

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS  
UTILIZADOS EN CONTROL DE CORROSIÓN PARA EQUIPOS DE PROCESO  
EN CAMPO LA CIRA CORREGIMIENTO EL CENTRO-BARRANCABERMEJA**

**INGRID TATIANA ROJAS RODRIGUEZ**

**ANDREA LIZETH ORDUZ RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS  
UTILIZADOS EN CONTROL DE CORROSIÓN PARA EQUIPOS DE PROCESO  
EN CAMPO LA CIRA CORREGIMIENTO EL CENTRO-BARRANCABERMEJA**

**INGRID TATIANA ROJAS RODRIGUEZ**

**ANDREA LIZETH ORDUZ RODRIGUEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:  
Ingeniera metalúrgica**

**DIRECTOR**

**DARIO YESID PEÑA BALLESTEROS**  
Ingeniero Metalúrgico, Ph.D.

**CO-DIRECTOR**

**CÉSAR AUGUSTO LÓPEZ ROJAS**  
Químico de R&D Industrial Coating

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES**  
**BUCARAMANGA**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la compañía SIKA COLOMBIA S.A. por su apoyo económico y técnico en la preparación de superficies, aplicación de sistemas de recubrimientos y equipos para la evaluación y exposición de los esquemas estudiados, En especial al Químico de R&D Industrial Coating y Co-director César Augusto López Rojas; quien con su conocimiento aportó en la estructuración y desarrollo de cada una de las etapas que compone este proyecto.

A La Corporación para la Investigación y Desarrollo en Ciencia de Materiales – CIMA. Por su apoyo económico y orientación en el desarrollo de este proyecto, en especial al Ingeniero Javier Mateus, por su constante participación, aporte y motivación en cada fase de la investigación.

Al grupo de investigación en corrosión –GIC y al personal de la Corporación para la Investigación de la Corrosión –CIC, los cuales siempre nos abrieron las puertas de sus laboratorios para capacitarnos e instruirnos en la manipulación de equipos y ensayos aplicados internacionalmente en la línea de recubrimientos.

A la Escuela y al personal técnico de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, ya que siempre estuvieron dispuestos al asesoramiento y a la formación profesional. En especial al Doctor Darío Yesid Peña Ballesteros; quien permitió la correcta ejecución de este proyecto.

## DEDICATORIA

Al señor Jesucristo, ya que él siempre ha sido la respuesta a mis necesidades, mi refugio durante los momentos difíciles, mi consuelo en la tristeza y mi fortaleza en la debilidad. Él con su grandeza, poder y misericordia ha llenado mi vida de sabiduría, inteligencia, valor, fe y confianza para cumplir con los propósitos que Dios ha destinado para mi vida.

A mis padres José Rojas y Nancy Rodríguez; quienes, con su apoyo incondicional, lograron que se cumpliera esta meta, la de llegar a ser una profesional, la cual hace unos años atrás era tan solo un sueño y hoy se hace realidad, no solo para mí, sino para todos los que confiaron en mis conocimientos y capacidades. Mis hermanos y familiares; en especial a mi tío Demetrio Rojas y mi abuela Paulina Calderón, que a pesar de la distancia estuvieron pendiente en cada paso del proceso de mi carrera Universitaria.

A mi compañera de carrera y proyecto Andrea Orduz, por su amistad incondicional, apoyo y colaboración a este proyecto de investigación.

*Ingríd Tatiana Rojas Rodríguez*

## DEDICATORIA

A Dios por guiarme en el camino y concederme vivir en sus bondades y gran amor.

A mi eterna madre, Marina Rodríguez que con su paciencia y ternura me brinda su amor incondicional y mi padre Ciro Orduz por ser mi principal apoyo.

A mi segunda madre, Omaira Rodríguez que con sus consejos y espíritu emprendedor me permitieron entender que se debe ser constante en los sueños y saber aprovechar las oportunidades.

A mi hermana y mejor amiga que desde el inicio me animaron en cada momento, son mi mejor compañía.

A mi compañera Ingrid Rojas que desde el inicio de la carrera compartimos este proceso de formación para alcanzar nuestros objetivos, gracias por ser tan constante en este proyecto.

*Andrea Lizeth Orduz Rodríguez*

## Tabla de contenido

INTRODUCCION.....	17
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
2. MARCO TEÓRICO .....	20
2.1 RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS.....	20
2.2 TÉCNICAS DE LIMPIEZA SUPERFICIAL DE SUBSTRATOS METÁLICOS ..	20
2.3 SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS.....	22
2.4 EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS EN AMBIENTES SIMULADOS.....	22
2.4.1 Cámara salina.....	22
2.4.2 Cámara de lluvia ácida .....	22
2.4.3 Cámara UV .....	23
2.5 CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA RECUBRIMIENTO POLIMÉRICOS....	23
2.5.1 Ensayo de adherencia .....	223
2.5.2 Ensayo de discontinuidad eléctrica.....	23
2.5.3 Ensayo de inspección visual aplicado a sistemas de recubrimientos poliméricos fisurados (KIV).....	23
2.6 EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS). .....	26
2.7 DESPRENDIMIENTO CATÓDICO .....	27
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	28
3.1 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA .....	29
3.2 CONTROL DE CALIDAD DE LA LIMPIEZA SUPERFICIAL DEL METAL Y LA APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS.....	29
3.3 EXPOSICIÓN DE SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS.....	31

3.3.1 Cámara salina.....	31
3.3.2 Cámara de lluvia ácida .....	35
3.3.3 Cámara de radiación ultravioleta U.V .....	37
3.3.4 Campo la Cira .....	38
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	39
4.1 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA .....	39
4.2 CONTROL DE CALIDAD DE LA LIMPIEZA SUPERFICIAL DEL METAL Y LA APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS .....	40
4.3 ENSAYO DE INSPECCIÓN VISUAL (KIV) APLICADO A CUPONES FISURADOS EXPUESTOS EN CÁMARA SALINA .....	43
4.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) APLICADA A SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS EXPUESTOS A DOS MIL (2000) HORAS EN CÁMARA SALINA.....	45
4.5 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA APLICADA A SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS EXPUESTOS EN CÁMARA SALINA Y LLUVIA ÁCIDA .....	47
4.6 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÓPTICAS EN LOS SISTEMAS DE RECUBRIMIENTO EXPUESTOS EN CÁMARA DE LLUVIA ÁCIDA Y EN CÁMARA U.V.....	58
4.7 ESPECTROSCOPIA RAMAN APLICADA EN LA SUPERFICIE METÁLICA DE PROBETAS DESNUDAS EXPUESTAS EN CAMPO CIRA .....	62
5. CONCLUSIONES .....	64
6. RECOMENDACIONES.....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	73

## ANEXOS

ANEXO A. Factor de zona establecido en la norma NTC 3951[24] y fundamentado con la norma ASTM D1654 [35] y Datos obtenidos por el ensayo de inspección visual aplicado a cupones fisurados KIV .....	74
ANEXO B. Espectros de impedancia electroquímica para los recubrimientos orgánicos expuestos en la estación de monitoreo en campo Cira. Durante 7 meses. a) Diagrama de Bode c) Diagrama del ángulo de fase y c) Diagrama de Nyquist .	75
ANEXO C.Resultados de impedancia electroquímica para recubrimientos expuestos en cámara salina. ....	76
ANEXO D.Resultados de impedancia electroquímica para recubrimientos expuestos en cámara de lluvia ácida. ....	77
ANEXO E.Datos de impedancia electroquímica para campo, estación de monitoreo en campo .....	78
ANEXO F.Datos obtenidos por la aplicación de técnicas de Brillo y Color para recubrimientos expuestos en la estación de monitoreo instalado en campo Cira..	79
ANEXO G.Datos obtenidos por la aplicación de técnicas de Brillo y Color para recubrimientos expuestos en cámara de Lluvia ácida. ....	79
ANEXO H.Datos obtenidos por la aplicación de técnicas de Brillo y Color para recubrimientos expuestos en cámara U.V .....	80

