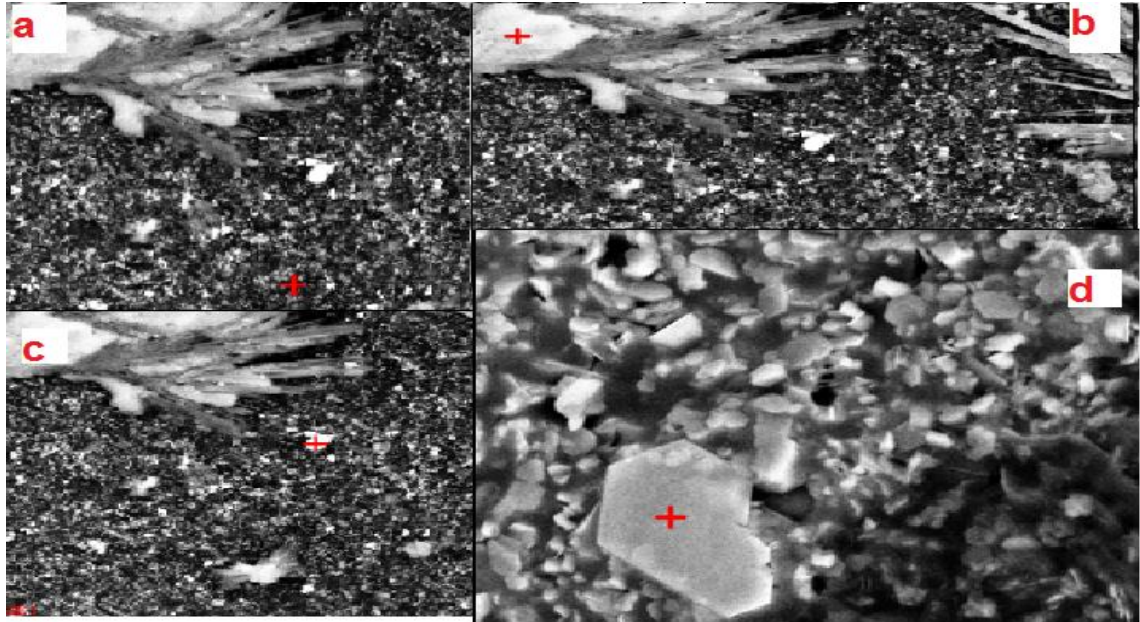
CPE3 yR4: Capacitancia asociada al intercambio de iones de la superficie del electrodo (acero al carbono) con los iones de sulfato y cloruros que afectaron la interface anterior.

5.5 ANÁLISIS SUPERFICIAL

En el SEM (ver figura 17) se obtiene una mayor información de la capa formada, como la poca adherencia que tiene la capa de los productos de corrosión, también se nota en la zona en la que ya se ha desprendido la capa, como quedan unas pequeñas protuberancias dejadas por la formación de los productos de corrosión originados por la reacción de los iones [Cl⁻] y iones [SO₄⁻²] en sí, se pudo ver como el trabajo en conjunto de estos dos iones pudo conllevar al deterioro extremo de la capa de galvanizado (ver Figura 17).²¹

²¹ F.J SÁNCHEZ Alejandro, 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

Figura 17. SEM para lámina con ralladuras expuestas a 32 días. (a) Zona de mayor concentración de Zn, (b). Zona de concentración de Fe, (c). Zona concentración del producto formado sobre superficie, (d). Producto de corrosión formado en la superficie del material).

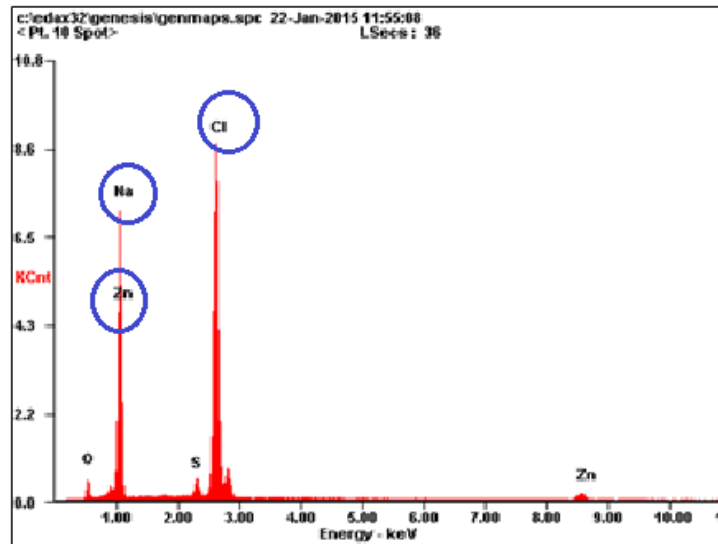


Fuente: Universidad Industrial de Santander- Sede UIS – Guatiguará – Edificio de Investigaciones- Laboratorio de Microscopía.

Se observa una micrografía no homogénea con alteración superficial y con una cantidad relativa de manchas, óxidos y puntos negros presentes, indicando principalmente presencia de corrosión. Ésta se presenta como un ataque concentrado en áreas muy reducidas y hace al acero inestable, como consecuencia de la ruptura de la capa pasiva.

La caracterización por espectroscopia de energía dispersa (EDS) permitió realizar el análisis químico elemental en las diferentes muestras. En la Figura. (18) se detalla que para concentraciones altas después de 32 días en cámara salina y la ejecución de pruebas electroquímicas, hubo una deposición de sales sobre la superficie de manera no uniforme.

Figura 18. Concentraciones de elementos en la superficie



Se puede observar la presencia de cloro y zinc de gran cantidad donde se puede corroborar con la caracterización de DRX (ver anexo) la formación de $\text{NaZn}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_6$.

6. CONCLUSIONES.

Mediante los análisis de caracterización superficial en el materia se comprobó la presencia de productos de corrosión sobre el material los cuales se formaron durante la exposición de las láminas en la cámara salina; a partir de Difracción de Rayos X (DRX), se determinó una capa de óxido $(\text{NaZn}_4 (\text{SO}_4) (\text{OH})_6 \text{Cl} (\text{H}_2\text{O})_6$ situada en la zona afectada por la rayadura, la cual previene reacciones electroquímicas en la superficie, por ende, disminuye la velocidad de corrosión. Por otra parte, se presentaron en las láminas la formación de ampolladuras con presencia de ZnO en condiciones de exposición a 32 días donde se constató la falla del recubrimiento y la interacción del zinc.

La posición en que se encuentren las láminas resultó un factor fundamental en la lectura de los resultados de las pruebas electroquímicas ya que los puntos evaluados en los extremos de las láminas representaron comportamientos diferentes a los que se dieron en los puntos en la zona media de la lámina y esto se puede deducir por la falta de homogeneidad en la cámara salina como también la acumulación del material de la solución sobre ciertas zona no uniforme en la superficie de la lámina.

Se concluye que la velocidad de corrosión entre las láminas expuestas a bajas concentraciones de solución fueron superior que en las láminas expuestas a altas concentraciones. El motivo se debe que la niebla sea más densa con concentraciones altas que con concentraciones bajas, lo que hace que precipite más rápido conservando menor cantidad en la atmosfera inducida dentro de la cámara, lo que no sucedió con las bajas concentraciones donde la niebla fue más volátil.

Según los resultados obtenidos bajo las condiciones de trabajo durante este proyecto, se puede decir que este tipo de láminas galvanizado y pintadas de la empresa pueden tener una aplicación en ambientes salinos, ya que el recubrimiento mostró un buen comportamiento durante las pruebas electroquímicas realizadas comparada con un acero galvanizado realizado en otros estudios.

7. RECOMENDACIONES

Es necesario que para la estimación del tiempo útil para una total degradación se tomen otros factores tanto físicos y químicos que puedan variar la degradación del material. Como exposición a radiación ultravioleta dentro de la cámara salina.

