

**EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN DE UN ACERO GALVANIZADO CON
DIFERENTES ESPESORES EN UNA SOLUCIÓN CON CONTENIDO DE
CLORUROS Y SULFATOS**

PEDRO ANTONIO CABRALES VILLAMIZAR

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

**EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN DE UN ACERO GALVANIZADO CON
DIFERENTES ESPESORES EN UNA SOLUCIÓN CON CONTENIDO DE
CLORUROS Y SULFATOS**

PEDRO ANTONIO CABRALES VILLAMIZAR

**Trabajo de Grado, presentado como requisito para optar el Título de
INGENIERO METALÚRGICO**

Director:

**DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS
DOCTOR EN CORROSIÓN**

Codirector:

**ANDERSON SANDOVAL AMADOR
MAGISTER EN INGENIERIA DE MATERIALES**

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

2017

DEDICATORIA

A Dios por darme la salud y vitalidad que se necesita para llevar a cabo cualquier proyecto en nuestras vidas.

A mis padres Pedro Antonio Cabrales Vizcaíno y Yojaira Villamizar Molina porque siempre estuvieron ahí apoyándome en mis tropiezos, desaciertos y victorias, aunque ninguna dedicatoria podría representar el inmenso agradecimiento que tengo por ellos.

A mi tía Nery Villamizar que más que una tía ha sido como mi madre, siempre amorosa, tolerante e incondicional.

A mis hijos Santiago Andrés Cabrales, Gerónimo Andrés Cabrales y Sofía Cabrales que son el motivo por el que emprendí este reto, posiblemente sin ellos hubiese desfallecido en el camino.

A mis demás familiares y amigos que de una u otra forma estuvieron ahí apoyándome en este reto y creyeron en mí.

AGRADECIMIENTOS

A mi codirector Anderson Sandoval que guio, enseñó y asesoró en este proyecto, sin el todo se hubiese tornado más complicado.

A mi director Darío Yesid Peña Ballesteros por darme la oportunidad de llevar este proyecto a cabo en ese momento tan difícil y complicado de mi vida personal y académica.

Al grupo de corrosión GIC por abrirme las puertas y asesorarme en cada paso de este proyecto.

A los técnicos de los laboratorios de la escuela de ingeniería metalúrgica que siempre tuvieron una buena actitud para colaborar con lo que fuere necesario.

Al laboratorio de rayos x del parque tecnológico Guatiguará por realizar los EDX necesarios en este proyecto.

Al laboratorio de microscopia del parque tecnológico Guatiguará por realizar los ensayos necesarios para llevar a cabo etapas y actividades en este trabajo.

A la universidad industrial de Santander por brindar las herramientas necesarias para llevar a cabo este proyecto, como base de datos, servicio de comedores, bienestar universitario etc.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS	17
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ACERO GALVANIZADO	18
2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTAL.....	19
2.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	20
2.4. ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS.....	20
2.5. CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL	21
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	22
3.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO Y EL GALVANIZADO.....	22
3.2. ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS.....	24
3.2.1. Diagramas de Nyquist.....	24
3.2.2. Resistencia a la polarización lineal	28
3.2.3. Análisis de las curvas de polarización potenciodinámica	29
3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN	32
4. CONCLUSIONES	38
5. RECOMENDACIONES.....	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
BIBLIOGRAFÍA.....	44

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. PARÁMETROS DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTE... 50	
ANEXO B. CURVAS POTENCIODINÁMICAS.....55	
ANEXO C. CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES DE CORROSIÓN....56	
ANEXO D. DIFRACTOGRAMAS DE RAYOS X.....59	

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Diseño de experimentos	19
Tabla 2. Análisis gravimétrico de las láminas de acero galvanizado	23
Tabla 3. Parámetros de elementos de circuito eléctrico equivalente con que se realizó el ajuste de las láminas de acero galvanizado a 0 días de exposición.	27
Tabla 4. Parámetros de elementos de circuito eléctrico equivalente con que se realizó el ajuste de las láminas de acero galvanizado a 7 días de exposición.	28
Tabla 5. Parámetros de elementos de circuito eléctrico equivalente con que se realizó el ajuste de las láminas de acero galvanizado a 15 días de exposición.....	28
Tabla 6. Productos de corrosión formados en las láminas de acero galvanizado tras 15 días de exposición.	37

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de la metodología seguida para el desarrollo de este trabajo	18
Figura 2. a) Esquema de las dimensiones de las muestras empleadas y b) Esquema del montaje de exposición de las muestras a solución 1.....	20
Figura 3. Metalografía de las láminas de acero galvanizado. a) Acero y b) Interface acero – galvanizado.....	22
Figura 4. a) Tamaño de flor acero Z180, b) Tamaño de flor acero Z120, c) Tamaño de flor acero Z90.....	23
Figura 5. Micrografías de la sección transversal de las láminas de acero galvanizado. a) Z90, b) Z120 y c) Z180	24
Figura 6. Diagramas de Nyquist para las láminas de acero galvanizado expuestas a diferentes tiempos. a) 0 días, b) 7 días y c) 15 días.....	26
Figura 7. Valores de resistencia a la polarización lineal de las láminas de acero galvanizado a diferente tiempo de exposición (días) a la solución 1.	29
Figura 8. Curvas de polarización potenciodinámica de las muestras de acero galvanizado a cero días de exposición a la solución 1 (ver tabla 1).	30
Figura 9. Velocidades de corrosión de las láminas de acero galvanizado a diferentes tiempos de exposición (días) a la solución 1.	31
Figura 10. Morfología de las láminas de acero galvanizado después de 15 días de exposición a) Z90, b) Z120, c) Z180, d) Z90 – 200X, e) Z120 – 200X, f) Z180 – 200X.....	32
Figura 11. Mapa de composición química de la muestra Z90 después de 15 días de exposición	33
Figura 12. Mapa de composición química de la muestra Z120 después de 15 días de exposición.....	34

Figura 13. Mapa de composición química de la muestra Z180 después de 15 días de exposición.	35
Figura 14. Difractograma de la muestra de acero galvanizado Z180 después de 15 días de exposición.	36

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS DE UN ACERO GALVANIZADO CON DIFERENTES ESPESORES EN UNA SOLUCIÓN CON CONTENIDO DE CLORUROS Y SULFATOS*

AUTOR: PEDRO ANTONIO CABRALES VILLAMIZAR**

PALABRAS CLAVE: galvanizado, corrosión, tamaño de grano, espesor

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo presenta el comportamiento de corrosión del acero galvanizado en soluciones de iones cloruros y sulfatos que simulan la exposición a un ambiente tropical. Se estudió el efecto del espesor y del tiempo de exposición en la susceptibilidad a la rotura de la película y la protección de la película de Zinc-Aluminio utilizando técnicas electroquímicas tales como resistencia a la polarización lineal, curvas de polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica. Los productos de corrosión se analizaron mediante SEM-EDS y DRX. Mediante las diferentes pruebas se pudo concluir que las muestras con menor espesor en la película de zinc aluminio (Z90) tuvieron la menor tasa de corrosión en los tiempos de análisis, mientras que las muestras con espesor (Z120) mostraron un bajo desempeño en los tiempos de exposición de 7 y 14 días. A pesar que las láminas (Z180) en el tiempo 0 mostraron las mayores velocidades de corrosión, en los tiempos 7 y 15 días estas tuvieron la capacidad de producir una capa pasivante la cual aumento su resistencia a la corrosión, además mediante microscopia óptica se pudo observar que la lámina (Z180) no presento daño en el metal base a diferencia de los otros, el mejor comportamiento de la lámina (Z90) se atribuyó a su menor tamaño de grano el cual produce menores velocidades de corrosión, Sin embargo, los resultados muestran que la capa de corrosión formada no es protectora bajo ninguna de las condiciones estudiadas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director del proyecto: Ph.D. Darío Yesid Peña Ballesteros. Codirector del Proyecto: Físico. Anderson Sandoval Amador.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF CORROSION BY ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES OF A GALVANIZED STEEL WITH DIFFERENT THICKNESSES IN A SOLUTION WITH CONTENTS OF CHLORIDES AND SULPHATES*

AUTHORS: PEDRO ANTONIO CABRALES VILLAMIZAR**

KEY WORDS: Galvanizing, corrosion, grain size, thickness

DESCRIPTION:

This work presents the corrosion behavior of galvanized steel in solutions of chloride ions and sulfates that simulate exposure to a tropical environment. The effect of the thickness and the exposure time on the susceptibility to film rupture and the protection of Zinc-Aluminum film were studied using electrochemical techniques such as linear polarization resistance, potentiodynamic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy. Corrosion products were analyzed by SEM-EDS and XRD. By means of the different tests, it was possible to conclude that the samples with smaller thickness in the zinc aluminum film (Z90) had the lowest corrosion rate in the analysis times, whereas the samples with thickness (Z120) showed a low performance in the times Of exposure of 7 and 14 days. Although the films (Z180) at time 0 showed the highest rates of corrosion, at 7 and 15 days they had the capacity to produce a passivating layer which increased their resistance to corrosion, also by means of optical microscopy Note that the sheet (Z180) showed no damage to the base metal unlike the others, the better behavior of the sheet (Z90) was attributed to its smaller grain size which produces lower rates of corrosion. However, the results Show that the corrosion layer formed is not protective under any of the conditions studied.

* Working Grade

** Physical Chemical Engineering Faculty. School of Chemical Engineering. Project Director: Ph.D. Dario Yesid Peña Ballesteros. Project Co-director: Physicist. Anderson Sandoval Amador

INTRODUCCIÓN

Los revestimientos de aleación de zinc han desempeñado un papel importante en la mejora de la resistencia a la corrosión de los aceros utilizados en las industrias automovilísticas, de construcción y de fabricación de electrodomésticos durante los últimos treinta años [9-12], esto gracias a que los recubrimientos de zinc actúan como una capa barrera y también protege catódicamente al acero. La capa de barrera, se debe al aislamiento del acero del medio ambiente a través de la capa de zinc y esta a su vez se va degradando formando productos de corrosión en su superficie los cuales también actúan como barrera, una vez el sustrato este expuesto ya sea por la degradación de la capa de zinc o por imperfecciones en el material tales como rayones, empieza la protección catódica, lo cual quiere decir que incluso si el sustrato se expone, la capa de zinc corroerá preferentemente [13-15]. Los recubrimientos basados en zinc se pueden obtener por electrodeposición, rociamiento térmico o inmersión en baños de metal líquido (inmersión en caliente) a 450 ° C [16], [17]. Además se pueden encontrar con diferentes elementos como Zn-Ni), (Zn-Ni-Co), (Zn-CoCr), (Zn-Co-Mo) siendo el galvanizado (Zn-0.2% p/p de Al) el más utilizado industrialmente en Colombia el [2].

La degradación de los aceros galvanizados sucede en varias etapas, primero se forman compuestos principalmente de óxido de zinc, estos forman una capa adherente y porosa que tiene un color blanco característico. La protección galvánica que el zinc proporciona al acero se produce en esta etapa cuando pequeñas áreas del acero están expuestas al medio ambiente debido a arañazos u otras imperfecciones del recubrimiento. En la segunda etapa, la capa de productos de corrosión crece hasta que se agota el zinc y se forma una capa gruesa, porosa y no protectora de productos de corrosión. El componente principal de esta capa es el hidróxido de zinc: $Zn(OH)_2$. Durante esta etapa, el frente de corrosión llega a la capa de aleación de Zn-Fe y el acero galvanizado experimenta un cambio de su

potencial de corrosión a valores más nobles. En la tercera etapa, se inicia la corrosión del acero liberándose iones de hierro (Fe^{2+}), los productos de corrosión en esta etapa se hacen visibles como óxido rojo [13-25].

La disminución de la velocidad de degradación de estos recubrimientos ha motivado a muchos investigadores a realizar numerosas investigaciones [1-7], esto con el fin de encontrar los factores que afectan la resistencia frente a la corrosión de los aceros galvanizados, algunas de estas investigaciones han concluido que La química, la morfología de la superficie, la composición de la aleación, la composición de la fase y el proceso de deposición de los recubrimientos de zinc y hierro influyen fuertemente en su resistencia frente a la corrosión [12-21].