## Índice de figuras

Figura 1. Ilustración esquemática de un circuito equivalente para muestra recubierta con defectos.....	27
Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología experimental .....	28
Figura 3. Encintado de las muestras S15-1CS - fisura en forma de (V) y posición de las muestras en cámara Salina .....	31
Figura 4. Ubicación de las muestras en cámara de Lluvia ácida .....	35
Figura 5. Equipo Novo Gloss utilizado para toma de brillo en campo y en laboratorio .....	36
Figura 6. Espectrofotómetro CM – 600 d utilizados para pruebas de color .....	36
Figura 7. Posición de las muestras recubiertas en cámara de U.V .....	37
Figura 8. Microscopía óptica del acero a 100X de una sección longitudinal, atacada con nital al 2% .....	39
Figura 9. Registro fotográfico de los sistemas de recubrimiento expuestos en prueba de desprendimiento catódico .....	42
Figura 10. Registro Fotográfico del desarrollo del ampollamiento y avance de la corrosión de los sistemas de recubrimiento fisurados expuestos en cámara salina .....	43
Figura 11. Desempeño de los sistemas de recubrimiento fisurados a diferentes horas de exposición en cámara salina .....	43
Figura 12. Micrografía SEM superficial. Localización y medida de nanoporos de los sistemas expuestos a 2000 horas en cámara salina .....	46
Figura 13. Micrografía SEM y espectro EDS superficial de la fisura S13 expuesto a 2000 horas en cámara salina.....	46
Figura 14. Espectro de EIS, diagrama de Bode para los diferentes sistemas de recubrimiento poliméricos expuestos en cámara salina y ácida .....	48
Figura 15. Espectro de EIS, diagrama del ángulo de fase para los diferentes sistemas de recubrimiento poliméricos expuestos en cámara salina y ácida .....	49
Figura 16. Espectro de EIS, diagrama de Nyquist para los diferentes sistemas de recubrimiento poliméricos expuestos en cámara salina y ácida .....	50
Figura 17. Circuito equivalente de Randles para recubrimientos .....	52
Figura 18. Variación de la resistencia de poro de los sistemas de recubrimientos estudiados de acuerdo a cada tiempo de exposición evaluado en cámara salina y ácida.....	53
Figura 19. Variación de la capacitancia de los sistemas de recubrimientos estudiados de acuerdo a cada tiempo de exposición evaluado en cámara salina y ácida.....	54

Figura 20. Variación de la Fracción Volumétrica absorbida de los sistemas de recubrimientos estudiados de acuerdo a cada tiempo de exposición evaluado en cámara salina y ácida.....	55
Figura 21. Porcentaje de variación de brillo de los sistemas de recubrimiento estudiados durante cada tiempo de evaluación expuestos en cámara ácida y U.V .....	59
Figura 22. Porcentaje de variación de blancura de los sistemas de recubrimiento estudiados durante cada tiempo de evaluación expuestos en cámara ácida y U.V .....	60
Figura 23. Variación del amarillamiento de los sistemas de recubrimiento estudiados durante cada tiempo de evaluación expuestos en cámara ácida y U.V salina .....	61
Figura 24. Espectrómetro de los principales óxidos de hierro formados en la superficie metálica. G: goetitha. L: lepidocrocita .....	62
Figura 25. Fotomicrografías SEM de los productos de corrosión de un acero de medio carbono expuesto en la estación de monitoreo Cira .....	63

## Índice de tablas

Tabla 1. Técnicas de limpieza superficial en metales .....	21
Tabla 2. Designación de los sistemas de recubrimientos poliméricos .....	29
Tabla 3. Composición química del acero por medio de espectroscopía de emisión de chispa .....	39
Tabla 4. Medida del espesor de película seca de los recubrimientos en estudio .	40
Tabla 5. Resultados del ensayo de Adherencia Pull-Off .....	41
Tabla 6. Resultados de la velocidad de desprendimiento catódico .....	41
Tabla 7. Datos experimentales obtenidos a partir de pruebas electroquímicas y delaminación catódica .....	57

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS UTILIZADOS EN CONTROL DE CORROSIÓN PARA EQUIPOS DE PROCESO EN CAMPO LA CIRA CORREGIMIENTO EL CENTRO-BARRANCABERMEJA\*

**AUTORES:** INGRID TATIANA ROJAS RODRÍGUEZ\*\*

ANDREA LIZETH ORDUZ RODRÍGUEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Ampollamiento, desprendimiento catódico, espectroscopía de impedancia electroquímica, recubrimientos orgánicos.

### DESCRIPCIÓN:

Para la evaluación del desempeño de los recubrimientos orgánicos de imprimante epóxico, con acabados/ poliuretano, polisiloxano, poliaspártico y uretano A.R aplicados sobre un acero de medio carbono, se sometieron a un ambiente simulado salino, cámara de lluvia ácida y U.V, para determinar por inspección visual en sistemas fisurados el ampollamiento y el avance del proceso de la corrosión y en sistemas no fisurados la variación en cuanto a brillo y color. Conjuntamente se realizó la instalación de un Rack en campo la Cira, donde se expusieron los sistemas de recubrimiento sin daño junto con sistemas desnudas a las condiciones naturales.

Se aplicó la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica a los sistemas ya expuestas en cámara salina y ácida, las cuales demostraron un comportamiento puramente capacitivo propio de recubrimientos que protegen bajo la acción de barrera. Por último se realizó el ensayo de desprendimiento catódico a los sistemas de estudio sin exposición, indicando la habilidad del imprimante epóxico 82% en sólidos para resistir la delaminación alrededor de las fisuras.

De los cuatro sistemas evaluados, el recubrimiento compuesto por un imprimante epóxico 82% en sólidos y un acabado de poliuretano A.R demostró alta resistencia al paso de agentes contaminantes, menor absorción de electrolito, mayor retención de brillo, blancura, menor índice de amarillamiento y menor densidad de ampollamiento y corrosión, por lo tanto este sistema tiene la capacidad de soportar ambientes salinos, ácidos y radiación ultravioleta constante sin variar su resistencia ni características ópticas de la superficie.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. Co-director: César Augusto Lopez Rojas.

## ABSTRACT

**TITLE: EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF POLYMER COATINGS USED IN EQUIPMENTS FOR CONTROL OF CORROSION PROCESS IN THE FIELD LA CIRA CORREGIMIENTO EL CENTRO-BARRANCABERMEJA \***

**AUTHORS:** INGRID TATIANA RODRIGUEZ ROJAS \*\*

ANDREA RODRIGUEZ LIZETH ORDUZ \*\*

**KEYWORDS:** Blistering, disbonding cathodic, electrochemical impedance spectroscopy, organic coatings.

### **DESCRIPTION:**

For the evaluation of the performance of organic coatings epoxy primer, enamels / polyurethane, polysiloxane, polyaspartic and urethane AR applied on a medium carbon steel, they underwent a saline simulated environment, acid rain and camera U.V. to determine by visual inspection in fissured systems blistering and advancing the process of corrosion and not fissured systems the variation in brightness and color. At this stage, there was an installation of a monitoring station in the field Cira of Barrancabermeja, there coating systems were exposed without damage with bare systems to natural conditions.