BIBLIOGRAFÍA

A.P. YADAV, A. NISHIKATA, T. TSURU. Electrochemical impedance study on galvanized steel corrosion under cyclic wet–dry conditions—influence of time of wetness. 2004

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Galvanización en caliente para la protección contra la corrosión de los productos de acero. 1996

ARIAS, Chehin. Estudio del comportamiento de un ambiente corrosivo con cloruros y sulfatos, sobre una lámina de acero galvanizado. Universidad industrial de Santander. 2011

ECHEVERRIA, C.A. Corrosión atmosférica del acero en condiciones climáticas de cuba: influencia del aerosol Marino 15BN: 959 -16 -0188-3032. 2002.

EL NERVION, S.A. ¿Por qué pintar el acero galvanizado? .Pinturas nervion. Disponible en: <http://www.nervion.com.mx/web/certificados/POR%20QUE%20PINTAR%20GALVANIZADO.pdf>

ENOS D.g., SCRIBNER L.L., The potentiodynamic polarization scan. Solartron technical report 33. 1997. pp. 1-13

F.J SÁNCHEZ Alejandro, 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

GONZÁLEZ GUZMÁN, Jorge Antonio. Protección frente a la corrosión metálica con recubrimientos poliméricos. Estudio electroquímico y micro electroquímico 2009

GRÁGEDA ZEGARRA, Mario MONTESINOS, Susana. Aplicaciones de microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de fractura de una aleación de Cu – 10 Al. Universidad de Chile.

GUZMAN, Andrés. Evaluación de la resistencia a la corrosión del sistema primer epóxico rico en zinc/acabado polisiloxano por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica. Universidad industrial de Santander. 2011

INGEMECANICA. Cursos de Mecánica y Soldadura. Creación y diseño de páginas web. Tutorial N° 104 Protección del acero por Galvanización. Tomado de: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn104.html>

J.R. Conrad, material Sci. Engin page. 1169, 197. 1987

MONTESDEOCA, JJ SANTANA, FJ SANTANA, JE GONZÁLEZ, Univ. De las palmas de gran canaria, caracterización electroquímica del efecto de los iones cloruro y sulfato sobre el cinc 2001

NORMA ASTM B 117 - Normas Prácticas para la Operación de Aparatos de Niebla Salina.

QUINTERO ASCANIO Leydy Mayerly. Estudio del comportamiento de la corrosión de un acero galvanizado, en un ambiente que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas. Universidad Industrial De Santander. 2012

REQUIZ, Roberto. ROJAS, Miguel Ángel. ROSALES, Adalberto. Daños por hidrogeno en aceros galvanizados. Universidad Simón Bolívar. Departamento de ciencia de los materiales 2007

SUÁREZ CORRALES, Xenia. VILLAR LÓPEZ, René Valentino. CORVO PÉREZ, Francisco. Resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento. Centro de Investigación en Corrosión. Universidad Autónoma de Campeche 2013

SUPLIEQUIP. Monitoreo de resistencia a la polarización [en línea] [Acceso el 02 de agosto de 2013]. Disponible en: <http://www.supliequip.com/pdf/Introduccionapolarizacionlineal.pdf>

EHU. Técnicas, difracción de rayos X [en línea] [Acceso el 30 de enero de 2013]. Disponible en: <http://www.ehu.es/imacris/PIE06/web/DRXP.htm>

ULISES, morales. VERA, López. ORTIZ. Cesar. Aspectos básicos en la interpretación de diagramas de impedancia electroquímica. Universidad nacional de Colombia. 2014

VESGA Luis Ferney "Estudio acerca de los mecanismos de protección contra la corrosión de recubrimientos orgánicos usando Espectroscopia de impedancia electroquímica (eis) " Universidad industrial de Santander 2004

WALCH, Frank. Un primer curso de ingeniería electroquímica. Editorial Club Universitario, 2000 pág. 86-95

Y. Xu, J.M. Sykes, The influence of electrode polarization on corrosion beneath paint. Progress in Organic Coatings Volume, Pages 549–554 2001

ANEXOS

Anexo A. Fotografías del montaje

Figura A-1. Cámara salina



Figura A-2. Jaula de Faraday



Figura A-3. Material de trabajo (Laminas galvanizadas y pintadas)



Figura A-4. Montaje Celda Electroquímica

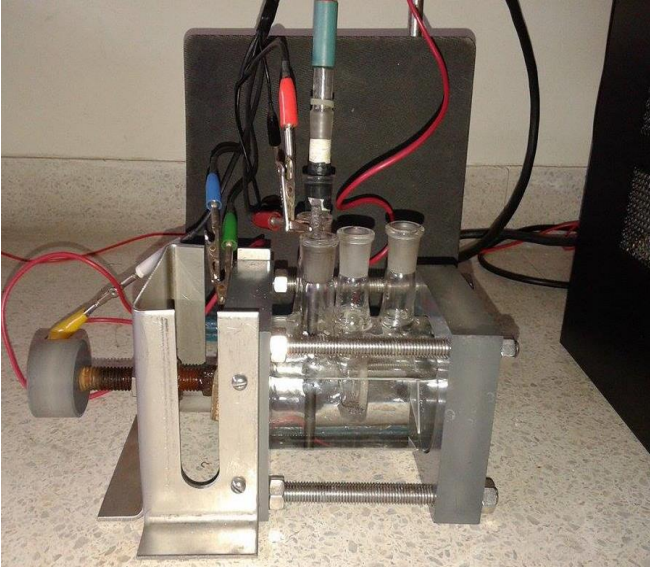
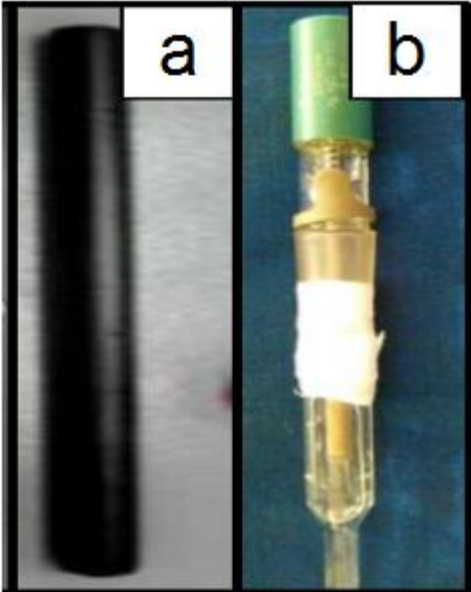


Figura A-4. Electrodo de Ag/AgCl. c) Contra electrodo de grafito.



Anexo B. Método de cálculo de la velocidad de corrosión a partir de la resistencia a la polarización lineal.

Para determinar la velocidad de corrosión a partir de la resistencia a la polarización lineal se requiere calcular las pendientes anódicas y catódicas de la curva potenciodinámica.

- Cálculo de las pendientes de Tafel a partir de curva potenciodinámica. Para determinar las pendientes catódicas y anódicas de los datos obtenidos en la curva potenciodinámica, se hace uso de la norma ASTM G102-89.

Figura B -1. Curva potenciodinámica Lamina Normal bajo condiciones de exposición a cámara salina durante 32 días a bajas concentraciones.