Ramírez y colaboradores [1] evaluaron el efecto del tamaño del cristal de zinc en la resistencia a la corrosión de láminas de acero galvanizado, esta investigación mostró que tamaños de grano mayores tenían mayores velocidades de corrosión y que los iones sulfatos eran los encargados de destruir la capa de zinc mientras que los iones cloruros penetraban sobre el recubrimiento hasta llegar al sustrato, produciendo corrosión localizada. Por otra parte, Sandoval y colaboradores [2] realizaron un estudio en donde se variaba las concentraciones de cloruros y sulfatos, a su vez analizaron el efecto que tiene el tiempo de exposición frente a la resistencia a la corrosión del acero galvanizado en una solución con los iones anteriormente mencionados llegando a la conclusión que el potencial de corrosión y la velocidades de corrosión aumentaban con el tiempo, también se observó corrosión por picado en los aceros estudiados. En otra investigación Pritzel dos Santos y colaboradores [19] estudiaron el comportamiento frente la corrosión de aceros galvanizados por diferentes métodos de producción y composiciones, tales como electrogalvanizado, galvanneal y galvanizado en caliente, en donde por medio de un spray con solución salina simulaban la sal presente en los ambientes tropicales concluyendo que el acero galvanizado en caliente es el que tiene mejor resistencia a la corrosión.

Con el fin de seguir estudiando todos los factores que afectan y que pueden mejorar las propiedades de los aceros galvanizados se lleva a cabo esta investigación en la cual se pretende evaluar por medio de técnicas electroquímicas tales como resistencia a la polarización (R_p), curvas de polarización potenciodinámicas y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), el efecto que tiene el espesor del galvanizado y el tiempo de exposición en una solución con cloruros y sulfatos en el comportamiento frente a la corrosión de unas láminas de acero galvanizado. Además por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos x (DRX) se caracterizaran los productos obtenidos en la superficie del recubrimiento.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento electroquímico de un acero galvanizado con diferentes espesores expuesto a una solución con cloruros y sulfatos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la velocidad de corrosión de un acero galvanizado por medio de técnicas electroquímicas.
- Analizar el efecto que tiene el espesor del galvanizado en la resistencia a la corrosión de una lámina de acero.
- Identificar la morfología y el tipo de productos de corrosión que se forma en láminas galvanizadas expuestas a una solución con cloruros y sulfatos.

2. METODOLOGÍA

En la figura 1 se puede apreciar un esquema de la metodología seguida para el desarrollo de este proyecto.

Figura 1. Esquema de la metodología seguida para el desarrollo de este trabajo



2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ACERO GALVANIZADO

Las muestras de acero galvanizado se observaron mediante microscopía óptica para conocer la microestructura del acero y el tamaño de la flor de zinc de los distintos espesores, para ello se realizó una preparación de la muestra basándose en la norma ASTM E-3 [26] y posteriormente fueron atacadas con Nital. Además para determinar el espesor de las capas de galvanizado se realizó un ensayo gravimétrico mediante una balanza analítica.

2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTAL

Con el fin de evaluar el rompimiento de la capa protectora del acero galvanizado en este estudio se tuvieron en cuenta las siguientes variables: tiempo de exposición, espesor de la capa de galvanizado y efecto del ion Cl^- y SO_4^{2-} . Por lo que el diseño de experimentos para este proyecto quedo como se muestra en la tabla 1. Las muestras empleadas en este trabajo se denominaron Z90, Z120 y Z180, estos nombres se les dieron teniendo en cuenta el espesor de la capa de galvanizado, donde Z hace referencia al zinc y el número 90, 120 y 180 está ligado a los gramos de cinc que hay por metro cuadrado en ambas caras de las muestras.

Tabla 1. Diseño de experimentos

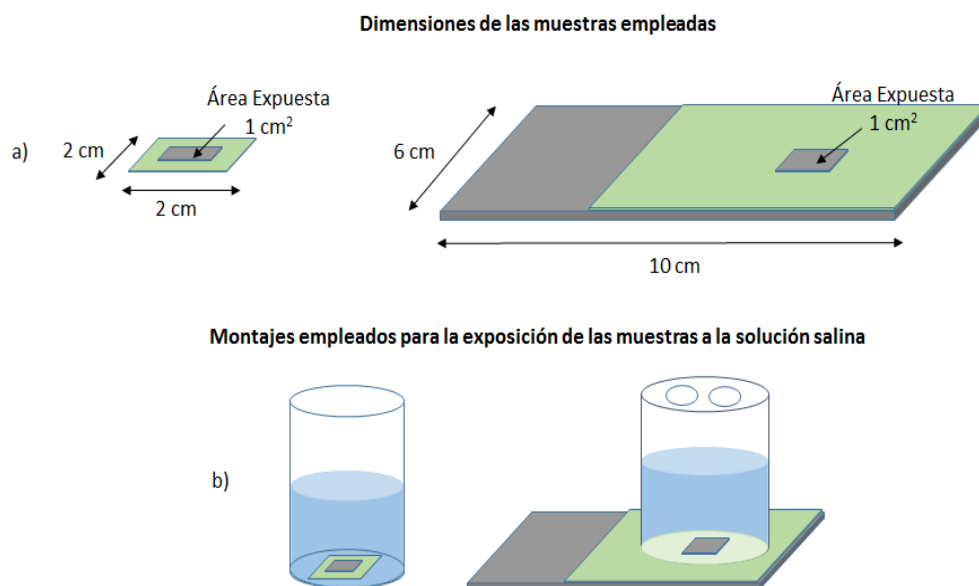
Variables	Valores		
Espesor	Z90	Z120	Z180
Tiempo	0 días	7 días	15 días
Solución 1	15.15 g/L NaCl	16.08 g/L Na ₂ SO ₄	
Solución 2	15.15 g/L NaCl	----	
Solución 3	---	16.08 g/L Na ₂ SO ₄	

La solución de NaCl + Na₂SO₄ permite simular la exposición de las láminas de acero galvanizado a un ambiente tropical, la solución que fue empleada para todas las pruebas que aparecen en esta investigación fue la solución 1 de la tabla 1 y para conocer el efecto de los iones cloruros y sulfatos por separados se utilizaron las soluciones 2 y 3 solo para el acero galvanizado Z120 en un tiempo 0.

2.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras de acero galvanizado fueron cortadas en dos grupos, El primer grupo de muestras se cortó con dimensiones de 2x2 cm. Estas muestras se emplearon para realizar caracterización de los productos formados en las superficie de los galvanizados después de estar 15 días expuestos a una solución que contiene cloruros y sulfatos (ver figura 2). El segundo grupo se cortó con dimensiones de 6x10 cm. Las cuales fueron empleadas para llevar a cabo la caracterización electroquímica de la capa protectora del acero galvanizado. En los dos casos el área de exposición de las muestras fue de 1 cm².

Figura 2. a) Esquema de las dimensiones de las muestras empleadas y b) Esquema del montaje de exposición de las muestras a solución 1.



2.4. ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS

Para la caracterización electroquímica de las muestras de acero galvanizado se empleó un potenciostato/galvanostato grammy 750 y una celda plana de tres

electrodos donde se utilizó Ag/AgCl 3 M KCl como electrodo de referencia y una barra de grafito de alta pureza como contraelectrodo, como electrolito se utilizó la solución 1 de la tabla 1. Se registró el potencial a circuito abierto durante 1 hora antes de cada prueba electroquímica. Los espectros de impedancia electroquímica se obtuvieron aplicando 10 mV AC, realizado un barrido de frecuencias de 0.01 a 100000 Hz y registrando 10 puntos por década [27]. Las pruebas de polarización lineal se llevaron a cabo haciendo un barrido de potencial de +/- 10 mV vs EOC alrededor del potencial de equilibrio con una velocidad de barrido de 0.166 mV/s. Por último, las curvas de polarización potenciodinámica se realizaron dentro de una ventana de potencial que va desde -500 mV vs Eoc hasta 2000 mV vs Eoc, con una velocidad de barrido de 1 mV/s [28].

2.5. CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL

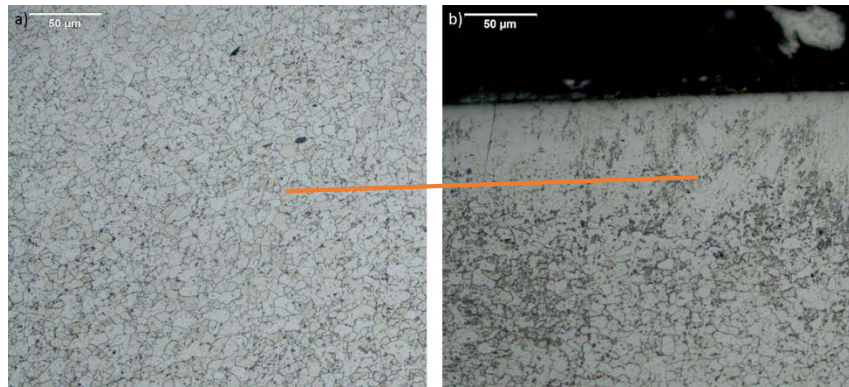
La morfología y la composición de las superficies de acero galvanizado se caracterizaron mediante microscopia electrónica de barrido y espectroscopia de energía dispersiva de rayos X, empleando un microscopio electrónico de barrido SEM EVO MA 10 equipado con un detector Oxford X - ACT y software Inca. Además, se realizó difracción de rayos X a las muestras con el fin de determinar las fases cristalinas presentes en los productos de corrosión que se formaron tras la exposición de las muestras durante 15 días a la solución 1. El equipo utilizado para este fin fue un difractómetro Brucker D8 Discover.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO Y EL GALVANIZADO

En la figura 3 se puede observar la microestructura del acero empleado en este estudio. La figura 4a muestra una estructura ferrítico-perlítica, donde predominan los granos de ferrita, esto indica que el acero de estudio tiene bajo contenido de carbono. Por otra parte, en la figura 4b se observa la interface acero – galvanizado. Esto se debe a que la solución del Nital solo revela la microestructura del acero y no ataca el recubrimiento de zinc.

Figura 3. Metalografía de las láminas de acero galvanizado. a) Acero y b) Interface acero – galvanizado.



Con el fin de verificar la cantidad de zinc presente en las muestras (g/m^2) que se emplearon en este trabajo, se llevó a cabo un ensayo gravimétrico el cual permite estimar la cantidad de zinc que tienen los recubrimientos (ver tabla 3). Los resultados muestran que las láminas efectivamente corresponden a los 90, 120 y 180 g/m^2 de zinc en ambas caras.

Tabla 2. Análisis gravimétrico de las láminas de acero galvanizado

Análisis gravimétrico de láminas acero galvanizado				
MUESTRA	Mi	Mf	ΔM	Galv. [g/m ²]
Z90	1,6097	1,5382	0,0715	56,31
Z120	2,5383	2,4724	0,0659	72,59
Z180	15,5572	15,4139	0,1433	101,19

En la figura 4 se observan las mediciones de los diferentes tamaños de flor de zinc de los espesores evaluados en donde se observa un aumento de los tamaños de grano a medida que aumenta el espesor.