Spectroscopy technique electrochemical impedance systems already exposed in saline and applied camera acid, which demonstrated a proper purely capacitive behavior of coatings under the action protecting barrier. Finally cathodic disbonding test was performed to study systems without exposure, indicating the ability of the epoxy primer 82% solids to resist delamination around the cracks.

Of the four systems evaluated, the coating consisting of an epoxy primer 82% solids and an enamel polyurethane A.R showed high resistance to the passage of pollutants, lower absorption of electrolyte greater retention of brightness, whiteness, lower yellowness index and lower corrosion blistering density and therefore this system has the ability to withstand saline environments, acids and constant ultraviolet radiation without loss of resistance or surface optical characteristics.

---

\* Degree thesis

\*\* Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. Co-director: César Augusto López Rojas.

## INTRODUCCIÓN

Más del 70% de los materiales utilizados en la industria son metales y la mayoría de estos metales son aceros al carbono, es decir, se trata de materiales ferrosos de baja aleación y muy susceptibles al ataque por corrosión debido a la interacción con las diferentes atmósferas predominantes o simplemente por su tendencia a reaccionar con el oxígeno del medio ambiente, generando pérdidas económicas, alrededor del 4% del producto interno bruto en los países industrializados y por tanto debe ser protegido [1]. Para combatir el proceso destructivo de la corrosión existen varios mecanismos de uso común en la industria, sin embargo, en la mayoría de los casos un solo método no es suficiente para combatir la degradación de los aceros por el fenómeno de la corrosión y es usual que se utilicen simultáneamente dos o más procedimientos para el control de este fenómeno.

Dentro de los métodos más comunes que se están aplicando a nivel industrial para contrarrestar la corrosión se citan los siguientes:

- Diseño de aleaciones ferrosas de mayor resistencia a la corrosión.
- Uso de recubrimientos orgánicos e inorgánicos.
- Uso de inhibidores de corrosión.
- Protección anódica y catódica.
- 

Los recubrimientos orgánicos son los más utilizados por sus bajos costos y fácil aplicación. Dentro de ellos se encuentran las pinturas que tienen resina tipo epóxica, los cuales son muy utilizados como recubrimientos primarios en tuberías, barcos y cualquier estructura que se encuentre inmersa en agua de mar. Debido a que tienen

buena resistencia química y al desgaste, excelente adhesión, buena impermeabilidad y resistencia a los álcalis [2].

Los equipos de proceso y en especial los tanques, tuberías aéreas y estructuras metálicas instalados en el campo la Cira; ubicado en el corregimiento el Centro de la ciudad de Barrancabermeja (Santander) han venido presentando degradación prematura, alrededor de dos (2) años, en sus esquemas de control de corrosión mediante recubrimientos poliméricos por la acción de los contaminantes atmosféricos presentes en estos campos; debido a la emisión de gases propios del proceso, los cuales son cada vez más críticos ya que se trata de campos maduros que por su condición han exigido cambios en la logística de manejo de los crudos siendo más ricos en agua y gases que generan atmósferas al parecer de carácter ácido acelerando los daños por corrosión sobre las superficies metálicas.

El propósito esencial de este trabajo es evaluar el desempeño de los recubrimientos, expuestos en el campo la Cira y en cámaras de ambiente simulado, ya que estos recubrimientos son utilizados para el control de corrosión externa de la infraestructura metálica. Posteriormente, establecer el mecanismo de falla de los recubrimientos orgánicos tipo epóxico en ambiente salino y la pérdida de propiedades ópticas de los recubrimientos en ambientes de lluvia ácida, U.V y estación de monitoreo en campo. Por último, relacionar experimentalmente los resultados de la degradación de los recubrimientos orgánicos tipo epóxico, con los obtenidos de las pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica y desprendimiento catódico para determinar el tiempo en el cual los recubrimientos presentan fallas en su capacidad de proteger al sustrato metálico.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el desempeño de los recubrimientos poliméricos utilizados en el control de corrosión externa, expuestos en campo la Cira y en cámaras de ambiente simulado.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar el desempeño de los recubrimientos poliméricos expuestos en campo la Cira y en las cámaras ambiente simulado salino y lluvia ácida, por medio de pruebas de impedancia electroquímica y desprendimiento catódico.
- Evaluar el tipo de falla de los recubrimientos poliméricos expuestos en ambiente simulado salino y la pérdida de propiedades ópticas de los recubrimientos poliméricos expuestos en el campo la Cira y en los ambientes simulados de lluvia ácida y U.V.
- Identificar la morfología y los principales productos de corrosión que se forman en la estructura metálica en el campo la Cira.

## **2. MARCO TEÓRICO**

El uso de recubrimientos orgánicos anticorrosivos para la protección de instalaciones industriales constituye una de las prácticas más comunes en el control de corrosión, tanto por su versatilidad de uso, como por su bajo costo relativo. En la actualidad la investigación en este campo, busca recubrimientos de alta eficiencia, bajo costo y de bajo impacto ambiental [2].

### **2.1 RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS**

Es un material líquido compuesto esencialmente por una resina sintética, pigmentos y solventes, los cuales al ser aplicados sobre un sustrato forman una película sólida, continua, impermeable y resistente a los ambientes agresivos [3].

Los recubrimientos poliméricos tienen una porción sólida formadora de película o capa y una porción volátil, la cual se evapora para facilitar el curado o secamiento del producto aplicado. En general consta de cuatro componentes: Los pigmentos, se usan para impartir una protección específica o cualidades decorativas al recubrimiento. El vehículo, es la parte líquida y volátil de la pintura. El solvente, que facilita la aplicación de las pinturas y juega un papel importante en el secado y en la adherencia de la película y por último los aditivos, que modifican las propiedades de las películas [4].

### **2.2 TÉCNICAS DE LIMPIEZA SUPERFICIAL DE SUBSTRATOS METÁLICOS**

La preparación de la superficie tiene un papel decisivo sobre el comportamiento del recubrimiento, siendo su objetivo el de brindar una mejor adherencia entre el recubrimiento y el sustrato metálico, es decir, para que un recubrimiento tenga éxito en la protección del metal, será esencial una preparación adecuada de la superficie.

Tabla 1. Técnicas de limpieza superficial en metales [5].

<p><b>SSPC-SP1</b> Solvente</p>	<p>Procedimiento para remover materiales extraños perjudiciales tales como aceites, grasas.</p>
<p><b>SSPC-SP2</b> Manual</p>	<p>Remoción de cascarilla de laminado suelta, herrumbre y pintura suelta con cepillo manual, lijado manual, raspado manual y otras herramientas de impacto o por combinación de estos métodos.</p>
<p><b>SSPC-SP3</b> Mecánica</p>	<p>Remoción de cascarilla, herrumbre suelta y pintura suelta con cepillos eléctricos o neumáticos, impacto eléctrico o neumático, esmeril eléctrico o neumático.</p>
<p><b>SSPC-SP5</b> Metal blanco</p>	<p>Eliminación total de toda la calamina, herrumbre, recubrimientos y productos extraños, visibles a simple vista.</p>
<p><b>SSPC-SP6</b> Comercial</p>	<p>Chorro hasta que al menos las 2/3 partes de cada una de las zonas de la superficie total esté libre de todo residuo visible, polvo, aceite, pinturas en mal estado.</p>
<p><b>SSPC-SP7</b> Arenado suave</p>	<p>Es un método de limpieza rápido de remoción de cascarilla de laminación, herrumbre y pintura desprendida. Este método es usado para la eliminar la oxidación prematura formada en anteriores preparaciones de superficie.</p>
<p><b>SSPC-SP10</b> Metal casi blanco</p>	<p>Chorro hasta una limpieza en la cual el 95% de la superficie total esté libre de todo residuo visible.</p>
<p><b>SSPC-SP11</b> Mecánica con perfil de anclaje</p>	<p>Preparación de superficies con herramientas eléctricas o neumáticas removiendo la cascarilla de laminación, herrumbre y pinturas.</p>

## **2.3 SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS**

Las capas de recubrimiento que por lo general se aplican al sustrato metálico son: un imprimante “primer”, el cual es el encargado de crear fuertes enlaces con el sustrato (adherencia) [6] y con las capas que siguen, seguido por una barrera, cuya función principal es proveer un enlace fuerte entre el “primer”[7] y el acabado y por último un acabado, que en muchos casos cumple la función de capa estética. Sin embargo, por ser la capa exterior del sistema actúa como un sello resistente [8].