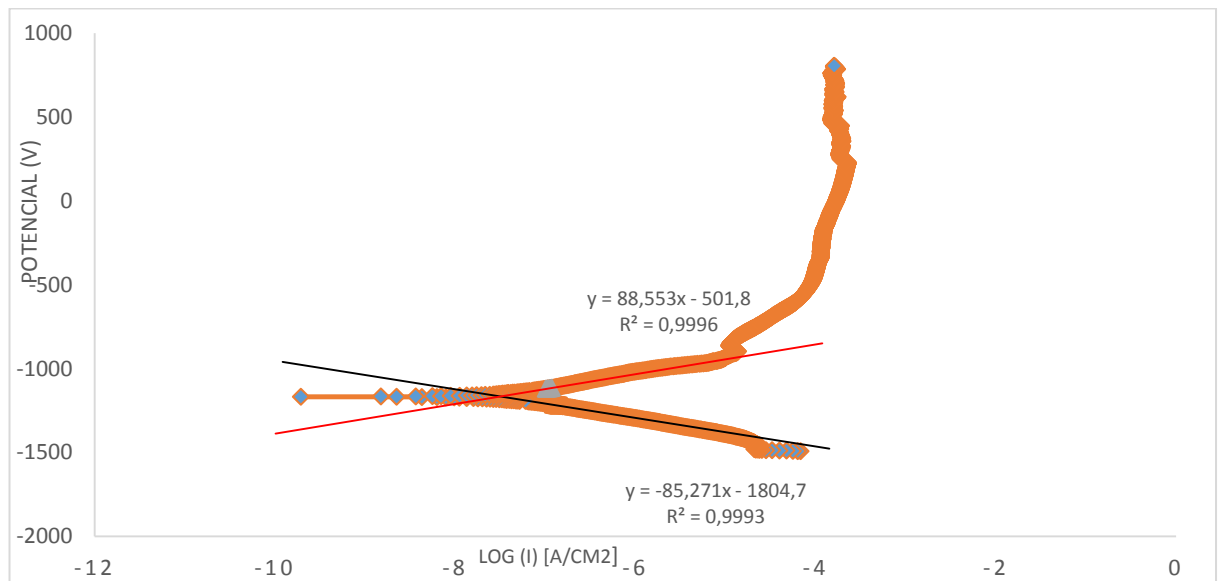


Tabla B-1. Potencial de corrosión Lamina Normal 32 días a bajas concentraciones

	Potencial (v)	Log (i)
E corr	-1168	-9710857164

En primer lugar se ubicó el potencial de corrosión por medio de la gráfica, luego para realizar el cálculo se tomó un valor de ± 50 mv arriba del potencial de corrosión, ubicándose en la zona de la curva catódica; en este nuevo potencial se tomaron 3 puntos continuos arriba y abajo, y se realizó una regresión lineal para dicho rango. De ésta modo se obtuvo la ecuación de la recta catódica.

$$E (V) = 88,553 \log (I_c) - 501,8$$

Posteriormente, se tomaron 6 puntos aleatorios entre el potencial de corrosión y el potencial a 50 mv arriba, y con el uso de la ecuación de la recta se obtuvo valores de densidad de corriente catódica. Luego para calcular la densidad de corriente anódica se aplicó la siguiente ecuación:

$$I_a = I_c - I_{app}$$

Tabla B - 2. Datos obtenidos para calcular pendiente catódica

E (v)	Log(i _{app})	i _{app}	Log i _c	Log i _a	i corr
-1200	-7,1141301	7,6890E-08	-7,0915108	-8,3859	8,1002E-08
-1201	-7,0995236	7,9519E-08	-7,0797809	-8,4301	8,3233E-08
-1203	-7,0674247	8,5619E-08	-7,0863126	-8,6532	8,7841E-08

Finalmente se grafican los datos obtenidos de densidad de corriente anódica y nuevamente se realiza una regresión lineal obteniéndose la ecuación de la recta anódica y catódica, siguiendo los requerimientos de la norma ASTM G-102, para poder obtener la densidad de corrosión i , que posteriormente se utilizó para obtener la velocidad de corrosión aplicando la fórmula de CR.

$$E (V) = -85,271 \log (Ia) - 1804,7$$

$$CR = K1 (icor/\rho) EW$$

Dónde:

CR es dado en mm/yr, icor en $\mu A/cm^2$

K1: 3.27×10^{-3} , mm g/ μA cm yr ρ : densidad en g/cm³

Tabla B - 3. Datos necesarios para calcular velocidad de corrosión

K1	EW	ρ (g/cm ³)
3.27 E-03	26,682	7,75

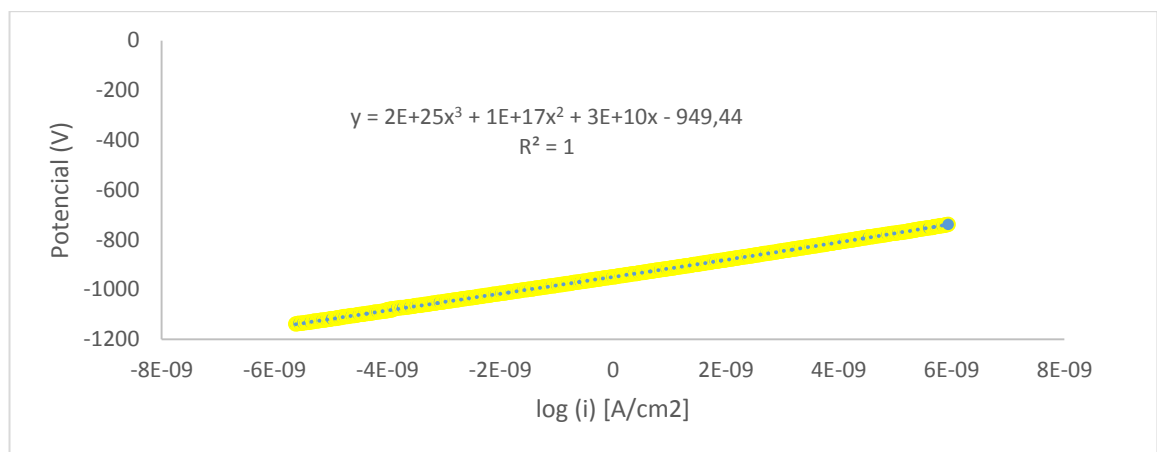
$$CR (mmpy) = 9,4596 E -04$$

Tabla B – 4. Velocidades de corrosión a partir de curvas potenciodinámicas.

Prueba	Concentración	Tiempo en cámara salina	CR (mmpy)
1 Lamina normal P	Baja	16 días	0,002692
2 lamina normal E	Baja	16 días	0,005368
3 lamina rayada x1	Baja	16 días	0,001564
4 lamina rayada x3	Baja	16 días	0,01501
5 Lamina normal P	Baja	32 días	0,0009459
6 Lamina normal E	Baja	32 días	0,0005315
7 Lamina rayada x1	Baja	32 días	0,07524
8 Lamina rayada x3	Baja	32 días	0,2691
9 Lamina normal P	Alta	16 días	0,00005439
10Lamina normal E	Alta	16 días	0,0004542
11 lamina rayada x1	Alta	16 días	0,00003116
12 lamina rayada x3	Alta	16 días	0,00005291
13 Lamina normal P	Alta	32 días	0,07669
14 Lamina normal E	Alta	32 días	0,1503
15 lamina rayada x1	Alta	32 días	0,05086
16 lamina rayada x3	Alta	32 días	0,00002346

- Cálculo de la velocidad de corrosión a partir de la curva de resistencia a la polarización lineal. Para calcular la velocidad de corrosión se debe determinar el valor de la pendiente de la recta tangente a la curva en $i = 0$.

Figura B - 2. Curva resistencia a la polarización lámina rayada X2 bajo condiciones de exposición a cámara salina durante 32 días a Altas concentraciones.