Figura 4. a) Tamaño de flor acero Z180, b) Tamaño de flor acero Z120, c) Tamaño de flor acero Z90

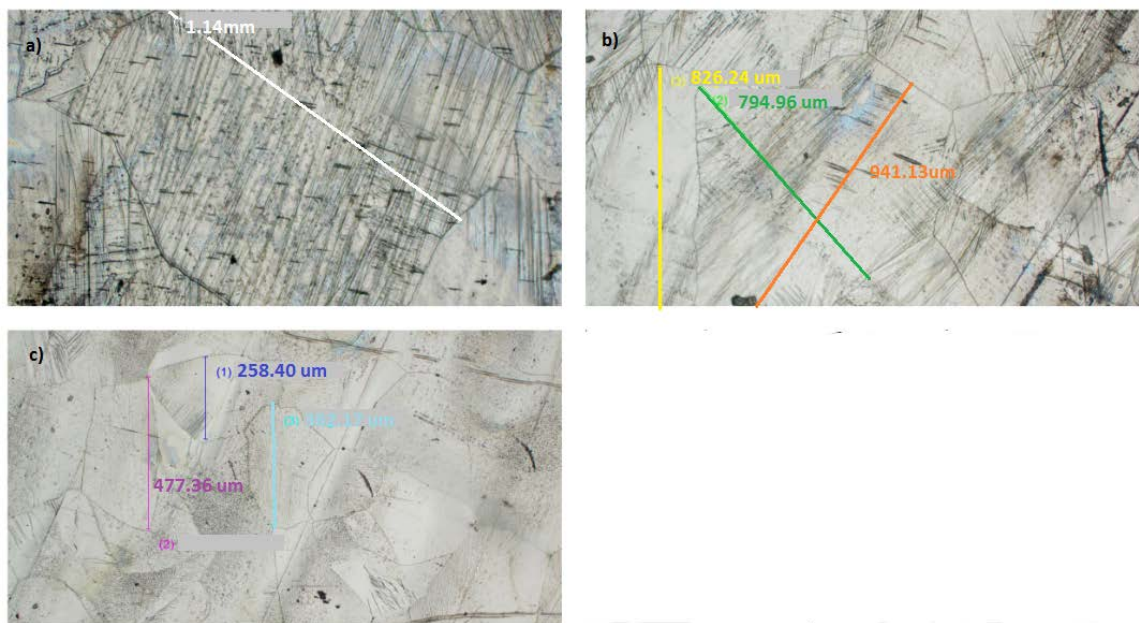
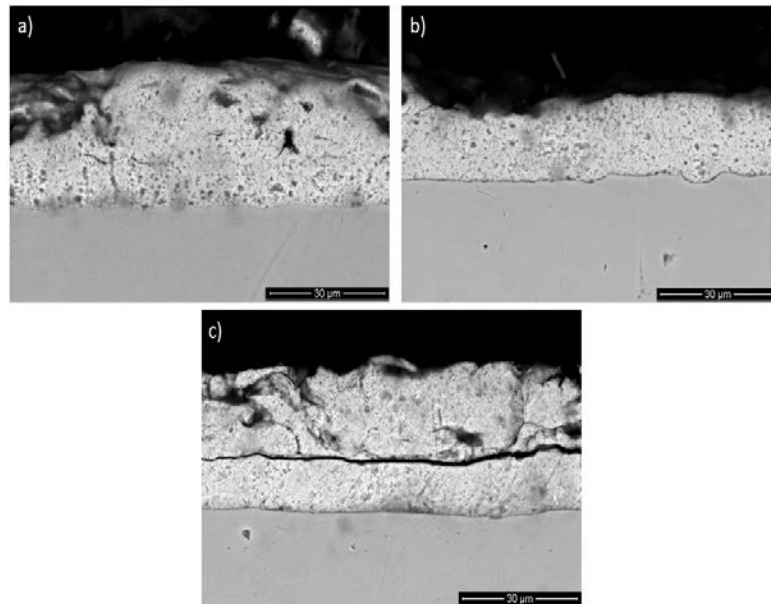


Figura 5. Micrografías de la sección transversal de las láminas de acero galvanizado. a) Z90, b) Z120 y c) Z180



En la figura 5 se muestran las secciones transversales de las láminas de acero galvanizado Z90, Z120, Z180, en donde se observan en la figura 5a y 5b capas de zinc uniformes con presencia de poros en su estructura, mientras que en la figura 5c se puede apreciar una grieta la capa de zinc. Es posible que esta grieta se haya formado en el recubrimiento durante el proceso de enfriamiento de la capa protectora o mediante la preparación metalográfica.

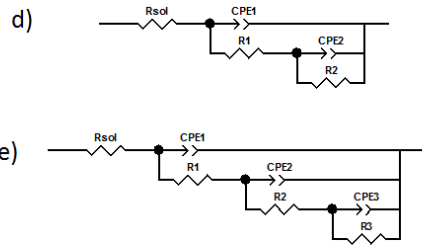
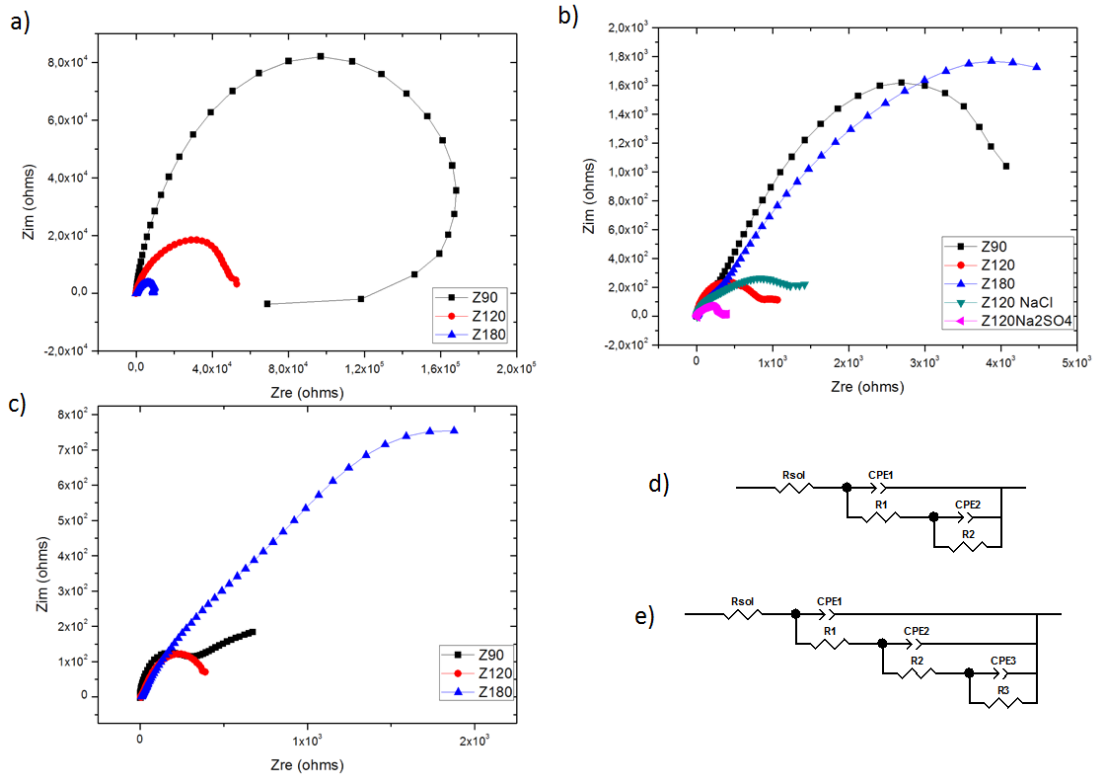
3.2. ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS

3.2.1. Diagramas de Nyquist. En los diagramas de Nyquist de la figura 6 se presenta el comportamiento de las láminas de acero galvanizado expuestas a diferentes tiempos en la solución 1. Además, se puede apreciar el efecto del ion Cl^- y SO_4^{2-} en la degradación de la superficie de las láminas Z120 a 7 días de exposición (figura 6b). Como se puede apreciar en la figura 6a, la lámina de acero galvanizado

Z90 es la que presenta el mejor comportamiento frente a la corrosión, lo cual se atribuye al diámetro del domo que presenta. Además, se puede ver que esta muestra es la única que presenta un pequeño laso inductivo, el cual se asocia en estos casos a la adsorción de especies en la superficie. Estas especies adsorbidas, generalmente causan la formación de productos de corrosión sobre la superficie del acero galvanizado y estos a su vez pueden ser la causa de que esta muestra presente tan buen desempeño bajo las condiciones de estudio.

Por otra parte, en la figura 6b se puede observar que el ion sulfato causa el mayor deterioro de las láminas galvanizadas, esto ocurre porque este ion forma compuestos que son solubles en la solución y que son reabsorbidos por la superficie de manera continua. También, se puede apreciar el efecto del ion cloruro, el cual se debe principalmente a fenómenos de difusión del ion a través de la capa del galvanizado que permiten que este llegue al material base. El comportamiento intermedio que se puede apreciar en la lámina Z120 se debe a que los productos de corrosión causados por el sulfato logran proteger la superficie de la lámina, pero al ser productos de corrosión con morfología porosa estos permiten el paso de los iones cloruro, que terminan generando un daño en la capa de galvanizado. La similitud que se observa en el comportamiento de las láminas Z90 y Z180 está asociado a que la lámina de Z90 al tener un menor tamaño de grano se comporta mejor frente a la corrosión, mientras que el mayor espesor de la lámina de Z180 dificulta la penetración de los iones cloruros al metal base o sustrato. En la figura 6c se observa a quince días de exposición la lámina que mejor comportamiento presentó fue la lámina de acero galvanizado Z180, esto se debe al espesor del galvanizado y a la formación de capas pasivantes en su superficie.

Figura 6. Diagramas de Nyquist para las láminas de acero galvanizado expuestas a diferentes tiempos. a) 0 días, b) 7 días y c) 15 días.



En la figura 6d y 6e se pueden apreciar los diagramas de circuitos equivalentes empleados para realizar el ajuste de los espectros de impedancia obtenidos bajo las diferentes condiciones de estudio. El primer circuito (figura 6d) se compone de una resistencia a la solución en serie con dos bloques en paralelo, el primer bloque de elemento de fase constante CPE1 y R1 permiten describir la interface solución – capa de óxido pasivante, donde el elemento CPE1 modela el comportamiento dieléctrico de la capa pasivante mientras que el elemento R1 modela el comportamiento resistivo de la capa con productos de corrosión, la cual se atribuye a la oposición de esta al paso de los iones del electrolito hacia el recubrimiento de cinc. El segundo bloque, compuesto por el elemento de fase constante CEP2 y R2 modelan el comportamiento de la interfase capa pasiva – galvanizado. Este primer

circuito se empleó para ajustar los espectros de impedancia de la mayoría de las muestras a excepción de las muestra de aceros galvanizados Z120 expuesta durante 15 días, la cual se modelo empleando el circuito de la figura 6e este tiene un CEP Y R adicional los cuales posiblemente representan una capa de óxido y porosa en su superficie que crea una interface adicional.

En las tablas 3 a 5 se pueden apreciar los parámetros de los circuitos equivalentes a lo que se ajustó el comportamiento de las láminas de acero galvanizado bajo las diferentes condiciones de estudio. Los datos obtenidos de los ajustes a circuitos equivalentes se obtuvieron mediante el software Zview Zplot y se pueden observar en el anexo A. El parámetro R_p hace referencia a la resistencia a la polarización de las diferentes láminas y esta se determinó como la suma de las contribuciones hechas por la resistencia de la capa de galvanizado y de la interface metal recubrimiento. Como se puede observar la lámina de acero galvanizado Z180 fue la que presento mayor R_p tras los 15 días de inmersión. Este alto valor en el parámetro R_p se asocia a un buen comportamiento frente a la corrosión.

Tabla 3. Parámetros de elementos de circuito eléctrico equivalente con que se realizó el ajuste de las láminas de acero galvanizado a 0 días de exposición.

Parámetro	CPP1		CPP2		Rp
	T	P	T	P	
Z90	4,94E-06	0,846	2,56E-06	5,75E-08	2,05E+05
Z120	5,67E-08	1,198	9,04E-06	0,738	5.27E+04
Z180					

Tabla 4. Parámetros de elementos de circuito eléctrico equivalente con que se realizó el ajuste de las láminas de acero galvanizado a 7 días de exposición.