## **2.4 EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS EN AMBIENTES SIMULADOS**

Dentro de las técnicas de laboratorio se encuentran las de ambiente simulado, las cuales suministran como respuesta, la degradación de los recubrimientos bajo un rango de condiciones controladas. A pesar que estas técnicas no permiten reproducir simultáneamente todas las variables encontradas en servicio, los resultados suministran información para seleccionar o clasificar los recubrimientos en función de su comportamiento. Dentro de las técnicas de campo se tiene la exposición de probetas recubiertas al ambiente real y a las de ambiente simulado.

### **2.4.1 Cámara salina**

Una de las técnicas más utilizadas es la de cámara salina que de acuerdo a la norma ASTM B117-11, proporciona un entorno corrosivo controlado con el fin de obtener información relativa de la resistencia a la corrosión de los recubrimientos expuestos al ambiente de laboratorio, que simula condiciones con presencia de iones cloruros en una niebla [9].

### **2.4.2 Cámara de lluvia ácida**

Este ensayo según la norma ISO 3231 permite determinar la resistencia de los recubrimientos y pintura a la humedad de una atmósfera con contenidos de dióxido de azufre [10].

### **2.4.3 Cámara UV**

Este ensayo se regula bajo los estándares de la norma ASTM G154 [11], el cual consiste en reproducir efectos meteorizantes sobre los recubrimientos; estos efectos se producen cuando los materiales están expuestos a la luz solar y a la humedad en forma de lluvia o rocío en condiciones reales. Para lo cual se simula la radiación ultravioleta y la humedad relativa. Los fenómenos foto-oxidativos pueden causar cambio en los recubrimientos, no solo en la parte estética como el color si no en la parte funcional como en el rompimiento de las cadenas poliméricas, disminución de la elasticidad, reducción de las propiedades de barrera, etc. [12]

## **2.5 CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA RECUBRIMIENTO POLIMÉRICOS**

Existen numerosos tipos de ensayos para evaluar recubrimientos poliméricos los cuales pueden ser muy específicos para condiciones particulares de operación. Los ensayos más utilizados en la industria para evaluar el desempeño de recubrimientos son: inspección visual, adherencia y discontinuidad eléctrica. Estos ensayos aplican tanto para campo como para pruebas de laboratorio.

### **2.5.1 Ensayo de adherencia**

Este ensayo está basado en la norma ASTM D4541, la cual permite establecer en forma cuantitativa y cualitativa la fuerza requerida por unidad de área para desprender un recubrimiento del sustrato al cual está adherido o para desprender diferentes capas de recubrimiento [13].

### **2.5.2 Ensayo de discontinuidad eléctrica**

Mediante este ensayo se detecta la presencia de discontinuidades o poros en la película de recubrimiento sobre el sustrato metálico, que reducen la resistencia dieléctrica de la película. Se utiliza un equipo Holiday Detector que incluye el uso de

un electrodo de esponja, humedecido con una solución para explorar la superficie del recubrimiento, una conexión a tierra y un indicador audible para señalar un punto de discontinuidad en el recubrimiento [14].

### **2.5.3 Ensayo de inspección visual aplicado a sistemas de recubrimientos poliméricos fisurados (KIV)**

Este ensayo se realiza en sistemas recubiertos que poseen una fisura para evaluar el proceso de avance de corrosión a través de la membrana de recubrimiento. Para estimar cuantitativamente el avance de la corrosión se usa el factor calificativo KIV, como se especifica en la norma NTC 3951 [15]. Este parámetro se calcula aplicando la siguiente ecuación.

$$KIV= 100 -2 \sum Fz (| Ft | + | Fd |) \quad (1)$$

Dónde: Fz: Factor de Zona

Ft: Factor de Tamaño

Fd: Factor de Densidad

Los valores de los factores se muestran a continuación y están relacionados con los niveles de avance de la corrosión.

**Factor de zona (Fz):** El factor de zona y sus valores definidos en la escala de 1 a 10, están relacionados con los niveles de avance como se muestra a continuación:

- 2.0 = Aleatoria
- 3.0 = A 1 mm de la fisura
- 6.0 = A 3 mm de la fisura
- 7.0 = A más de 3 mm de la fisura
- 8.0 = En una región entre fisuras
- 9.0 = En más de una región entre fisuras

- 10.0 = En todas las regiones entre fisuras

**Factor de tamaño (Ft):** Es el factor de tamaño y su magnitud está definida como sigue:

- 3 = Grande (diámetro superior a tres (3) veces el ancho de la fisura)
- 2 = Mediana (diámetro entre dos (2) y tres (3) veces el ancho de la fisura)
- 1 = Pequeña (diámetro igual al ancho de la fisura)
- 0.5 = Muy pequeña (diámetro inferior al ancho de la fisura)

**Factor de densidad (fd):** Se define cuantitativamente de la siguiente manera:

- 2 = Alta (Cuando es mayor al 50% de la fisura, o mayor al 50% del área de la zona)
- 1 = Media (cuando esta entre el 20% y el 50% de la longitud de la fisura, o entre el 20% y el 50% del área de la zona)
- 0.5 = Baja (cuando en menor al 20% de la longitud de la fisura, o menor al 20% del área de la zona)

Los valores de los factores calificativos obtenidos de cada uno de los sistemas fisurados se introducen en la ecuación (1) y el resultado se ubica en los siguientes niveles para determinar el desempeño del recubrimiento.

KIV= 100      Cuando el recubrimiento no presenta falla alguna por efecto de la corrosión.

KIV  $\geq$  60      Cuando el proceso de avance de la corrosión se encuentra en rangos admisibles, es decir, que un valor inferior a este indica que el sistema de recubrimiento presenta fallas en su capacidad de protección.

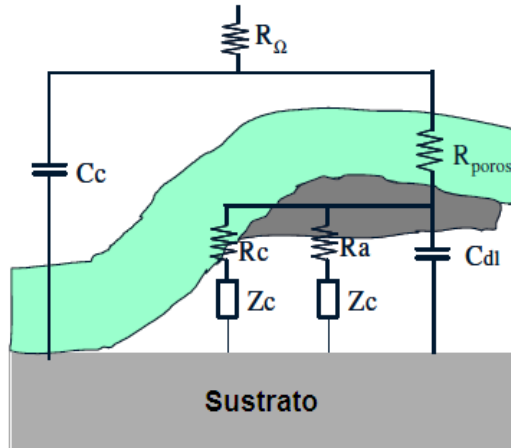
$KIV = 0$  Cuando el recubrimiento presenta deterioro completo por avance o desarrollo total del proceso de corrosión.