Inicialmente se ajusta un polinomio de tercer grado a la curva, dicho polinomio se deriva, luego se calcula el límite de esta derivada cuando x tiende a 0. Esto con el fin de encontrar la pendiente de la recta tangente en $x = 0$, lo que representa el valor de la resistencia a la polarización.

$$y = 2E+25x^3 + 1E+17x^2 + 3E+10x - 949.44$$

$$\frac{dy}{dx} = 6E + 25X^2 + 2E + 17X + 3E + 10$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{dy}{dx} = 3E + 10$$

$$Rp = 3E + 10$$

Para finalizar se calcula el valor de la densidad de corriente de corrosión a partir del valor resistencia a la polarización y las pendientes de las curvas anódicas y catódicas de la curva potenciodinámica, y por último la velocidad de corrosión a partir de la norma ASTM G102-89.

$$B = \frac{ba * bc}{2,3(ba + bc)} \quad B = \frac{(-117,37) * (125,89)}{2,3(-117,37) + (125,89)} \quad B = 753.034$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_P} \quad i_{corr} = \frac{753.034}{3E10} \quad i_{corr} = 2.5101E - 06 \mu A / cm^2$$

$$CR = K1 (i_{corr}/\rho) EW$$

Dónde:

CR es dado en mm/yr, i_{corr} en $\mu A/cm^2$

K1: $3.27 \cdot 10^{-3}$, mm g/ μA cm yr ρ : densidad en g/cm³

Tabla B - 5. Datos necesarios para calcular velocidad de corrosión

K1	EW	ρ (g/cm ³)
3.27 E-03	26,682	7,75

$$CR (mmpy) = 0,00002826$$

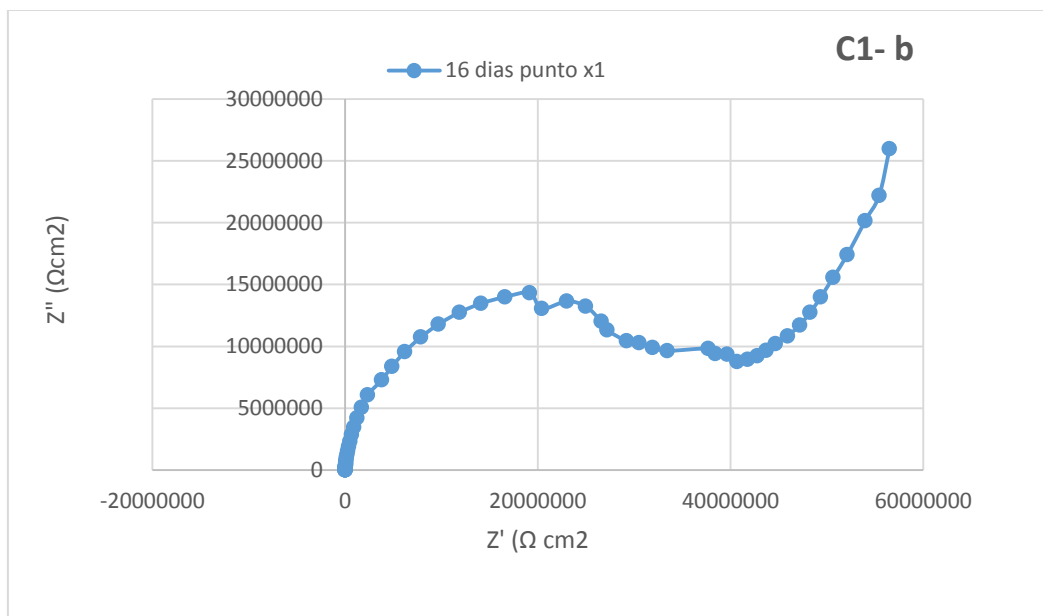
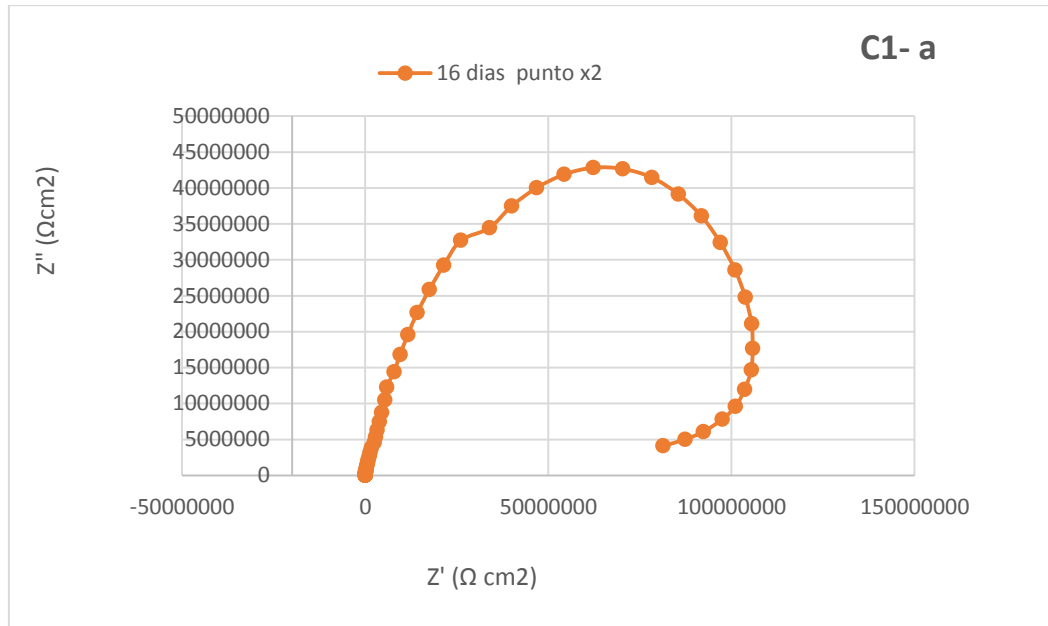
Tabla B – 6. Velocidades de corrosión a partir de curvas resistencia a la polarización lineal.