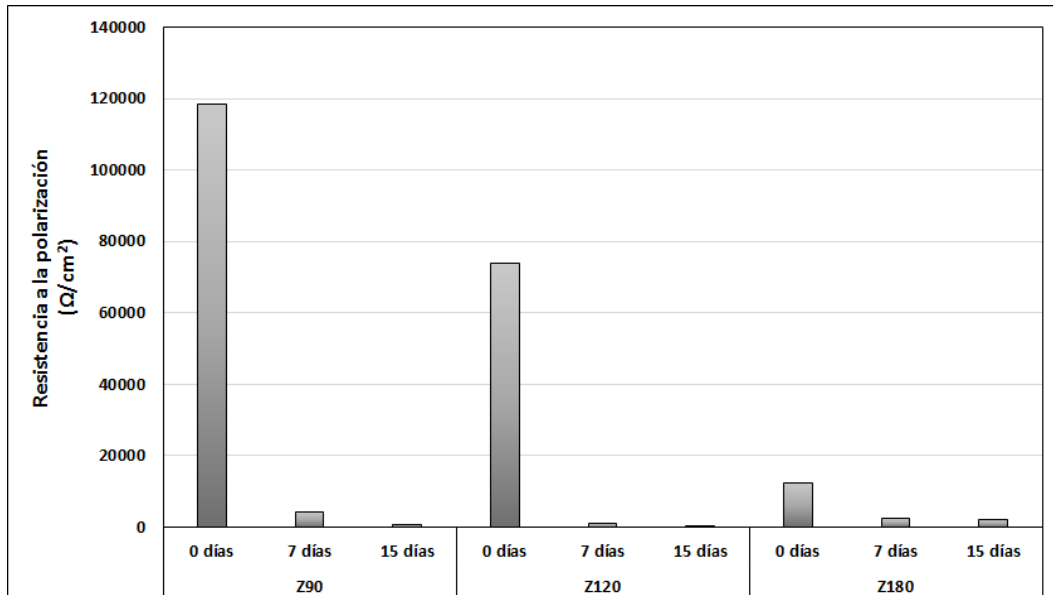
Parámetro	CPP1		CPP2		Rp
	T	P	T	P	
Z90	0,0001772	0,622	0,000365	0,671	5619,4
Z120	7,63E-06	1,065	0,000256	0,507	1010,53
Z120 – NaCl	4,86E-07	1,212	0,000682	3,75E-01	1814
Z120 - Na2SO4	1,07E-07	1,384	0,0005717	5,04E-01	347,8
Z180	9,67E-05	0,607	0,000454	0,567	7397

Tabla 5. Parámetros de elementos de circuito eléctrico equivalente con que se realizó el ajuste de las láminas de acero galvanizado a 15 días de exposición.

Parámetro	CPP1		CPP2		CPP3		Rp
	T	P	T	P	T	P	
Z90	7,14E-05	1,009	0,0017004	2,57E-01	--	--	1,47E+03
Z120	2,43E-04	0,701	0,00309	0,606	5,80E-12	0,70499	4,71E+02
Z180	7,29E-04	0,487	0,00228	0,734	--	--	3,54E+03

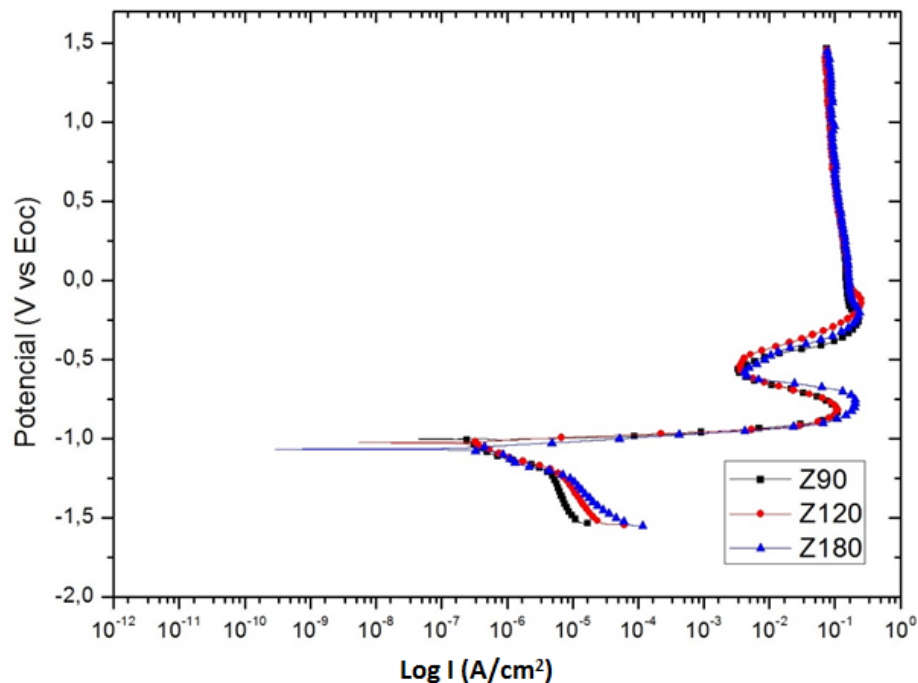
3.2.2. Resistencia a la polarización lineal. En la figura 7 se presentan los valores de resistencia a la polarización lineal. Como se puede observar los mayores valores de resistencia a la polarización se presentan a cero días de exposición, y estos valores empiezan a disminuir en función del tiempo de exposición. Esto se debe a que bajo las condiciones de estudio la capa de galvanizado se deteriora rápidamente. Sin embargo, la lámina de acero galvanizado Z180 en el día 15 presentó el mayor valor de resistencia a la polarización con respecto a los otros espesores, lo cual, corrobora lo encontrado a través de los ensayos de impedancia electroquímica.

Figura 7. Valores de resistencia a la polarización lineal de las láminas de acero galvanizado a diferente tiempo de exposición (días) a la solución 1.



3.2.3. Análisis de las curvas de polarización potenciodinámica. En la figura 8 se puede apreciar el comportamiento que presentaron las láminas de acero galvanizado a cero días de exposición a la solución 1. Como se puede observar en esta figura, al inicio de la zona anódica se aprecia una pendiente muy baja, la cual está asociada a pequeños corrimientos en el potencial y un rápido incremento en la corriente, lo cual sugiere que los procesos anódicos están controlados por activación. Por otra parte, en la zona catódica las reacciones se asocian a procesos controlados por concentración. Esto se debe a que el zinc tiende a formar productos de corrosión espontáneamente en su superficie bajo las condiciones de estudio. Por otro lado, se puede observar un corrimiento en la corriente hacia la izquierda el cual se asocia al tamaño de grano del recubrimiento el cual al ser de mayor tamaño presentara menor resistencia a la corrosión.

Figura 8. Curvas de polarización potenciodinámica de las muestras de acero galvanizado a cero días de exposición a la solución 1 (ver tabla 1).

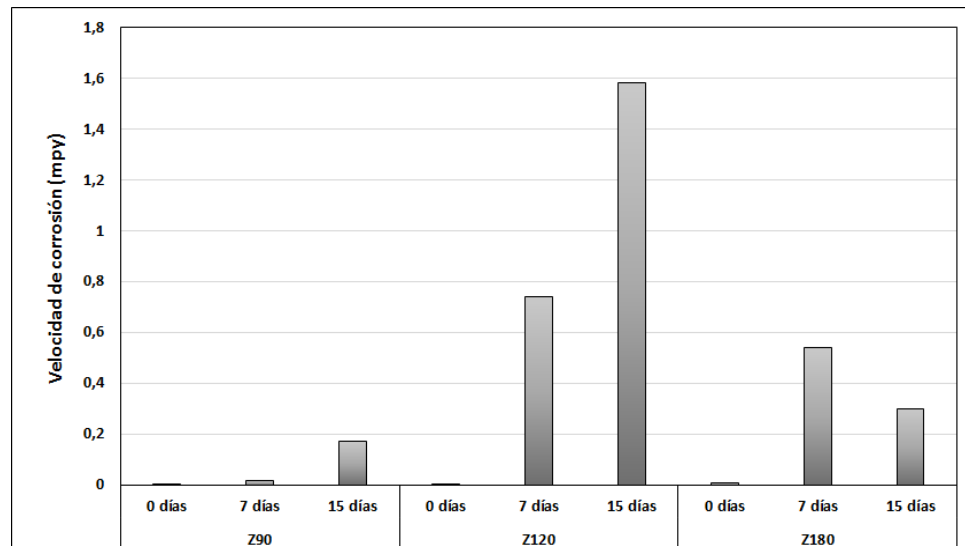


El comportamiento de las láminas a 7 y 15 días de exposición se puede observar en el anexo B. Allí se puede apreciar que las soluciones de NaCl y de Na₂SO₄ logran generar corrimientos en el potencial de corrosión hacia valores más positivos. Además, la presencia del ion sulfato logra disminuir la densidad de corriente de pasivación lo cual se atribuye a la formación de productos de corrosión que protegen la lámina de acero galvanizado, caso contrario ocurre con el ion cloruro el cual mantiene el mismo comportamiento agresivo visto en la figura 8.

En la figura 9 se puede apreciar el comportamiento de las velocidades de corrosión obtenidas bajo las diferentes condiciones experimentales de este estudio (ver anexo C). A 0 días de exposición las velocidades de corrosión aumentan en cuanto aumenta el espesor del galvanizado, esto se debe al tamaño de grano de zinc que las láminas tienen, ya que estas necesitan de mayor tiempo de inmersión en el baño

de zinc fundido, y al tener mayor cantidad de zinc caliente su enfriamiento será más lento, produciendo tamaños de granos más grandes los cuales afectan de manera negativa la resistencia a la corrosión. En el día 7 se observa un comportamiento similar con la diferencia de que la lámina con espesor Z120 tuvo la velocidad de corrosión más alta, esto se debe a que la lámina Z120 al tener un tamaño de grano superior a la lámina Z90 tendrá mayores velocidades de corrosión, pero al tener un espesor menor que la lámina Z180 los iones cloruros podrán penetrar más rápidamente al sustrato lo cual producirá mayores velocidades de corrosión. Por otra parte, se puede observar que a medida que el tiempo de exposición de las muestras es mayor sus velocidades de corrosión van aumentando a diferencia de la lámina con espesor Z180 que en el día 15 disminuyó su velocidad de corrosión, esto se asocia a la formación de productos de corrosión como la simonkolleita, la cual se caracteriza por ser de naturaleza protectora y no porosa.

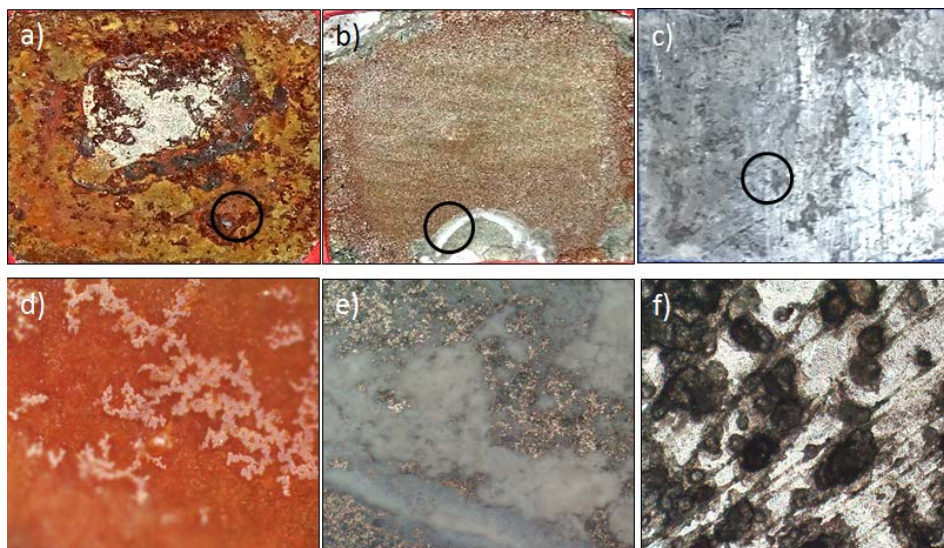
Figura 9. Velocidades de corrosión de las láminas de acero galvanizado a diferentes tiempos de exposición (días) a la solución 1.



3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN

Los productos de corrosión formados sobre las láminas de acero galvanizado después de 15 días de exposición se observaron inicialmente mediante microscopía óptica (Figura 10). Las imágenes obtenidas revelan que se produjo productos de corrosión de color rojo sobre las láminas Z90 y Z120 los cuales son característicos de los óxidos de hierro, estos nos indica que el sustrato fue corroído, mientras que en la lámina Z180 se observaron productos de corrosión de color blanco lo cual hace referencia a óxidos de cinc lo cual nos permite concluir que el galvanizado todavía protege al acero de la corrosión.