## **2.6 EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS).**

En la evaluación de las propiedades de los recubrimientos poliméricos sobre sustratos metálicos y los cambios durante la exposición a ambientes corrosivos, la principal ventaja de la espectroscopia de impedancia radica en usar un modelo eléctrico que represente la celda electroquímica, en donde la interfase de un electrodo experimenta una reacción electroquímica, la cual es análoga a un circuito eléctrico compuesto de una combinación específica de resistores y capacitores [16]. Es decir, que se pueden correlacionar las propiedades físicas o químicas con los elementos del circuito y extraer valores numéricos del circuito modelo.

El circuito equivalente con los parámetros utilizados en la evaluación del daño de recubrimientos y extensión de la corrosión en la interfase meta/recubrimiento se visualiza en la Figura 1. Donde ( $R_{\Omega}$ ) representa la resistencia no compensada del electrolito entre el electrodo de referencia y el de trabajo, ( $R_{\text{poros}}$ ) representa la resistencia al poro, ( $C_c$ ) la capacitancia del recubrimiento polimérico. ( $C_{dl}$ ) la capacitancia de la doble capa electroquímica. Las reacciones anódicas y catódicas inducen las resistencias anódicas ( $R_a$ ) y catódicas ( $R_c$ ), además de las impedancias del transporte de masa ( $Z_a$ ) y ( $Z_c$ ), respectivamente [16].

**Figura 1.** Ilustración esquemática de un circuito equivalente para un sistema recubierto con defectos, presentando ampollamiento, delaminación y corrosión [17].



## 2.7 DESPRENDIMIENTO CATÓDICO

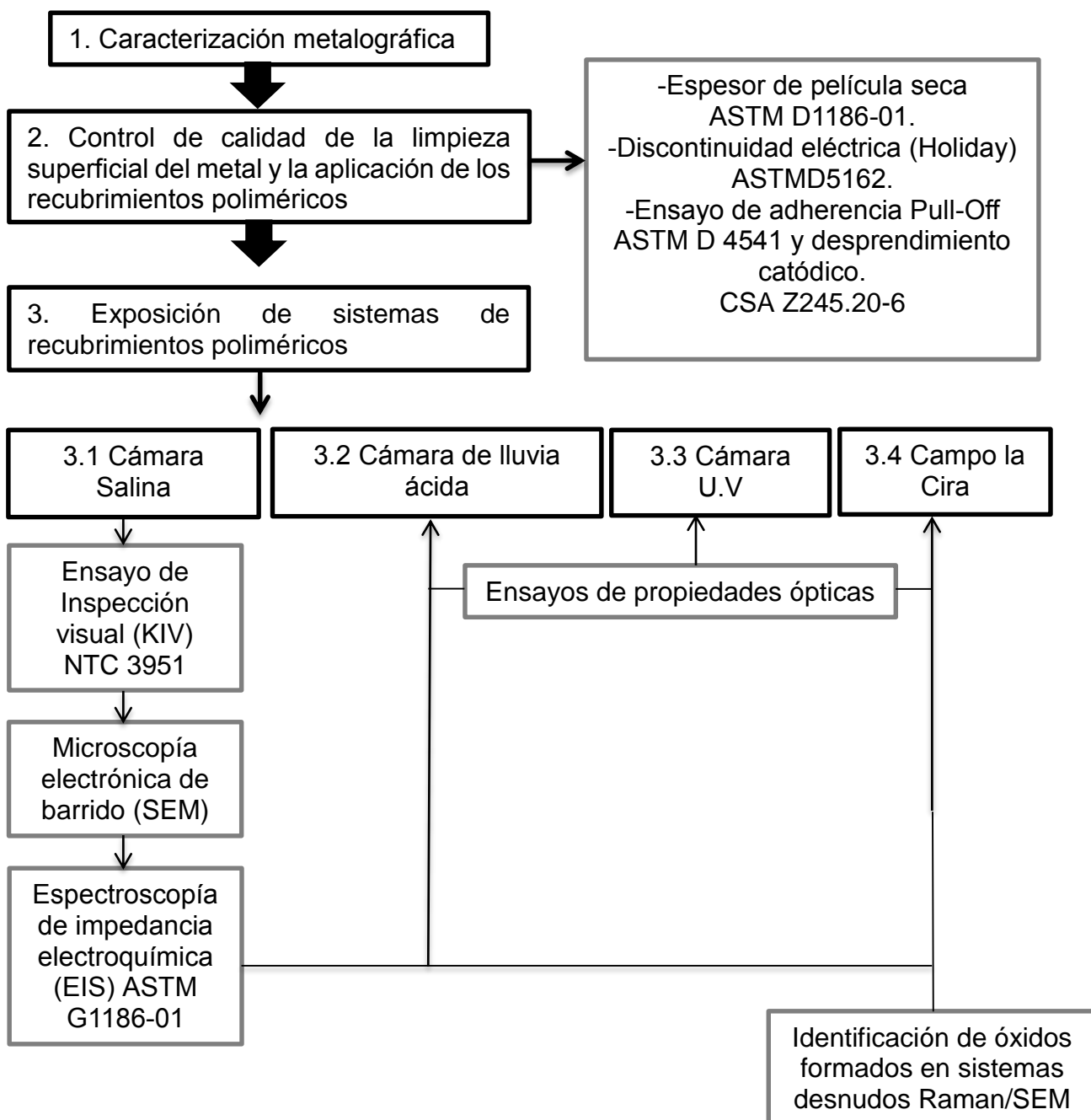
La prueba de desprendimiento catódico establecida en la norma CSA Z245.20-6 [18] proporciona condiciones aceleradas con el fin de evaluar por medio de exámenes físicos el contacto eficaz del recubrimiento con la superficie metálica, observando la distancia que se desunió o desprendió desde el borde de la perforación [18].

Los primeros trabajos sobre este método demostraron que la desunión solo se produce en soluciones que contienen cationes de metales alcalinos llevando a la conclusión de que el álcali generado por reducción catódica del oxígeno a iones hidroxilo es la causa de la pérdida de adhesión [19-20]. Varias investigaciones han demostrado que la distancia sobre la cual la desunión ha tenido lugar aumenta linealmente con el tiempo, a partir del cual se ha argumentado que el transporte de cationes a lo largo de la interfaz es controladora de la velocidad [21-22].

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de los objetivos planteados en el proyecto se presenta a continuación el esquema general de la metodología implementada.

**Figura 2.** Diagrama de flujo de la metodología experimental.



### 3.1 CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA

El material utilizado para la aplicación de los recubrimientos poliméricos, fue una placa de acero, la cual se sometió a un ensayo de espectroscopía de emisión de chispa de acuerdo a la norma ASTM 415 [23] para determinar su composición química elemental y clasificarlo según su porcentaje (%) de carbono y elementos de aleación. Seguidamente se preparó una muestra representativa para caracterizar mediante microscopía óptica el manifiesto de una microestructura de acuerdo a la norma ASTM E 407 [24] y ASTM E 3-01 [25].

### 3.2 CONTROL DE CALIDAD DE LA LIMPIEZA SUPERFICIAL DEL METAL Y LA APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS.

Se verificó que la preparación superficial de los sistemas de recubrimientos fuera con chorro abrasivo de arena hasta una limpieza grado metal blanco SSPC-SP5 con un perfil de anclaje de 3 mils (milésima de pulgada) y se utilizara una pistola convencional para la aplicación de los recubrimientos poliméricos, teniendo en cuenta las condiciones de humedad, temperatura de la superficie, punto de rocío y temperatura ambiente recomendadas por el proveedor.

Los sistemas de recubrimientos poliméricos de estudio se aprecian en la Tabla 2.

Tabla 2. Designación de los sistemas de recubrimientos poliméricos.