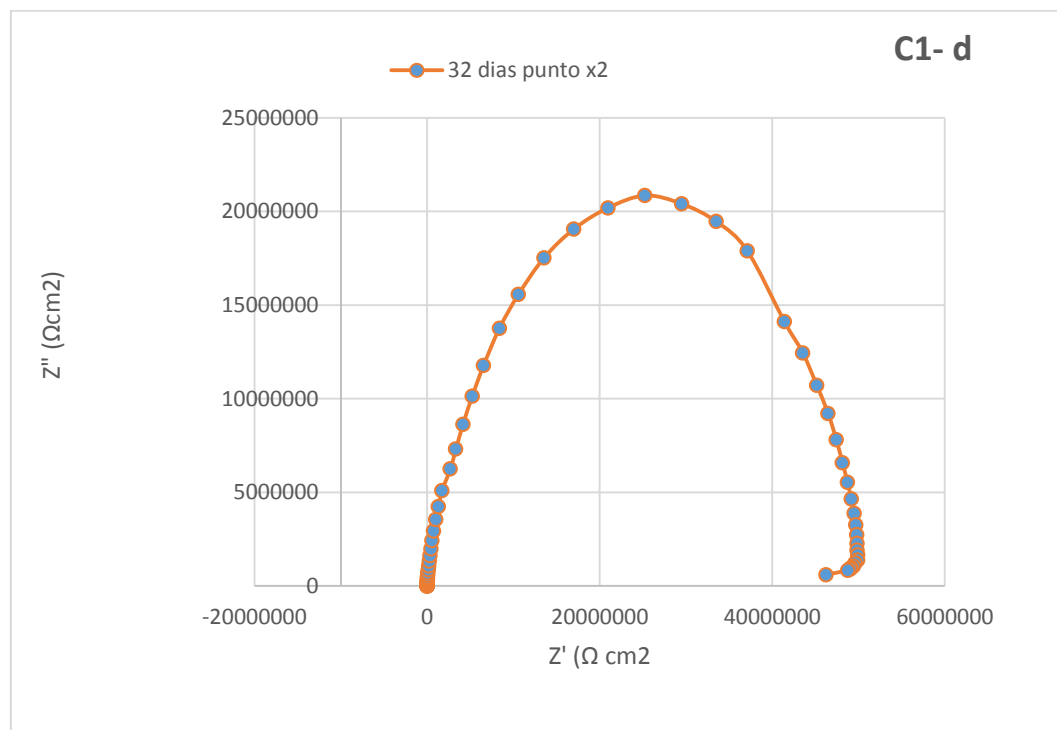
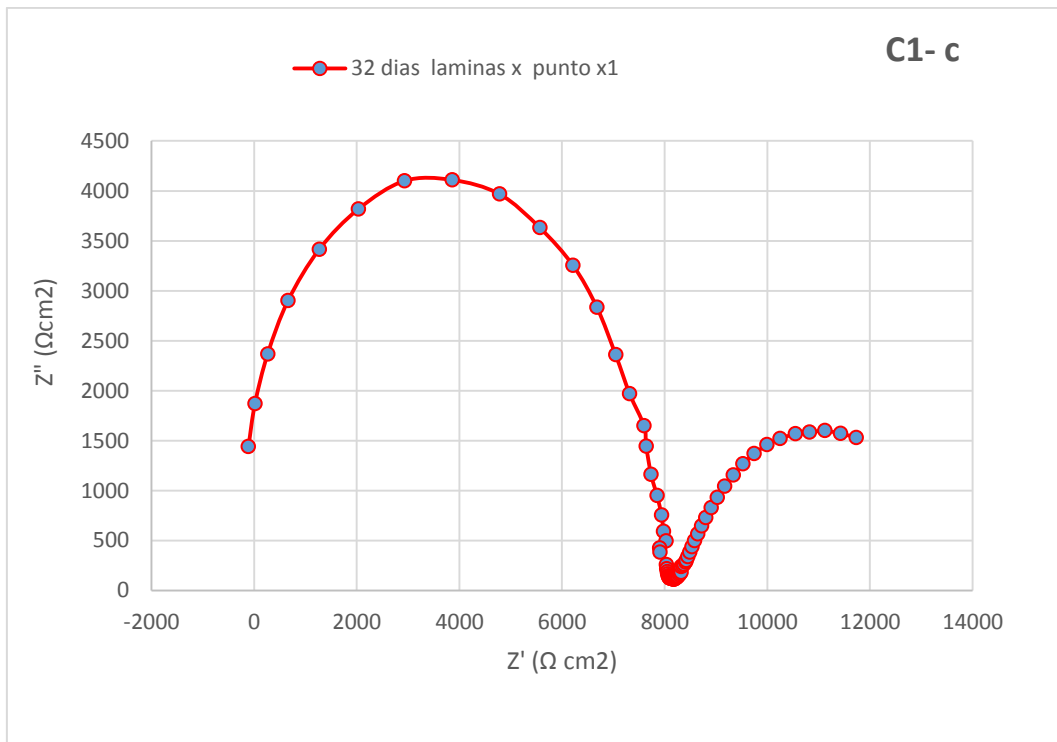
Prueba	Concentración	Tiempo en cámara salina	CR (mmpy)
1 Lamina normal P	Baja	16 días	0,001125
2 lamina normal E	Baja	16 días	0,007450
3 lamina rayada x1	Baja	16 días	0,001636

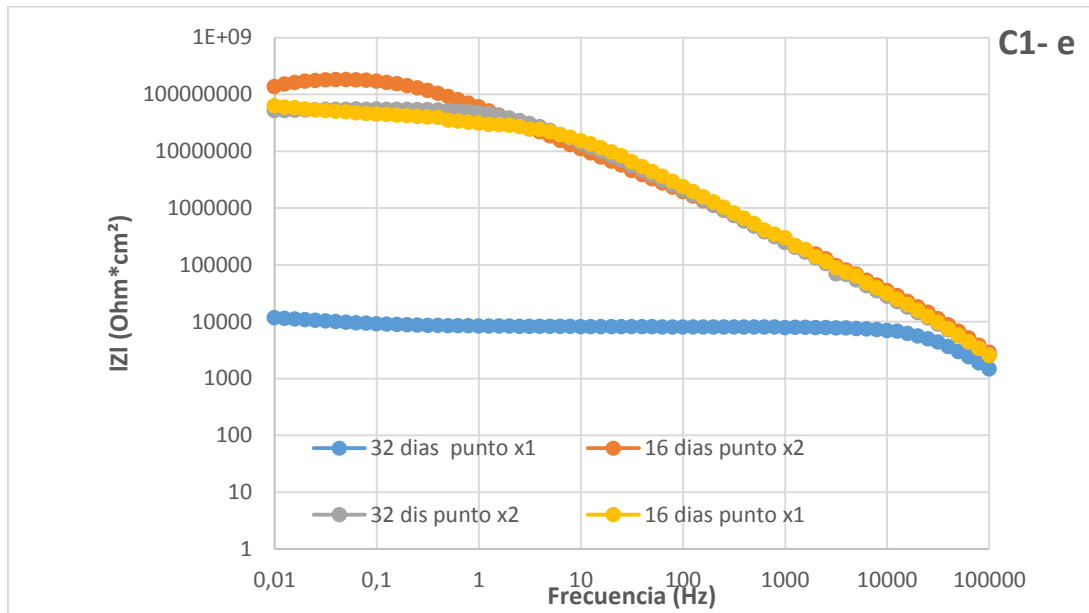
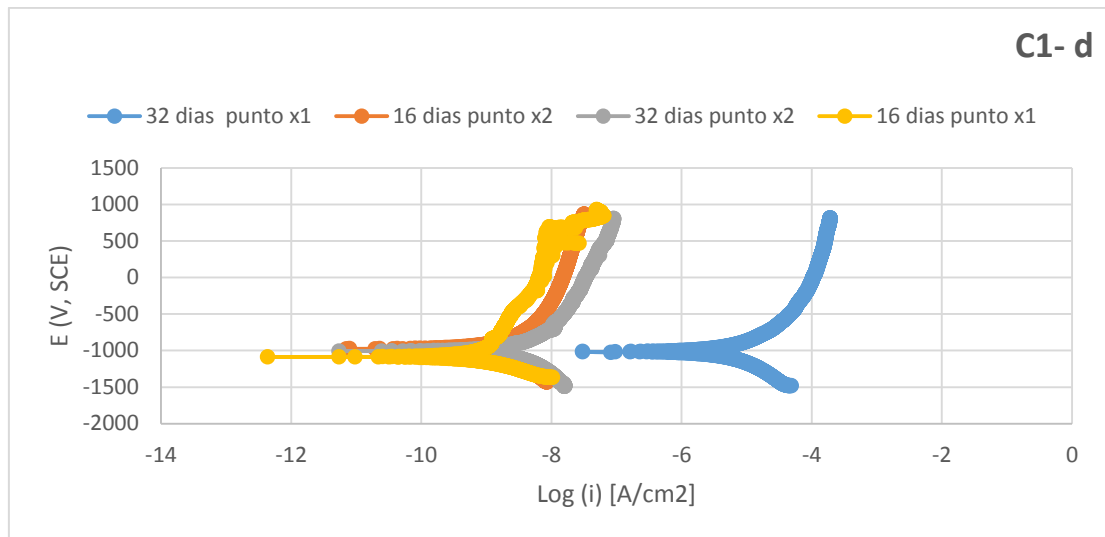
Prueba	Concentración	Tiempo en cámara salina	CR (mmpy)
4 lamina rayada x 3	Baja	16 días	0,02206
5 Lamina normal P	Baja	32 días	0,0004839
6 Lamina normal E	Baja	32 días	0,0004862
7 Lamina rayada x 1	Baja	32 días	0,06500
8 Lamina rayada x 3	Baja	32 días	0,295
9 Lamina normal P	Alta	16 días	0,00004725
10Lamina normal E	Alta	16 días	0,0003364
11 lamina rayada x1	Alta	16 días	0,00002542
12 lamina rayadax3	Alta	16 días	0,0004698
13 Lamina normal P	Alta	32 días	0,076324
14 Lamina normal E	Alta	32 días	0,06867
15 lamina rayada x1	Alta	32 días	0,04288
16 lamina rayada x3	Alta	32 días	0,00001826

Anexo C. Curvas adicionales correspondientes a Nyquist curvas de polarización potenciodinámicas, bode y ángulo de fase

Figura C-1. Curvas de láminas Rayadas expuestas a concentraciones altas durante 16 y 32 días en cámara salina.