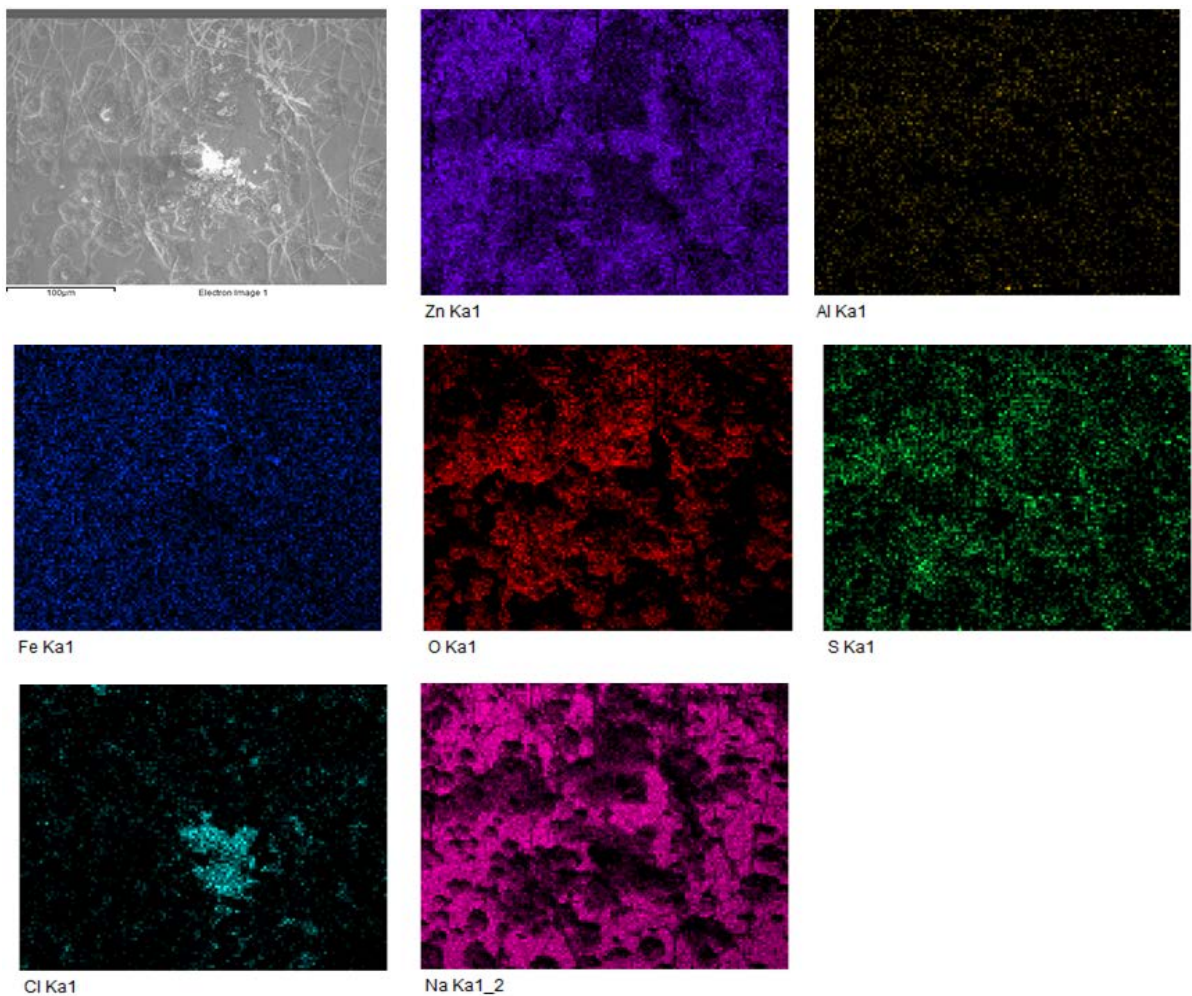
Figura 10. Morfología de las láminas de acero galvanizado después de 15 días de exposición a) Z90, b) Z120, c) Z180, d) Z90 – 200X, e) Z120 – 200X, f) Z180 – 200X.



Con el fin de conocer la composición de los productos de corrosión formados sobre las tres láminas de estudio se observaron las muestras mediante microscopía electrónica de barrido SEM y adicionalmente se realizó un mapa de composición de las superficies. Estos datos se presentan en las figuras 11, 12 y 13. En la figura 11 se puede apreciar la morfología de la superficie de la lámina Z90 después de ser

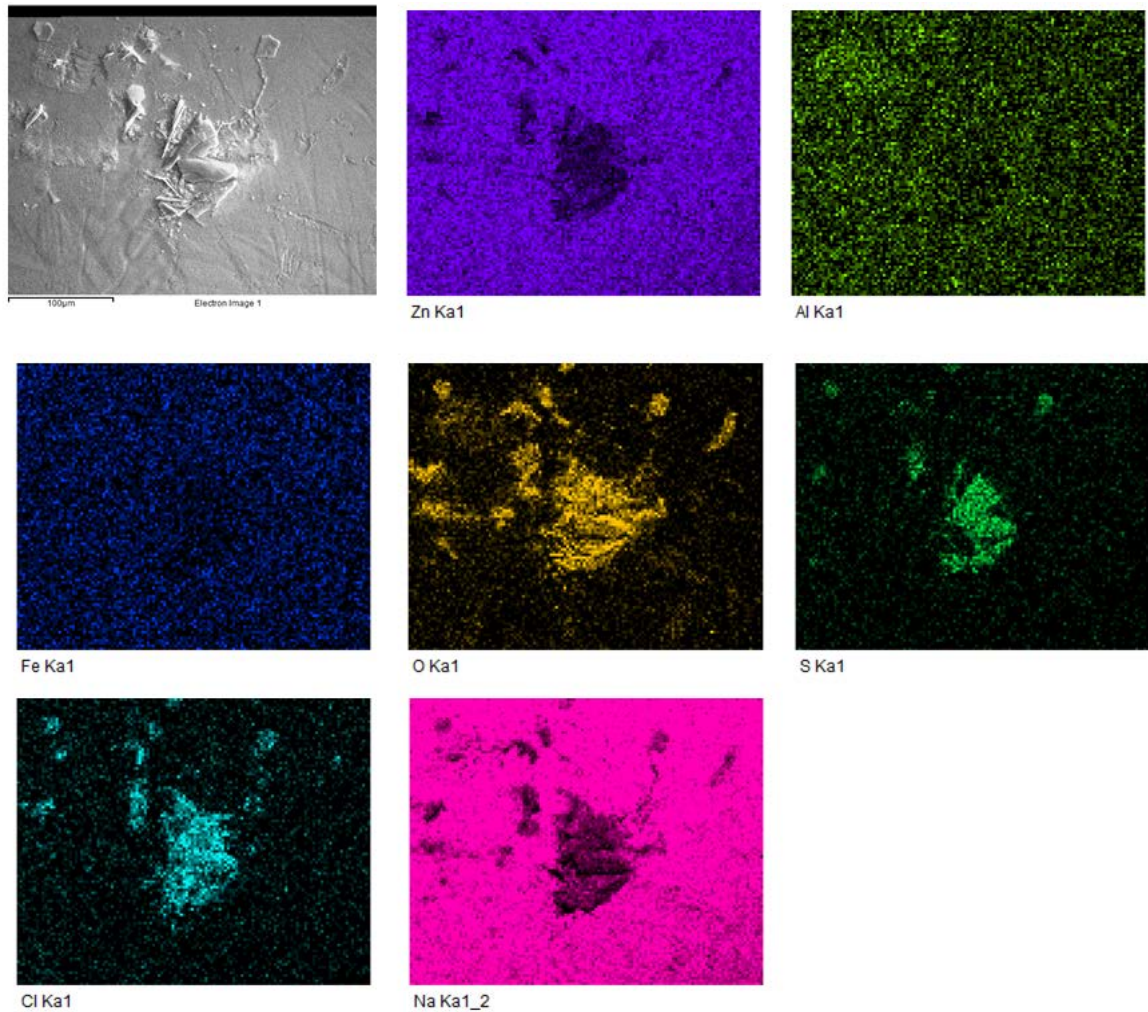
expuesta a la solución 1 durante 15 días. Como se logra apreciar hay evidencia de daño de la superficie del metal base y precipitación de sales. Además se logra observar zonas oscuras en la imagen que corresponde al mapa de composición de zinc y a su vez mayor concentración en estas zonas de elementos como el oxígeno, azufre y cloro, lo cual nos indica que posiblemente se estén formando compuestos en la superficie con estos elementos.

Figura 11. Mapa de composición química de la muestra Z90 después de 15 días de exposición



La figura 12 permite observar la formación de un aglomerado de sal sobre la superficie, donde el zinc es desplazado por oxígeno, azufre, cloro y sodio lo cual indica que la capa de zinc ha sido destruida dando paso a la formación de productos de corrosión.

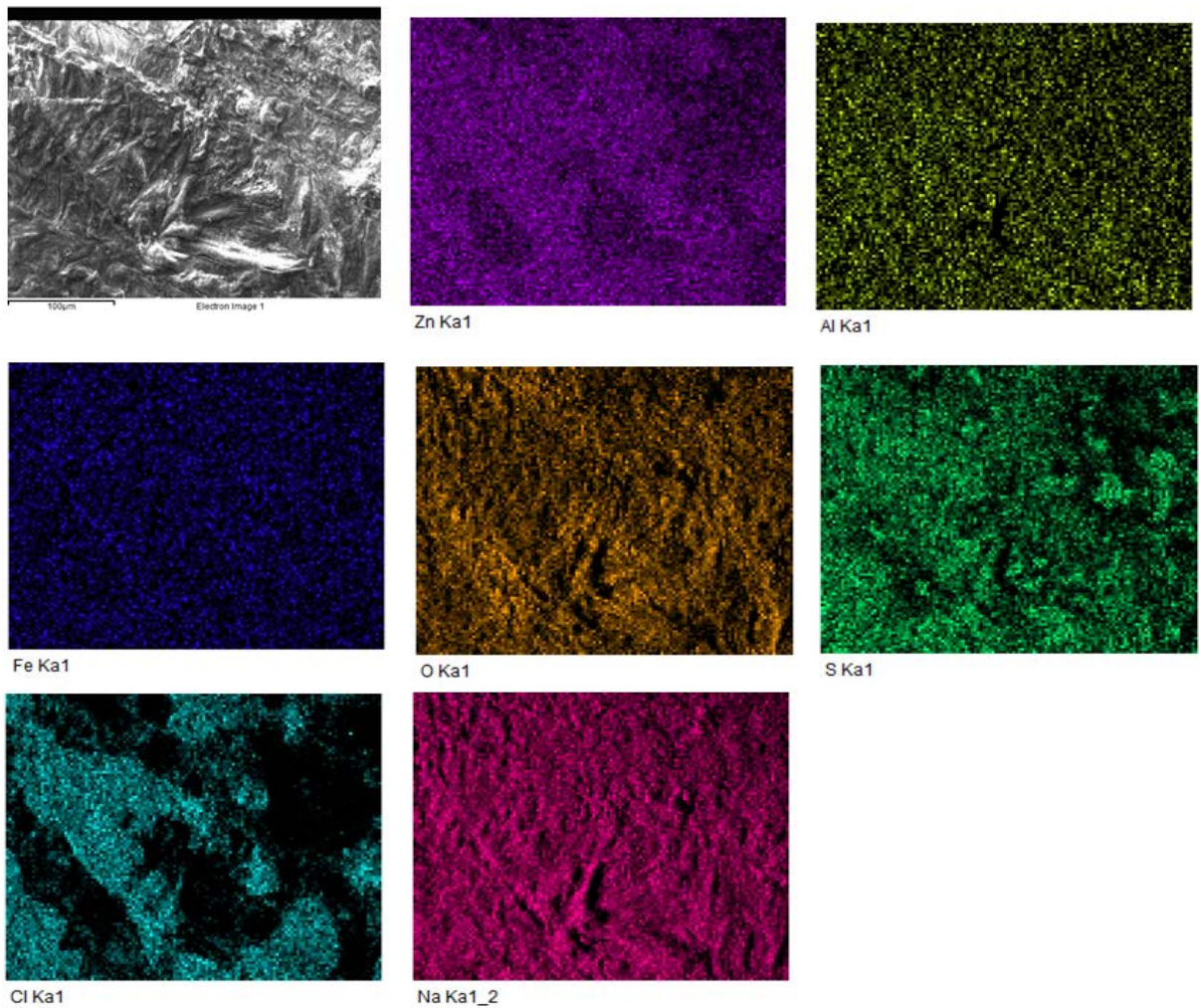
Figura 12. Mapa de composición química de la muestra Z120 después de 15 días de exposición.