<b>SISTEMAS</b>	<b>AUTOIMPRIMANTE</b>	<b>ACABADO</b>
<b>S13</b>	Epóxico 82% sólidos/volumen	Poliuretano
<b>S14</b>		Polisiloxano
<b>S15</b>		Poliaspártico
<b>S16</b>		Poliuretano A.R

Posterior a la limpieza y al tiempo de curado de la aplicación de los recubrimientos realizada por la compañía SIKA S.A de Colombia, se procedió a determinar el espesor de película seca con el equipo Elcometer 456 siguiendo el método B del procedimiento establecido por la norma ASTM D1186 [26] y la presencia de porosidades, a partir del ensayo de discontinuidad eléctrica de acuerdo con la norma ASTM D 5162 [14] para sistemas de bajo espesor. Para el cálculo del voltaje utilizado durante el ensayo de discontinuidad se usó el valor promedio del espesor de cada uno de los sistemas. Aquellos sistemas que presentaron fallas puntuales por la deficiencia en la aplicación del recubrimiento fueron excluidos de la investigación.

La adherencia fue medida de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ASTM D4541 [20] sobre cupones no fisurados, el método aplicado fue el de “Pull-Off” con un equipo mecánico. Teniendo en cuenta el tipo de recubrimiento se utilizaron como guía los valores mínimos de adherencia ratificados en la norma NTC 3951[15].

Como técnica complementaria al ensayo de adherencia se aplicó el desprendimiento catódico establecido en la norma canadiense CSA Z245.20-6 [18] para los cuatro sistemas de recubrimientos, para determinar la capacidad que tiene el imprimante en adherirse a la superficie metálica. Los recubrimientos se perforaron antes de iniciar la prueba y se adhirió sobre ellos una celda plana (PVC) con un área expuesta de 58 cm<sup>2</sup>, un volumen de 300 ml de solución salina al 3% en peso de NaCl grado reactivo disuelta en agua destilada, a una temperatura de 65 °C durante 24 horas y se sometió a un potencial de 3,48 V (negativo con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl). El potencial se produce mediante la conexión del sustrato metálico al terminal negativo de una fuente de corriente continua y la conexión de un ánodo (grafito) al terminal positivo.

Posterior al tiempo de exposición se realizaron ocho cortes radiales espaciados uniformemente a través del recubrimiento al sustrato; extendidos aproximadamente

20 mm del centro de la perforación. Se insertó la punta de un cincel bajo el revestimiento en el borde de la incisión y usando la acción de palanca se retiró el recubrimiento hasta que este demuestre una resistencia a la acción de esta y se midió la zona delaminada.

Es importante aclarar que el tiempo de exposición, la temperatura y el potencial eléctrico, se escogieron de acuerdo al número de capas que compone el sistema de recubrimiento polimérico, basados en la norma CSA Z245, ITEM 12.8 [18] y a las condiciones de servicio que se encuentre la línea de producción a la cual se desee hacer la aplicación de recubrimientos poliméricos.

### 3.3 EXPOSICIÓN DE SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS

#### 3.3.1 Cámara salina

Por cada sistema de recubrimiento se expusieron cuatro probetas al ambiente salino, fisuradas en forma de “V” para acelerar el proceso de degradación de los recubrimientos al ambiente de acuerdo a lo establecido en la norma NTC 1151[27] ubicándolas en soportes con una inclinación a 30 grados de la vertical, durante un tiempo total de 2000 horas. Se realizaron evaluaciones cada 500 horas de exposición. En la Figura 3 se observa la ubicación de las probetas fisuradas dentro de la cámara salina.

**Figura 3.** a) Sistema fisurado de acuerdo a la norma NTC 1151 y b) Ubicación de las muestras dentro de la cámara salina.



El control de las variables de exposición se realizó siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM B117 [9], la cual establece la formación de una niebla salina haciendo pasar un flujo de aire por una solución salina al 5% en peso, preparada a partir de la mezcla de agua destilada tipo IV con NaCl de no más del 0.3 % de impurezas. La temperatura en la zona de exposición de la cámara fue de 36 °C, el pH de 7,1 y la velocidad de condensación de 1,5 mL/h.

- **Ensayo de Inspección Visual (KIV)**

El ensayo de inspección visual aplicado a cupones fisurado (KIV), es una técnica antigua desde el año 1996, la cual no ha sido actualizada y deja espacios vacíos en la explicación de cada factor determinante para el cálculo del parámetro KIV, por lo tanto, fue necesario complementar este ensayo con la norma ASTM D1654 [28], utilizada para determinar la medida de ataque por corrosión o desprendimiento del recubrimiento en zonas de fisura. Con el fin de complementar el factor de zona establecido por la norma NTC 3951 [14] el cual está relacionado con los niveles de avance de la corrosión.

El factor de zona establecido en la norma NTC 3951[15] y fundamentado con la norma ASTM D1654 [28] se aprecian en el Anexo A. La cuantificación del valor de KIV se realizó determinando la densidad del ampollamiento y el avance del proceso de corrosión en la interfase metal-recubrimiento para cada tiempo de evaluación.

- **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La morfología de la superficie de los recubrimientos y de los productos de corrosión de los sistemas de recubrimientos poliméricos expuestos en cámara salina a 2000 horas, se estudió a través de microscopía electrónica de barrido (MEB) o scanning electron microscope (SEM), con el equipo QUANTA FEG 650, marca FEI; en alto vacío y un voltaje de 20 kV. El estudio químico elemental se realizó con el mismo equipo usando la técnica de espectroscopía de energía dispersiva (EDS).

- **Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)**

Las medidas de impedancia se realizaron en las probetas expuestas en cámara salina cada 500 horas, con el equipo Gamry Potenciostato/Galvanostato/ referencia 2000; en condiciones estáticas.

Para esta prueba se construyó una celda plana conformada por una sección cilíndrica de PVC adherida al sistema de recubrimiento mediante silicona, permitiendo un área de exposición de 6 cm<sup>2</sup> y una capacidad volumétrica de 180 ml de solución salina al 5 % en peso de NaCl disuelta en agua destilada. En el montaje se usó un contra-electrodo de acero inoxidable 316 con un área de exposición de 65.97 cm<sup>2</sup>, un electrodo de trabajo (sistema de recubrimiento) y un electrodo de referencia de Ag/AgCl saturado.

El ensayo se realizó con un barrido de frecuencia de 200,000 Hz a 0,2 Hz, una amplitud de la señal sinusoidal de 10 mV, un voltaje de 500 mV; debido a la alta capacitancia de los recubrimientos, 7 puntos por década, una temperatura ambiente de 22 ± 2°C, 20 minutos para la estabilización del potencial en circuito abierto (OCP) y una celda faradaica para evitar los efectos de corrientes parásitas.

Los resultados obtenidos por la técnica de impedancia electroquímica (EIS) fueron simulados en el software Zview Versión 3.2 y ZPlot (adquisición del grupo de investigación de la corrosión GIC), donde se realizó el circuito eléctrico; el cual permitió relacionar los fenómenos fisicoquímicos que ocurren en los sistemas de recubrimiento polimérico.