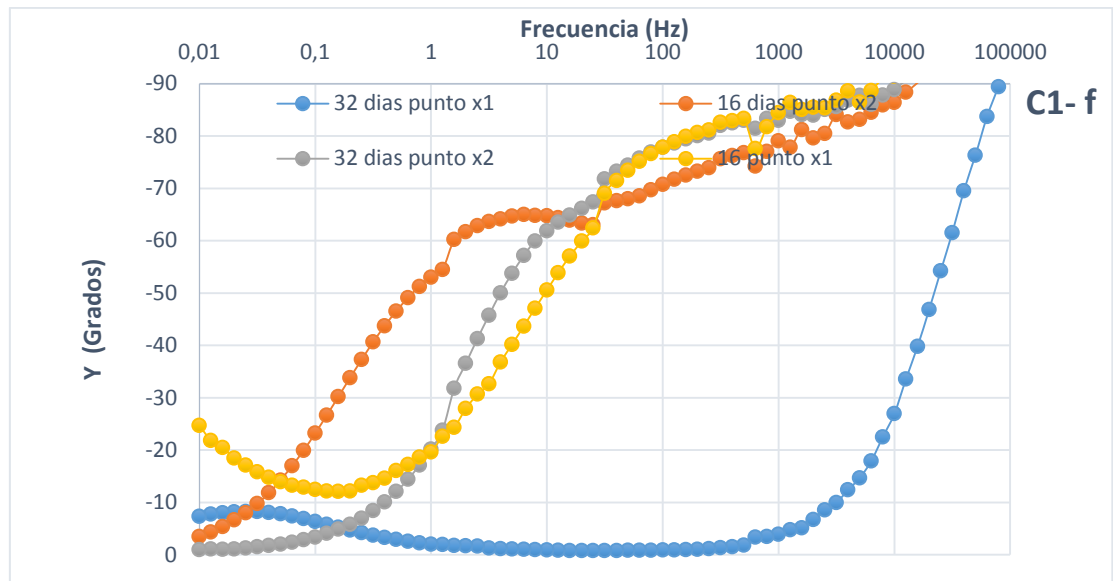
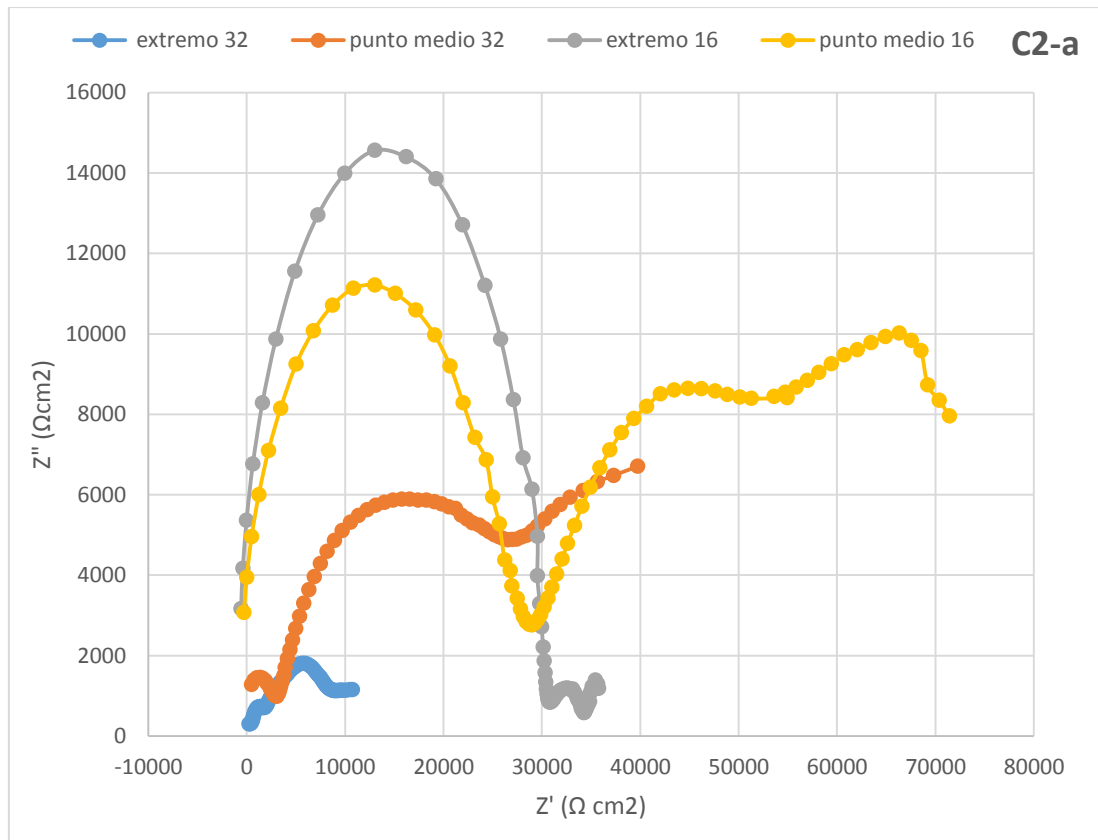
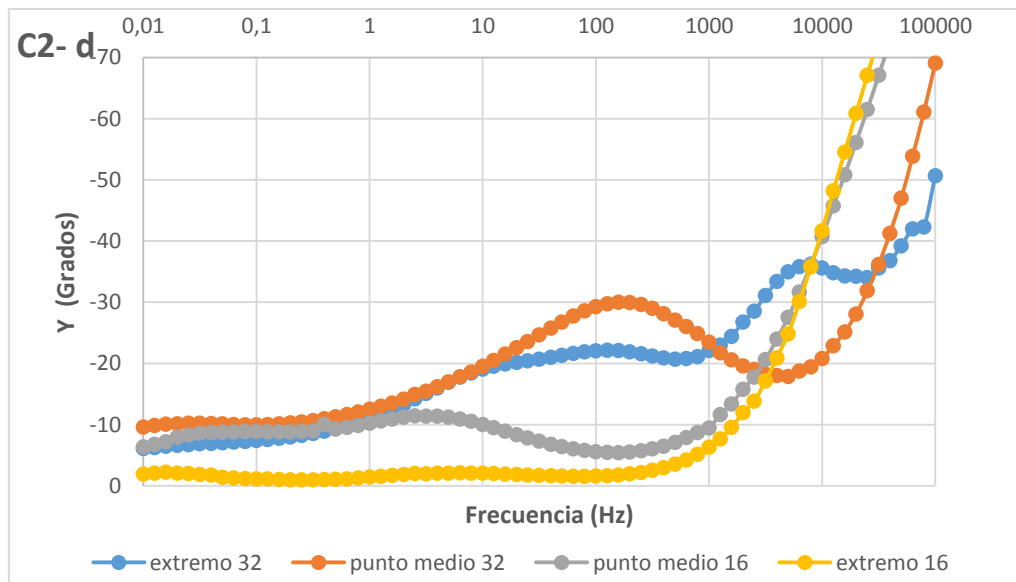
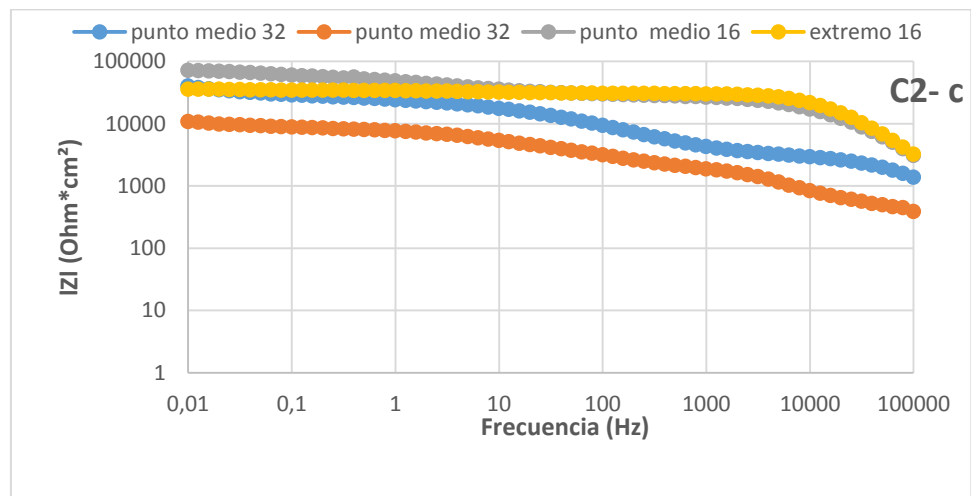
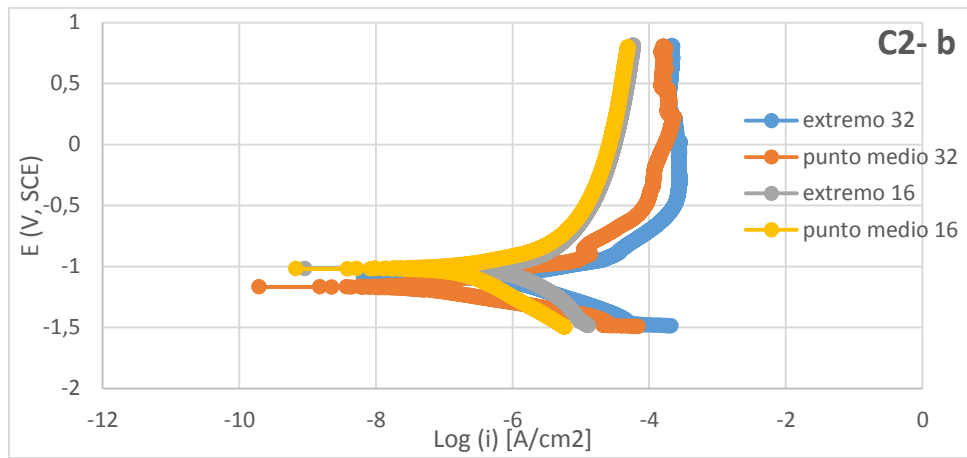