Por otra parte en la figura 13, aun se logra observar la formación de una capa homogénea de sal sobre la superficie, lo cual es característico de la corrosión

blanca, Además se puede apreciar que la distribución de zinc en la superficie es uniforme, por lo que se puede decir que posiblemente el material base no ha sido afectado por el electrolito.

Figura 13. Mapa de composición química de la muestra Z180 después de 15 días de exposición.



Los productos de corrosión formados sobre las láminas de acero galvanizado se pueden observar en la tabla 6, estos productos fueron identificados a través de la

comparación de los difractogramas obtenidos con la base de datos PDF-2. Uno de los difractogramas obtenidos se presenta en la figura 15, donde 1 es zincita, 2 clorato de sodio, 3 hailita, 4. Sulfato de sodio, 5 Hidrogeno sulfato de sodio, 6 Gordaita y 7 simonkolleita, los demás se pueden observar en el anexo D.

Los productos formados sobre las láminas de acero galvanizado Z90 y Z120 son productos que demuestran el ataque y deterioro de la capa protectora de zinc. Mientras que la simonkolleita formada en la lámina Z180 corrobora los resultados obtenidos mediante las técnicas electroquímicas, de modo que es gracias a la formación de este compuesto que estas laminas logran tener la mayor resistencia a la corrosión bajo las condiciones de este estudio.

Figura 14. Difractograma de la muestra de acero galvanizado Z180 después de 15 días de exposición.

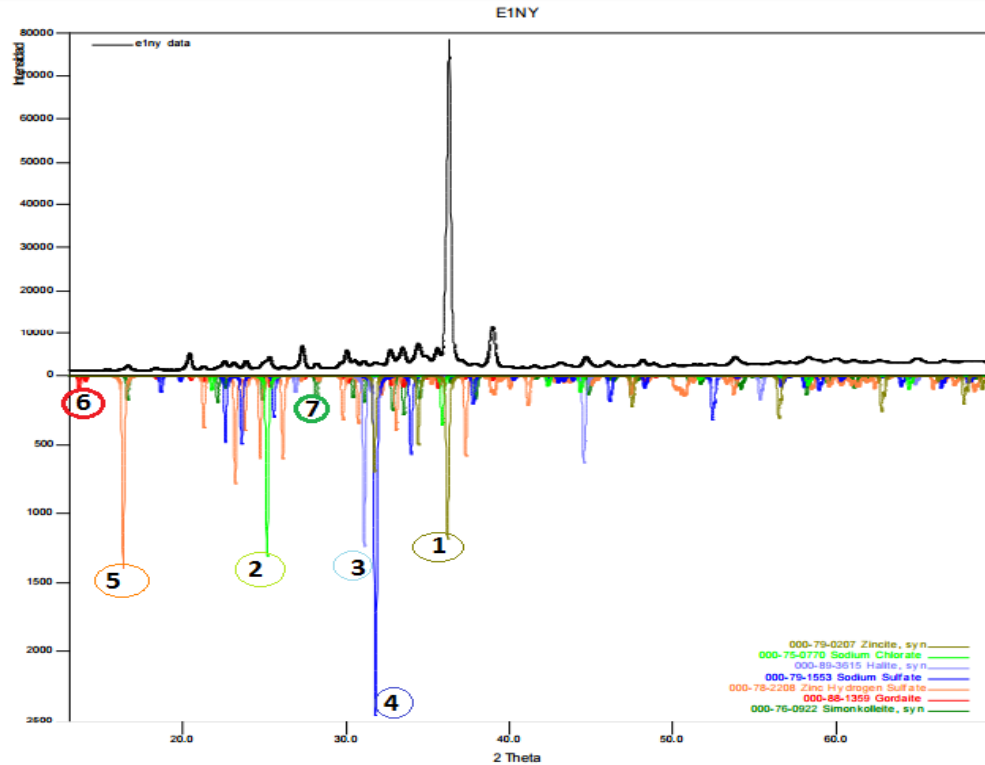


Tabla 6. Productos de corrosión formados en las láminas de acero galvanizado tras 15 días de exposición.

Muestra	Fase	Nombre
Z90	$\text{Na Zn}_4 (\text{SO}_4) (\text{OH})_6 \text{Cl} (\text{H}_2\text{O})_6$	Gordaita
	Zn	Zinc
	$\text{Na}_2 \text{Zn} (\text{OH})_4$	Hidróxido de zinc y sodio
Z120	$\text{Na Zn}_4 (\text{SO}_4) (\text{OH})_6 \text{Cl} (\text{H}_2\text{O})_6$	Gordaita
	ZnO	Zincita
	Na Cl O_4	Clorato de sodio
	$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	Sulfato de amonio
	$\text{Zn}_3 (\text{OH})_4 (\text{NO}_3)_2$	Hidróxido nitrato de cinc
Z180	$\text{Zn}_5 (\text{OH})_8 \text{Cl}_2 \text{H}_2 \text{O}$	Simonkolleita
	ZnO	Zincita
	Na Cl O_4	Clorato de sodio
	$\text{Zn} (\text{HSO}_4)_2$	Hidrogeno sulfato de cinc
	$\text{Na}_2 (\text{SO}_4)$	Sulfato de sodio
	Na Cl	Halita
	$\text{Na Zn}_4 (\text{SO}_4) (\text{OH})_6 \text{Cl} (\text{H}_2\text{O})_6$	Gordaita

4. CONCLUSIONES

El tiempo de exposición de las muestras a cloruros y sulfatos y el tamaño de grano son factores que afectan de manera negativa el comportamiento frente a la corrosión de las láminas de acero galvanizado.

El espesor del recubrimiento mejora las propiedades frente a la corrosión de las láminas de acero galvanizado esto es gracias a que la disolución de los iones cloruros al sustrato será más difícil, pero por otro lado los galvanizados con mayores espesores presentaron un tamaño de grano mayor los cuales presentan mayores velocidades de corrosión.

A pesar que la lámina Z90 tuvo el mejor comportamiento frente a la corrosión debido a su tamaño de grano pequeño, su recubrimiento fue corroído totalmente, presentando en su superficie corrosión con óxidos rojos que son característica de los óxidos de hierro, lo cual indica que el sustrato fue corroído.

En las láminas estudiadas luego de estar 15 días expuestas a una solución de cloruros y sulfatos se hallaron productos de corrosión tales como óxidos e hidróxidos, los cuales nos indican el deterioro de la capa de cinc además en la lámina Z180 se formó una capa pasivante de simonkolleita la cual protege al galvanizado disminuyendo las velocidades de corrosión.

Todas las láminas estudiadas presentaron una corrosión localizada ya que mediante un mapping se observó la disminución del cinc en algunas zonas y el aumento en estas de otros elementos tales como el oxígeno, cloro y azufre.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda reducir el tamaño de grano de las láminas con mayores espesores para así tener mejores propiedades frente a la corrosión y puedan alargar su vida útil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Andrea, D. Yesid, and J. Edison, "Influencia del tamaño del cristal de cinc de láminas de acero galvanizadas en ambientes que contienen cloruros y sulfatos". *Informador Técnico*. pp. 534-532, 2015.
- [2] SANDOVAL, Anderson, D. Y. P. BALLESTEROS. "Corrosión de acero galvanizado en un ambiente que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas," *Informador Técnico*, pp. 127–136, 2015.
- [3] M. A. Azaroual, E. F. El Harrak, R. Tourir, A. Rochdi, and M. E. Touhami, "Synergistic corrosion protection for galvanized steel in 3.0% NaCl solution by sodium gluconate and cationic surfactant," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 220, pp. 549–557, 2016.
- [4] Z. Y. Chen, D. Persson, and C. Leygraf, "Initial NaCl-particle induced atmospheric corrosion of zinc-Effect of CO₂ and SO₂," *Corrosion Science*, vol. 50, no. 1, pp. 111–123, 2008.
- [5] B. JARAMILLO, J. A. CALDERÓN, and J. Guillermo, "Evaluación electroquímica de aceros autoprotectores en condiciones simuladas de laboratorio Electrochemical assessment of weathering steels under simulated laboratory conditions," pp. 200–210, 2006.
- [6] V. PADILLA and A. ALFANTAZI, "Corrosion film breakdown of galvanized steel in sulphate-chloride solutions," *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp. 447–457, 2014.
- [7] W. R. OSORIO, C. M. FREIRE, and A. GARCIA, "The effect of the dendritic

microstructure on the corrosion resistance of Zn-Al alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 397, no. 1–2, pp. 179–191, 2005.

- [8] E. de AZEVEDO ALVARENGA and V. de FREITAS Cunha LINS, “Atmospheric corrosion evaluation of electrogalvanized, hot-dip galvanized and galvanized interstitial free steels using accelerated field and cyclic tests,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 306, pp. 428–438, 2016.
- [9] E. ALMEIDA and M. MORCILLO, “Lap-joint corrosion of automotive coated materials in chloride media. Part 1 — Electrogalvanized steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 124, no. 2, pp. 169–179, 2000.
- [10] E. ALMEIDA and M. MORCILLO, “Lap-joint corrosion of automotive coated materials in chloride media. Part 2 – Galvanized steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 124, no. 2, pp. 180–189, 2000.
- [11] E. Almeida and M. MORCILLO, “Lap-joint corrosion of automotive coated materials in chloride media. Part 3 — Electrogalvanized steel/galvanized interface,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 124, no. 1, pp. 44–52, 2000.
- [12] K. A. YASAKAU, S. KALLIP, A. LISENKOV, M. G. S. Ferreira, and M. L. Zheludkevich, “Initial stages of localized corrosion at cut-edges of adhesively bonded Zn and Zn-Al-Mg galvanized steel,” *Electrochimica Acta*, vol. 211, pp. 126–141, 2016.
- [13] C. Soriano and A. Alfantazi, “Corrosion behavior of galvanized steel due to typical soil organics,” *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 904–912, 2016.
- [14] A. Amirudin and D. Thierry, “Corrosion mechanisms of phosphated zinc layers

on steel as substrates for automotive coatings,” *Progress in Organic Coatings*, vol. 28, no. 1, pp. 59–75, May 1996.

- [15] A. K. Neufeld, I. S. Cole, A. M. Bond, and S. A. Furman, “The initiation mechanism of corrosion of zinc by sodium chloride particle deposition,” *Corrosion Science*, vol. 44, no. 3, pp. 555–572, 2002.
- [16] S. PLOYPECH, P. Jearanaisilawong, and Y. Boonyongmaneerat, “Influence of thickness of intermetallic layers on fracture resistance of galvanized coatings,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 223, pp. 1–5, 2013.
- [17] A. R. MARDER, “Metallurgy of zinc-coated steel,” *Progress in Materials Science*, vol. 45, no. 3, pp. 191–271, 2000.
- [18] R. RÉQUIZ, M. A. ROJAS, and A. ROSALES, “Daño por Hidrógeno en Aceros Galvanizados,” *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 28, no. 1, pp. 51–59, 2008.
- [19] A. PRITZEL dos Santos, S. M. MANHABOSCO, J. S. RODRIGUES, and L. F. P. DICK, “Comparative study of the corrosion behavior of galvanized, galvanized and Zn55Al coated interstitial free steels,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 279, pp. 150–160, 2015.
- [20] V. PADILLA, P. GHODS, and A. ALFANTAZI, “Effect of de-icing salts on the corrosion performance of galvanized steel in sulphate contaminated soil,” *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 908–918, 2013.
- [21] M. Marcela, T. LUQUE, J. Jairo, O. FLÓREZ, and L. ASCOLANI, “Resistencia a la corrosión de recubrimientos electroquímicos de cromo y zinc mediante EIE Corrosion resistance of chromium and zinc platings by EIS,” *Ingeniería &*

desarrollo, vol. 29, no. 2, pp. 170–185, 2011.