A través del valor de la capacitancia se logró saber la cantidad de electrolito absorbido por el recubrimiento para cámara salina y cámara de lluvia ácida. Asumiendo que el incremento de la capacitancia del recubrimiento es solo debido al ingreso de agua, y que no hay hinchamiento de la película y la distribución de agua es uniforme, se tomó como referencia la ecuación 2:

$$\emptyset = \frac{\log\left(\frac{C_t}{C_0}\right)}{\log(\varepsilon)} \quad (2)$$

Donde:

- $\emptyset$ : Fracción volumétrica de agua en el recubrimiento.
- $C_t$ : Capacitancia del recubrimiento después de un tiempo de inmersión.
- $C_0$ : Capacitancia del recubrimiento al tiempo cero (Capacitancia película seca, estado inicial de inmersión)
- $\varepsilon$ : Constante dieléctrica del agua ( $\varepsilon=80$ )

Posterior a la obtención de los resultados de resistencia de poro, capacitancia y fracción volumétrica de agua absorbida, se introdujeron en una ecuación empírica (Ecuación 3) propuesta en los análisis de varianza y de prueba de Durbin-Waston [38] para determinar el tiempo en el cual los recubrimientos tienden a presentar fallas en su capacidad de proteger al sustrato y de esta manera poder comparar estos tiempos con los obtenidos por el método KIV.

$$T_f(h) = -477,831 - 69,2365[\log(R_p)] - 3431,26(\emptyset) - 1452,05\left[\log\left[\frac{dx}{dt}\right]\right] \quad (3)$$

Donde

$T_f$ = Tiempo en el cual los recubrimientos tienden a presentar fallas en su capacidad de proteger al sustrato (h) a partir de los parámetros electroquímicos.

$R_p$  = Resistencia a la polarización.

$\emptyset$ = Fracción volumétrica de agua adsorbida por el recubrimiento, obtenida a partir de los datos de capacitancia del recubrimiento.

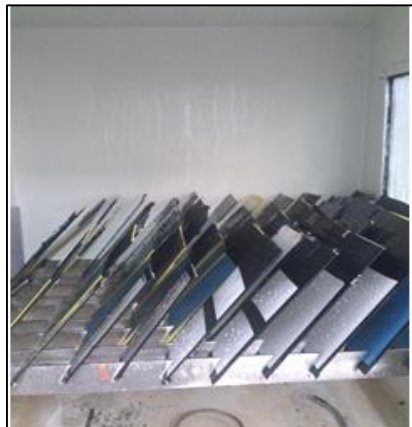
$dx/dt$  = Velocidad de desprendimiento catódico (mm/h).

### 3.3.2 Cámara de lluvia ácida

Cinco probetas de cada sistemas de recubrimiento polimérico, fueron expuestas en cámara de lluvia ácida, ubicandas en soportes con una inclinacion de 30° de la vertical. Durante un tiempo total de 3000 horas; realizando evaluaciones cada 600 horas de exposición.

El control de las variables de exposición se realizó siguiendo el procedimiento establecido por la norma ISO 3231 [10]. La cámara simula una atmósfera de humedad relativa  $95 \pm 5 \%$  y temperatura constante de  $40 \pm 3^{\circ}\text{C}$ . Por medio de la combinación de 5,25 gramos de sulfito de sodio y 4,2 gramos de ácido sulfúrico se obtuvo un litro de gas de dióxido de sulfuro para simular los efectos de lluvia ácida. La ubicación de las probetas en cámara de lluvia ácida se aprecia en la Figura 4.

**Figura 4.** Ubicación de las muestras en la cámara de lluvia ácida.



#### • Ensayos de propiedades ópticas

Las propiedades ópticas como el brillo y el color (amarillamiento y blancura) fueron evaluadas para determinar el deterioro del acabado causado por la exposición agresiva de los ambientes simuladas en las cámaras y ambientes naturales.

El equipo utilizado para la medición de brillo de las superficies de los recubrimientos antes de la exposición y después de cada 600 horas en cámara de lluvia ácida fue un brillómetro Novo-Gloss , con el cual se midió el brillo de la

superficie del recubrimiento de acuerdo a la norma ASTM D523 [29]. El equipo se aprecia en la Figura 5.

**Figura 5.** Equipo Novo Gloss utilizado para toma de brillo.



El equipo utilizado para la medición de color (amarillamiento y blancura ) de las superficies de los recubrimientos antes de la exposición y después de cada 600 horas en cámara de lluvia ácida; fue un espectrofotómetro CM-600d, el cual puede apreciarse en la Figura 6.

**Figura 6.** Espectrofotómetro CM-600d utilizado para pruebas de color.



Las medidas de impedancia se realizaron en las probetas expuestas en cámara lluvia ácida cada 600 horas, con el equipo Gamry Potenciostato/Galvanostato/ referencia 2000, con las mismas condiciones que se aplicaron para las probetas expuestas en cámara salina, enunciadas en el numeral 4.3.1.

### 3.3.3 Cámara de radiación ultravioleta U.V

Cinco probetas de cada uno de los sistemas de recubrimiento fueron expuestas en cámara U.V, ubicadas en soportes en posición vertical. El control de las variables de exposición se realizó siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM G154 [11]. La cámara utiliza lamparas fluorescentes ultravioleta (U.V) para simular los efectos de la luz solar. Alternadamente utiliza humedad de condensación y/o rociado con agua desionizada para simular los efectos de la lluvia y el rocío. La norma establece ciclos alternados de 8 horas de luz ultravioleta (U.V) con un valor de irradiación real de 340 nm y 8 horas de condensación a 50°C. En la Figura 7, se observa las muestras de ensayo en posición frontal de la cámara.

**Figura 7.** Posición frontal de las muestras recubiertas.



Antes de la exposición y después de cada 600 horas en cámara U.V se tomaron los datos relacionados con el brillo y el color de la superficie del recubrimiento, para determinar las pérdidas de propiedades ópticas del acabado por causa de la radiación ultravioleta y humedad.

### **3.3.4 Campo la Cira**

Los sistemas de recubrimientos poliméricos fueron expuestos en campo la Cira con el fin de relacionar su desempeño en condiciones atmosféricas reales y en ambientes simulados, por medio de los ensayos de propiedades ópticas y de impedancia electroquímica (EIS).

En el campo se expusieron cuatro probetas de cada sistema de recubrimiento y dos probetas desnudas (sin recubrimiento) durante 5040 horas (siete meses) a un ambiente atmosférico de alta humedad; mayor del 60%, con presencia de agentes contaminantes como cloruros, sulfuros, monóxido y dióxido de carbono (SO<sub>x</sub>, Cl<sup>-</sup> y CO<sub>x</sub>) [30].

Las probetas desnudas se instalaron para determinar el tipo y la morfología del óxido que se forma en la superficie metálica por causa de la agresividad del ambiente, por medio de la técnica Raman y SEM.

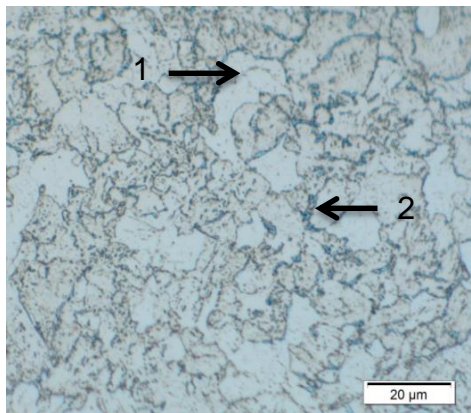
La aplicación de la técnica Raman se basó con la aplicación de un láser color verde (argón) con una potencia de 5 KW, un filtro al 50% es decir a 2,5 KV, con una magnificación de 50X, un enfriamiento láser BSD en estado sólido, equipo lan Raman lab Otonowa HR de la Universidad de Antioquia.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA

En la Figura 8 se observa la micrografía óptica del acero a 100x. La cual está constituida por granos de ferrita deformados y rodeados por un límite de grano de perlita. La deformación de estos granos es propia del proceso de laminación en caliente durante su producción. En la Tabla 3 se observa la composición química del acero por medio de espectroscopía de emisión de chispa de acuerdo a la norma ASTM 415.