Figura C-2. Curvas de láminas normales expuestas a concentraciones Bajas durante 16 y 32 días en cámara salina.





Anexo D. Circuito equivalente.

La simulación de los circuitos para los ensayos más representativos se presenta a continuación.

Figura D-1. Simulación del diagrama de Nyquist lamina normal concentraciones alta 32 días extremo para la obtención del circuito equivalente por medio del programa ZVIEW y ZPlot.

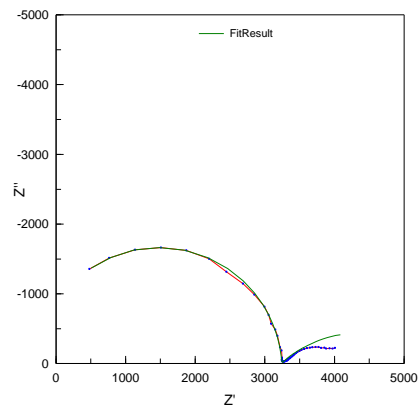


Figura D-2. Simulación del diagrama de bode lamina normal concentraciones altas 32 días extremo para la obtención del circuito equivalente por medio del programa ZVIEW y ZPlot.

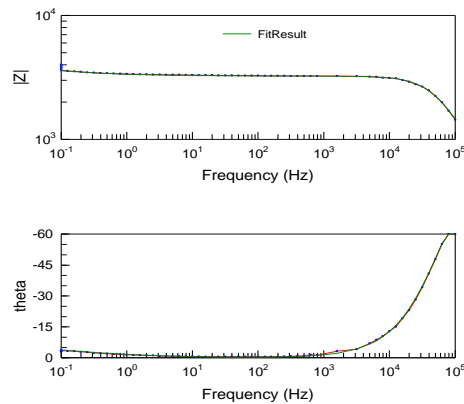
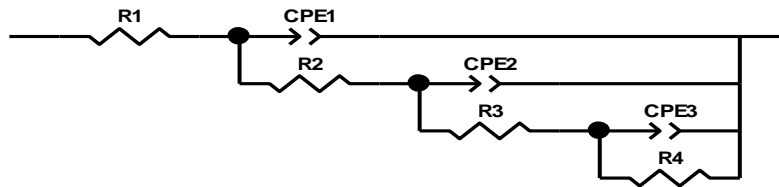


Figura D-3. Circuito equivalente a partir del programa ZView y ZPlot para el sistema lamina normal concentraciones altas 32 días extremo.



Element	Freedom	Value	Error	Error %
R1	Free(±)	-265,2	13,247	4,9951
CPE1-T	Free(±)	1,3226E-09	4,083E-11	3,0871
CPE1-P	Free(±)	0,97007	0,0028621	0,29504
R2	Free(±)	3492	12,906	0,36959
CPE2-T	Free(±)	0,0079637	0,012822	161,01
CPE2-P	Free(±)	0,28653	0,093182	32,521
R3	Free(±)	33,94	216,94	639,19
CPE3-T	Free(±)	-0,0089283	0,0034785	38,96
CPE3-P	Free(±)	0,10771	0,36968	343,22
R4	Free(±)	218,5	651,47	298,16
Chi-Squared:		0,00041943		
Weighted Sum of Squares:		0,049493		

Figura D-4. Simulación del diagrama de Nyquist lámina Rayada X1 concentraciones bajas 32 días para la obtención del circuito equivalente por medio del programa ZVIEW y ZPlot.3

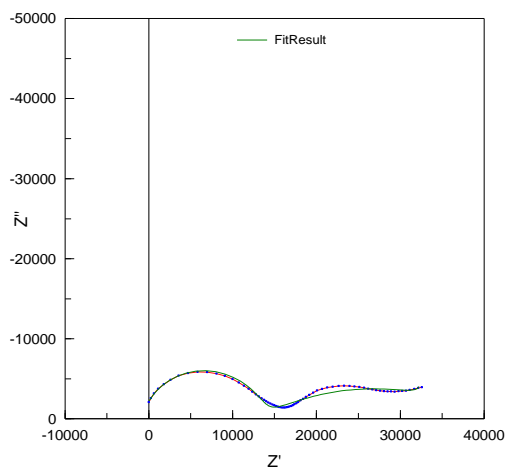


Figura D-5. Simulación del diagrama de bode lámina Rayada X1 concentraciones bajas 32 días para la obtención del circuito equivalente por medio del programa ZVIEW y ZPlot.