- [22] X. G. ZHANG, *Corrosion and electrochemistry of zinc*. 1996.
- [23] F. THÉBAULT, B. VUILLEMIN, R. OLTRA, C. ALLELY, and K. Ogle, “Protective mechanisms occurring on zinc coated steel cut-edges in immersion conditions,” *Electrochimica Acta*, vol. 56, no. 24, pp. 8347–8357, 2011.
- [24] F. THÉBAULT, B. VUILLEMIN, R. OLTRA, K. Ogle, and C. ALLELY, “Investigation of self-healing mechanism on galvanized steels cut edges by coupling SVET and numerical modeling,” *Electrochimica Acta*, vol. 53, no. 16, pp. 5226–5234, 2008.
- [25] J. O. Kim, Y. W. Lee, and J. Chung, “The role of organic acids in the mobilization of heavy metals from soil,” *Ksce Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 7, pp. 1596–1602, 2013.
- [26] ASTM E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.; 2010.
- [27] ASTM G106-89 estándar practice for verification of algorithm and equipment for electrochemical impedance measurements. 2010.
- [28] ASTM G59-97 estándar test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements; 2009.

BIBLIOGRAFÍA

A. AMIRUDIN and D. THIERRY, "Corrosion mechanisms of phosphated zinc layers on steel as substrates for automotive coatings," *Progress in Organic Coatings*, vol. 28, no. 1, pp. 59–75, May 1996.

A. K. NEUFELD, I. S. COLE, A. M. BOND, and S. A. FURMAN, "The initiation mechanism of corrosion of zinc by sodium chloride particle deposition," *Corrosion Science*, vol. 44, no. 3, pp. 555–572, 2002.

A. PRITZEL DOS SANTOS, S. M. MANHABOSCO, J. S. RODRIGUES, and L. F. P. DICK, "Comparative study of the corrosion behavior of galvanized, galvanized and Zn55Al coated interstitial free steels," *Surface and Coatings Technology*, vol. 279, pp. 150–160, 2015.

A. R. MARDER, "Metallurgy of zinc-coated steel," *Progress in Materials Science*, vol. 45, no. 3, pp. 191–271, 2000.

ASTM E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens; 2010.

ASTM G106-89 estándar practice for verification of algorithm and equipment for electrochemical impedance measurements. 2010.

ASTM G59-97 estándar test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements; 2009.

B. JARAMILLO, J. A. CALDERÓN, and J. Guillermo, "Evaluación electroquímica de aceros autoprotectores en condiciones simuladas de laboratorio *Electrochemical*

assessment of weathering steels under simulated laboratory conditions,” pp. 200–210, 2006.

C. SORIANO and A. ALFANTAZI, “Corrosion behavior of galvanized steel due to typical soil organics,” *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 904–912, 2016.

E. ALMEIDA and M. MORCILLO, “Lap-joint corrosion of automotive coated materials in chloride media. Part 1 — Electrogalvanized steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 124, no. 2, pp. 169–179, 2000.

E. ALMEIDA and M. MORCILLO, “Lap-joint corrosion of automotive coated materials in chloride media. Part 2 – Galvannealed steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 124, no. 2, pp. 180–189, 2000.

E. ALMEIDA and M. MORCILLO, “Lap-joint corrosion of automotive coated materials in chloride media. Part 3 — Electrogalvanized steel/galvanneal interface,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 124, no. 1, pp. 44–52, 2000.

E. de AZEVEDO ALVARENGA and V. de FREITAS CUNHA LINS, “Atmospheric corrosion evaluation of electrogalvanized, hot-dip galvanized and galvannealed interstitial free steels using accelerated field and cyclic tests,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 306, pp. 428–438, 2016.

F. THÉBAULT, *et al*, “Protective mechanisms occurring on zinc coated steel cut-edges in immersion conditions,” *Electrochimica Acta*, vol. 56, no. 24, pp. 8347–8357, 2011.

F. THÉBAULT, B. VUILLEMIN, R. OLTRA, K. Ogle, and C. ALLELY, "Investigation of self-healing mechanism on galvanized steels cut edges by coupling SVET and numerical modeling," *Electrochimica Acta*, vol. 53, no. 16, pp. 5226–5234, 2008.

J. Andrea, D. Yesid, and J. Edison, "Influencia del tamaño del cristal de cinc de láminas de acero galvanizadas en ambientes que contienen cloruros y sulfatos". *Informador Técnico*. pp. 534-532, 2015.

J. O. KIM, Y. W. LEE, and J. CHUNG, "The role of organic acids in the mobilization of heavy metals from soil," *Ksce Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 7, pp. 1596–1602, 2013.

K. A. YASAKAU, *et al.* "Initial stages of localized corrosion at cut-edges of adhesively bonded Zn and Zn-Al-Mg galvanized steel," *Electrochimica Acta*, vol. 211, pp. 126–141, 2016.

M. A. AZAROUAL, E. F. EI HARRAK, R. TOUIR, A. ROCHDI, and M. E. TOUHAMI, "Synergistic corrosion protection for galvanized steel in 3.0% NaCl solution by sodium gluconate and cationic surfactant," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 220, pp. 549–557, 2016.

M. Marcela, T. LUQUE, J. Jairo, O. FLÓREZ, and L. ASCOLANI, "Resistencia a la corrosión de recubrimientos electroquímicos de cromo y zinc mediante EIE Corrosion resistance of chromium and zinc platings by EIS," *Ingeniería & desarrollo*, vol. 29, no. 2, pp. 170–185, 2011.

R. RÉQUIZ, M. A. ROJAS, and A. ROSALES, "Daño por Hidrógeno en Aceros Galvanizados," *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 28, no. 1, pp. 51–59, 2008.

S. PLOYPECH, P. Jearanaisilawong, and Y. Boonyongmaneerat, "Influence of thickness of intermetallic layers on fracture resistance of galvanized coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 223, pp. 1–5, 2013.

SANDOVAL, Anderson, D. Y. P. BALLESTEROS. "Corrosión de acero galvanizado en un ambiente que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas," *Informador Técnico*, pp. 127–136, 2015.

V. PADILLA and A. ALFANTAZI, "Corrosion film breakdown of galvanized steel in sulphate-chloride solutions," *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp. 447–457, 2014.

V. PADILLA, P. GHODS, and A. ALFANTAZI, "Effect of de-icing salts on the corrosion performance of galvanized steel in sulphate contaminated soil," *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 908–918, 2013.

W. R. OSORIO, C. M. FREIRE, and A. GARCIA, "The effect of the dendritic microstructure on the corrosion resistance of Zn-Al alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 397, no. 1–2, pp. 179–191, 2005.

X. G. ZHANG, *Corrosion and electrochemistry of zinc*. 1996.

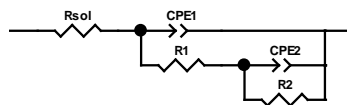
Z. Y. CHEN, D. Persson, and C. Leygraf, "Initial NaCl-particle induced atmospheric corrosion of zinc-Effect of CO₂ and SO₂," *Corrosion Science*, vol. 50, no. 1, pp. 111–123, 2008.

ANEXOS

ANEXO A. PARÁMETROS DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTE

A continuación, se presentan los parámetros de los circuitos equivalentes con que se realizó el ajuste de los espectros de impedancia electroquímica. Para realizar estos ajustes se empleó el programa Zview-Zplot.

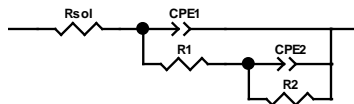
Lamina de acero galvanizado Z90 a 0 días de exposición



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	0.43721	0.23794	54.422
CPE1-T	Free(+)	4.9438E-06	1.3948E-07	2.8213
CPE1-P	Free(+)	0.84671	0.0036457	0.43057
R1	Free(+)	1.8164E05	3.0957E10	1.7043E07
CPE2-T	Free(+)	2.5566E-06	4.8024	1.8784E08
CPE2-P	Free(+)	5.7544E-08	0.15381	2.6729E08
R2	Free(+)	23466	3.4437E10	1.4675E08

Chi-Squared: 0.037253
Weighted Sum of Squares: 4.4332

Lamina de acero galvanizado Z120 a 0 días de exposición

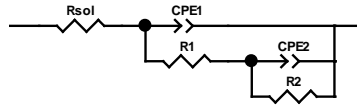


Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	2.752	0.21353	7.7591
CPE1-T	Free(+)	5.6679E-08	4.1371E-08	72.992
CPE1-P	Free(+)	1.198	0.057527	4.8019
R1	Free(+)	22.97	7.7387	33.69
CPE2-T	Free(+)	9.0423E-06	1.73E-07	1.9132
CPE2-P	Free(+)	0.73892	0.0079083	1.0703
R2	Free(+)	52634	656.98	1.2482

Chi-Squared: 0.0055409
Weighted Sum of Squares: 0.72586

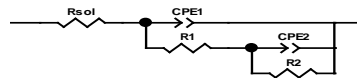
Lamina de acero galvanizado Z180 a 0 días de exposición no fue posible realizar el ajuste.

Lamina de acero galvanizado Z90 a 7 días de exposición



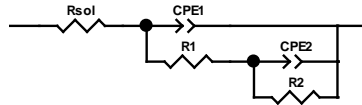
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	3.226	0.13173	4.0834
CPE1-T	Free(+)	0.0001772	1.361E-05	7.6806
CPE1-P	Free(+)	0.62218	0.0085596	1.3757
R1	Free(+)	401.4	39.146	9.7524
CPE2-T	Free(+)	0.00036555	1.5627E-05	4.2749
CPE2-P	Free(+)	0.67157	0.020896	3.1115
R2	Free(+)	5218	216.1	4.1414
Chi-Squared:		0.0042079		
Weighted Sum of Squares:		0.54282		

Lamina de acero galvanizado Z120 a 7 días de exposición



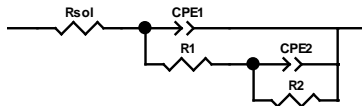
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	2.24	0.073327	3.2735
CPE1-T	Free(+)	7.6294E-06	1.4346E-05	188.04
CPE1-P	Free(+)	1.065	0.15718	14.759
R1	Free(+)	12.93	143.32	1108.4
CPE2-T	Free(+)	0.00025662	8.2965E-05	32.33
CPE2-P	Free(+)	0.50746	0.033045	6.5118
R2	Free(+)	997.6	131.67	13.199
Chi-Squared:		0.004547		
Weighted Sum of Squares:		0.52291		
Data File:	--Clipboard			
Circuit Model File:				
Mode:	Run Fitting / All Data Points (1 - 61)			
Maximum Iterations:	100			
Optimization Iterations:	0			
Type of Fitting:	Complex			
Type of Weighting:	Calc-Modulus			

Lamina de acero galvanizado Z180 a 7 días de exposición



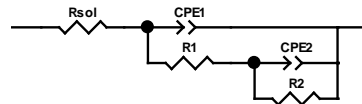
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	4.184	0.20914	4.9986
CPE1-T	Free(+)	9.6557E-05	9.6209E-06	9.964
CPE1-P	Free(+)	0.60786	0.010202	1.6783
R1	Free(+)	378	34.524	9.1333
CPE2-T	Free(+)	0.00045452	1.3561E-05	2.9836
CPE2-P	Free(+)	0.56726	0.019062	3.3604
R2	Free(+)	7019	503.18	7.1688
Chi-Squared:		0.0053859		
Weighted Sum of Squares:		0.70556		

Lamina de acero galvanizado Z120 a 7 días de exposición en NaCl



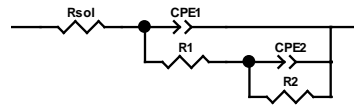
Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	10.43	0.8924	8.5561
CPE1-T	Free(+)	4.857E-07	4.0903E-07	84.215
CPE1-P	Free(+)	1.212	0.083028	6.8505
R1	Free(+)	3.5171E-06	11.942	3.3954E08
CPE2-T	Free(+)	0.00068229	6.2665E-05	9.1845
CPE2-P	Free(+)	0.37546	0.020792	5.5377
R2	Free(+)	1814	202.81	11.18
Chi-Squared:		0.049708		
Weighted Sum of Squares:		6.1141		

Lamina de acero galvanizado Z120 a 7 días de exposición en Na2SO4



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	6.252	0.16652	2.6635
CPE1-T	Free(+)	1.0732E-07	5.1007E-08	47.528
CPE1-P	Free(+)	1.384	0.043417	3.1371
R1	Free(+)	1.6373E-06	1.3338	8.1463E07
CPE2-T	Free(+)	0.00057173	2.5218E-05	4.4108
CPE2-P	Free(+)	0.50463	0.0088735	1.7584
R2	Free(+)	347.8	5.6642	1.6286
Chi-Squared:		0.0068111		
Weighted Sum of Squares:		0.78327		

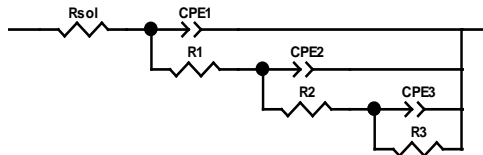
Lamina de acero galvanizado Z90 a 15 días de exposición



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	0.84028	0.042737	5.086
CPE1-T	Free(+)	7.1413E-05	5.9915E-06	8.3899
CPE1-P	Free(+)	1.009	0.013299	1.318
R1	Free(+)	3.7259E-07	1.0988	2.9491E08
CPE2-T	Free(+)	0.0017004	0.00014074	8.2769
CPE2-P	Free(+)	0.25744	0.023863	9.2693
R2	Free(+)	1470	222.14	15.112

Chi-Squared: 0.014262
 Weighted Sum of Squares: 1.469

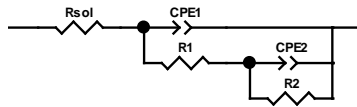
Lamina de acero galvanizado Z120 a 15 días de exposición



Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	4.716	0.095432	2.0236
CPE1-T	Free(+)	0.00024338	7.686E-05	31.58
CPE1-P	Free(+)	0.70132	0.03312	4.7225
R1	Free(+)	6.546	0.456	6.9661
CPE2-T	Free(+)	0.0030999	8.6955E-05	2.8051
CPE2-P	Free(+)	0.60628	0.0034034	0.56136
R2	Free(+)	446.3	3.9791E06	8.9158E05
CPE3-T	Free(+)	5.8012E-12	5.7215E-06	9.8626E07
CPE3-P	Free(+)	0.70499	4.9056E05	6.9584E07
R3	Free(+)	17.73	3.9791E06	2.2443E07

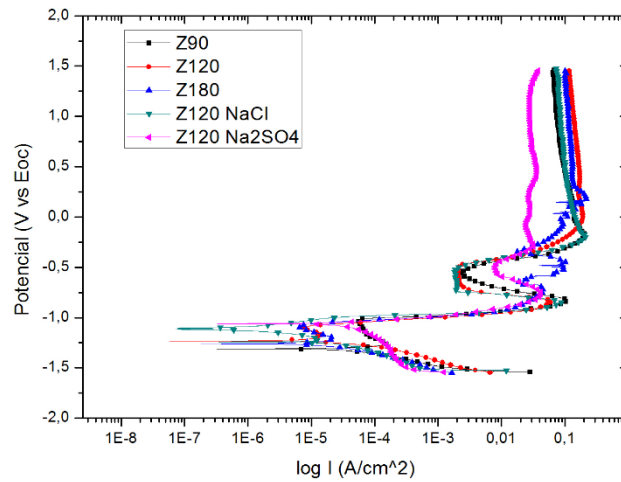
Chi-Squared: 0.00082654
 Weighted Sum of Squares: 0.097532

Lamina de acero galvanizado Z180 a 15 días de exposición

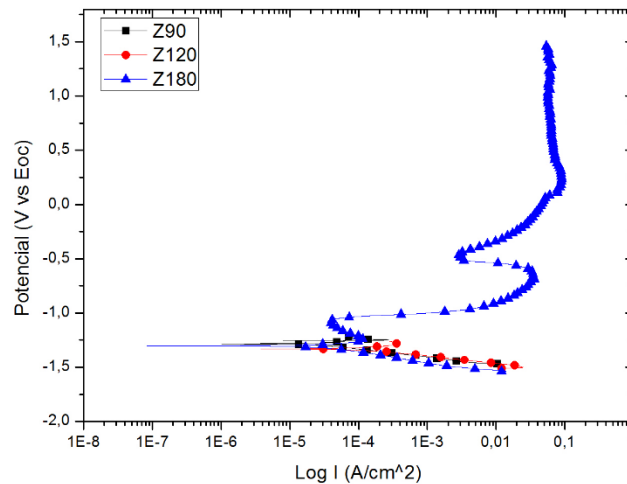


Element	Freedom	Value	Error	Error %
Rsol	Free(+)	8.354	0.055334	0.66237
CPE1-T	Free(+)	0.00072981	8.7376E-06	1.1972
CPE1-P	Free(+)	0.48725	0.001707	0.35033
R1	Free(+)	1636	65.622	4.0111
CPE2-T	Free(+)	0.0022825	0.00024518	10.742
CPE2-P	Free(+)	0.73474	0.044538	6.0617
R2	Free(+)	1905	157.3	8.2572
Chi-Squared:		0.00037636		
Weighted Sum of Squares:		0.050056		

ANEXO B. CURVAS POTENCIODINÁMICAS



Curvas potenciodinámicas de las láminas de acero galvanizado después de 7 días de exposición.



Curvas potenciodinámicas de las láminas de acero galvanizado después de 15 días de exposición.

ANEXO C. CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES DE CORROSIÓN

A 50 mv arriba desde potencial de corrosión se tomaron 20 puntos aleatoriamente para graficar E vs Log I y por medio de una regresión lineal se calculó la ecuación de la recta catódica y con esta la pendiente catódica, para el espesor Z90 en un tiempo 0 nuestra pendiente catódica fue la siguiente:

$$E(v) = -0.96 \log (IC) - 6.3242$$

Al observar las curvas de polarización potencio dinámica de la lámina evaluada se observa que Ba no es igual a Bc por lo tanto se recurre a hallar las corrientes anódicas por medio de la siguiente ecuación.

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

Siendo I_a las corrientes anódicas, I_{app} a las corrientes aplicadas anódicas y I_c las corrientes catódicas, que se hallaran por medio de la ecuación de la recta catódica hallada anteriormente, Aplicando lo anteriormente dicho se es escogieron 3 potenciales y corrientes de la zona anódica y utilizando la ecuación x se obtuvieron las corrientes catódicas para luego aplicar la ecuación x y hallar corrientes anódicas (I_a) mostradas en la siguiente tabla:

E (V)	Log I_{app}	I_{app}	I_c	Log I_a	I_a
-0.999	-5.7791	1.66E-6	1.38E-6	-5.1712	3.04E-6
-0.997	-5.2925	5.1E-6	2.8237E-6	-5.1011	7.92E-6
-0.995	-5.0008259	9.98E-6	2.81E-6	-4.8931	1.279E-6

Datos obtenidos para hallar pendiente anódica.

Ya teniendo las corrientes anódicas se procede hacer una gráfica E (v) Vs LOG (Ia) y por medio de una regresión lineal se obtuvo la ecuación de la recta anódica la cual se muestra a continuación:

$$E(v) = 0.0098 \log (I_A) - 0.9468$$

Como sabemos las pendientes de las ecuaciones son las pendientes de Tafel en donde la pendiente catódica es igual a -0.96 y la anódica es igual a 0.0098 Basándonos en la norma ASTM G 102- 89 Luego de hallar las pendientes de Tafel de cada curva potencio dinámica procedemos a calcular la I_{corr} por medio de las siguientes ecuaciones:

$$B = \frac{bc*ba}{2.303*(ba+bc)} \quad (4)$$

$$I_{cor} = B/Rp \quad (5)$$

Luego de calcular la i_{corr} se utiliza la ecuación (6) para calcular las velocidades de corrosión de las diferentes láminas en donde los resultados se muestran en la siguiente tabla

$$CR = \frac{K1*I_{cor}*EW}{\rho} \quad (6)$$

En donde $K1 = 3.27 \times 10^{-3}$, mm g/ μ A cm yr

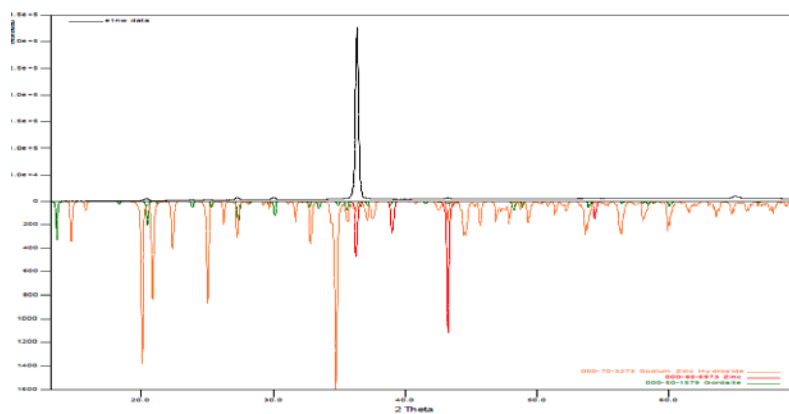
ρ es la densidad del sustrato

EW es el peso equivalente del sustrato

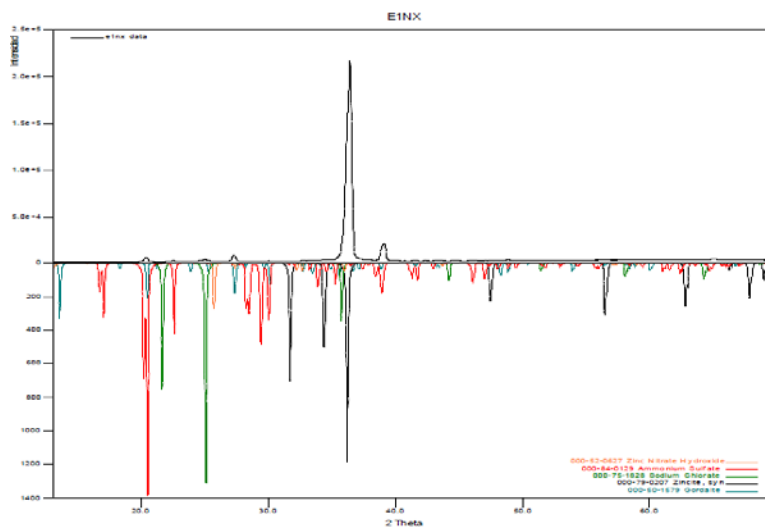
I_{corr} : corriente de corrosión.

Espesor de las láminas y tiempo de exposición	E_{corr} (V)	B_c (V/DEC)	B_a (V/DEC)	I_{corr} (A/cm ²)	RP (V/DEC)	V_{corr} (mpy)
Z90 0 días	-1	-0.96	0.0098	3.62649E-08	118550	0.00042722
Z90 7	-1.31	-0.1364	0.064	7.08569E-07	4320.4	0.14275764
Z90 15 días	-1.29	-0.0593	0.0184	9.43085E-07	789.2	0.1729138
Z120 0 días	-1.02	-0.1548	0.0267	3.24276E-06	73889	0.00223368
Z120 7 días	-1.23	-0.0255	0.0472	6.27721E-05	1067.4	0.73948251
Z120 15 días	-1.33	-0.0584	0.0408	2.56927E-05	438.18	1.58043019
Z180 0 días	-1.07	-0.1234	0.0107	6.44606E-06	12283	0.00487908
Z180 7 días	-1.26	-0.0943	0.0764	3.98846E-4	2288	0.53961194
Z180 15 días	-1.3	-0.0715	0.0443	2.53051E-05	1998.2	0.29810512
Z120 0 días sol 1	-1.12	-0.0721	0.0251	3.7601E-05	444.65	0.44295576
Z120 0 días sol 2	-1.06	-0.133	0.0388	1.49359E-05	1592.6	0.17595162

ANEXO D. DIFRACTOGRAMAS DE RAYOS X



Difractograma de rayos X obtenido sobre la superficie de la lámina de acero galvanizado Z90 después de 15 días de exposición



Difractograma de rayos X obtenido sobre la superficie de la lámina de acero galvanizado Z120 después de 15 días de exposición