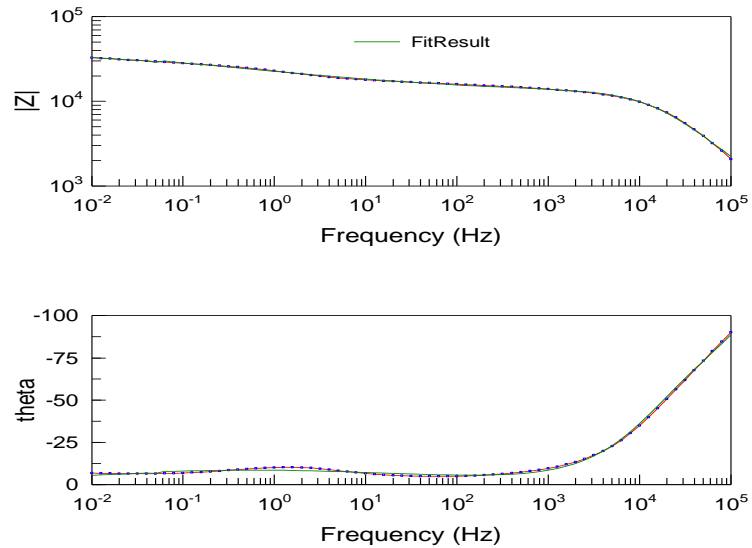
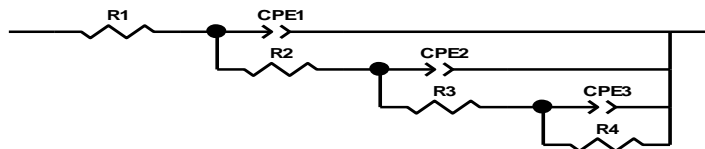


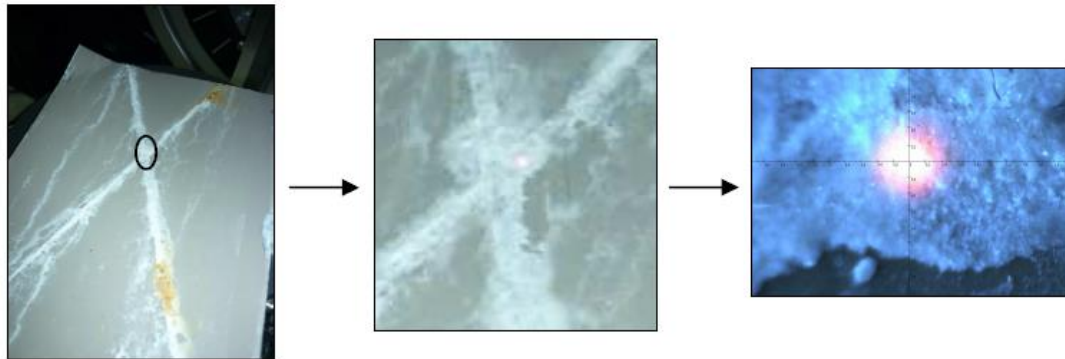
Figura D-6. Circuito equivalente a partir del programa ZView y ZPlot para el sistema lámina Rayada X1 concentraciones bajas 32 días.



Element	Freedom	Value	Error	Error %
R1	Free(±)	-520,9	67,679	12,993
CPE1-T	Free(±)	1,1986E-09	2,1717E-10	18,119
CPE1-P	Free(±)	0,9583	0,014892	1,554
R2	Free(±)	8163	1837	22,504
CPE2-T	Free(±)	5,3051E-05	5,7137E-06	10,77
CPE2-P	Free(±)	0,12499	0,034482	27,588
R3	Free(±)	-1,6741E07	2,7662E09	16524
CPE3-T	Free(±)	0,0050614	2,0353	40212
CPE3-P	Free(±)	-40,38	165,56	410
R4	Free(±)	5,8443E08	3,2212E12	5,5117E05
Chi-Squared:		0,0040061		
Weighted Sum of Squares:		0,5288		

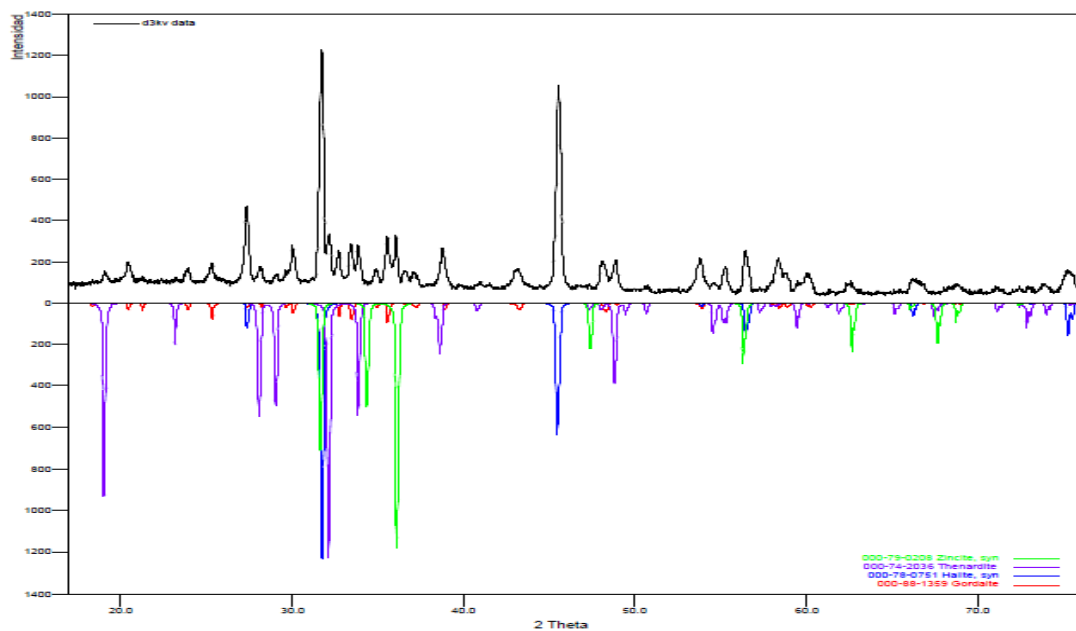
Anexo E. Análisis de caracterización.

Figura E-1. Lamina 32 días concentración alta



Fuente: Universidad industrial de Santander- Sede UIS-Guatiguará- Edificio de Investigaciones Laboratorio de Rayos X.

Figura E-2. Espectro de difracción de rayos X Lamina rayadas 32 días concentraciones altas.



Fuente: Universidad industrial de Santander- Sede UIS-Guatiguará- Edificio de Investigaciones Laboratorio de Rayos X. Espectro de difracción de rayos X Lamina X

Tabla E-1. Fases cristalinas presentes en la Lámina rayadas

	FASE	NOMBRE
Cristalinos	$\text{NaZn}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_6$	Gordaita
	NaCl	Halita
	Na_2SO_4	Thenardita
	ZnO	Zincita

Fuente: Universidad industrial de Santander- Sede UIS-Guatiguará- Edificio de Investigaciones Laboratorio de Rayos X. Espectro de difracción de rayos X de la arena.

Figura E-3. Micrografía superficial de lámina galvanizada y pintada - SEM a condiciones de lámina normal en concentraciones altas expuestas en cámara salina durante 16 y 32 días. Magnificación 2000 X.



Fuente: Universidad Industrial de Santander- Sede UIS – Guatiguará – Edificio de Investigaciones- Laboratorio de Microscopía.

Anexo F. Velocidad de corrosión de un acero galvanizado

Tabla F-1. velocidad de corrosión de un acero galvanizado

Prueba	Rp (ohm/cm ²)	log icorr tafel (mA/cm ²)	i (mA/cm ²)	i (μA/cm ²)	CR (mm/yr)
1	6.599	-4.114	0.016	16.337	0.189
2	6.991	-4.307	0.013	13.464	0.156
3	0.369	-3.634	0.026	26.406	0.306
4	0.503	-3.660	0.025	25.716	0.298
5	1.036	-3.890	0.020	20.434	0.237
6	0.937	-3.906	0.020	20.107	0.233
7	1.138	-3.744	0.023	23.650	0.274
8	1.417	-3.867	0.020	20.911	0.242
a1	2.955	-3.495	0.030	30.322	0.351
a2	4.003	-4.007	0.018	18.184	0.211
b1	1.235	-4.016	0.0180	18.022	0.209
b2	1.403	-3.700	0.024	24.706	0.286

Fuente: tesis Chehin Arias Uis

La tabla F-1 de la velocidad de corrosión de un acero galvanizado expuesto a concentraciones similares a las realizadas en este estudio. Se utilizó como patrón de comparación para observar el desempeño del recubrimiento evaluado.