**Figura 8.** Micrografía óptica tomada a 100X de una sección longitudinal, atacada con nital al 2%. 1. Ferrita y 2. Perlita.



**Tabla 3.** Composición química del acero por medio de espectroscopia de emisión de chispa ASTM 415.

COMPOSICIÓN QUIMICA DEL ACERO				
Elemento	C	Al	Cr	Mn
Composición %	0.36	0.291	0.04	0.26
Elemento	Si	Sn	Ti	Va
Composición %	2.23	0.014	0.03	0.005
Elemento	Nb	Ni	P	S
Composición %	0.06	0.011	0.019	0.05

De acuerdo a la composición química, este acero se clasifica como de medio carbono y de bajo porcentaje de elementos de aleación y debido a que posee una microestructura ferrítica presenta una gran tendencia al ataque por la corrosión cuando está expuesto al ambiente y por lo tanto debe ser protegido. Este acero presentó una dureza promedio de 48 HA de acuerdo a norma ASTM E-18 [31].

#### 4.2 CONTROL DE CALIDAD DE LA LIMPIEZA SUPERFICIAL DEL METAL Y LA APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS

Por medio del equipo Elcometer 456 se determinó el espesor de película seca de los recubrimientos poliméricos aplicados sobre el sustrato metálico, los cuales se describen en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Medida del espesor de película seca de los recubrimientos en estudio.

SISTEMA	AUTOIMPRIMANTE	ACABADO	EPS PROM (mils)
S13	Epóxico 82% solidos/volumen	Poliuretano	8.58
S14		Polisiloxano	7.6
S15		Poliaspártico	8.12
S16		Poliuretano A.R	10.2

Los resultados de espesor de película seca obtenidos para cada sistema de recubrimiento se compararon con los mencionados en el manual del fabricante y se observa que se encuentran entre los espesores adecuados para lograr un desempeño óptimo del recubrimiento. Para el cálculo del voltaje a utilizar durante el ensayo de discontinuidad eléctrica se utilizó el valor promedio del espesor de película seca de cada uno de los sistemas. La norma establece aplicar 67.5 V para

un espesor de película seca entre 6 y 12 mils. Las probetas que presentaron deficiencias en la aplicación del recubrimiento fueron excluidas de la investigación.

Los valores de adherencia obtenidos por el método de Pull-Off después del tiempo de curado del recubrimiento se observan en la Tabla 5. Donde se evidencia los altos valores de adherencia indicando una excelente penetración del recubrimiento en el sustrato metálico y su compatibilidad química con este.

**Tabla 5.** Resultados del ensayo de Adherencia Pull-Off.

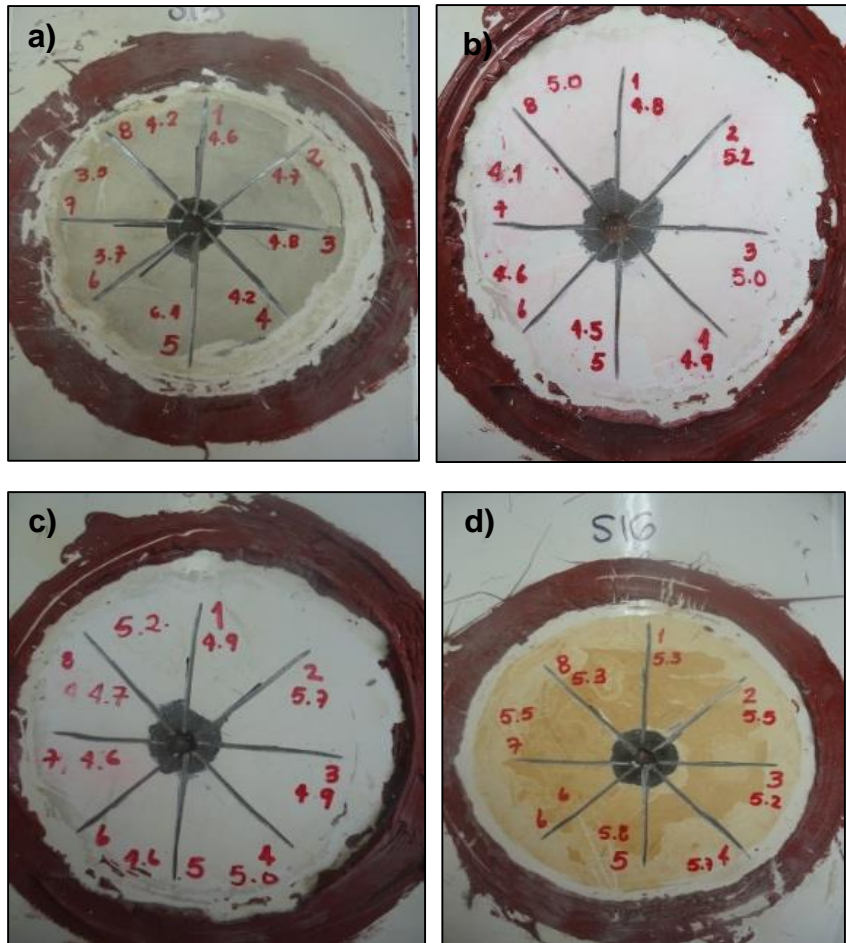
<b>SISTEMA</b>	<b>0 HORAS</b>
S13	2800psi :90%Cohesiva Imprimante+10%Pegante
S14	1000 psi :100%Pegante
S15	1850 psi: 100%Cohesiva Imprimante
S16	2300 psi:100%Cohesiva Imprimante

Los resultados de las medidas de desprendimiento catódico se encuentran registrados en la Tabla 6 y en la Figura 9 el registro fotográfico de las muestras después de la delaminación.

**Tabla 6.** Resultados de la velocidad de desprendimiento catódico.

<b>Sistema de recubrimiento</b>	<b>Longitud promedio de desprendimiento (mm)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Velocidad de desprendimiento (mm/h)</b>
S13	4.51	0.89	0.19
S14	4,76	0.35	0.20
S15	4.95	0.37	0.21
S16	5.54	0.28	0.23

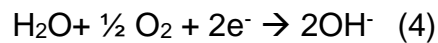
**Figura 9.** Registro fotográfico de la prueba de desprendimiento catódico para los sistemas a) S13 b) S14 c) S15 d) S16.



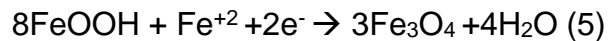
En la Tabla 6 se observó la velocidad de desprendimiento promedio de los diferentes sistemas de recubrimiento para el tiempo de exposición de 24 horas a 65°C. La mayor velocidad la presentó el sistema S16, mientras la menos, el sistema S13, por una diferencia de 1,1 milímetro. Sin embargo, los cuatro sistemas de revestimientos se encuentran dentro de los requisitos de prueba según la norma CSA Z245, ITEM 12.8-Tabla 6 [18]. La cual permite un valor de delaminación máximo de 6.5 mm para pruebas de laboratorio.

Este resultado muestra la habilidad del imprimante epóxico 82% en sólidos para resistir la delaminación alrededor de las fisuras o daño en condiciones aceleradas, además se evidencia una relación con las altas adherencias del recubrimiento al sustrato metálico obtenidas después de curado el recubrimiento.

Según la teoría de R. Montoya, F.R. García-Galván, A. Jiménez-Morales, J.C. Galván [32]. La reacción de reducción llevada a cabo en el proceso de desprendimiento catódico es:



La oxidación resulta en la deposición de óxido FeOOH. Una vez el óxido hace contacto con el acero, se convierte en el reactivo catódico y se reduce a magnetita [33], una reacción posible es:



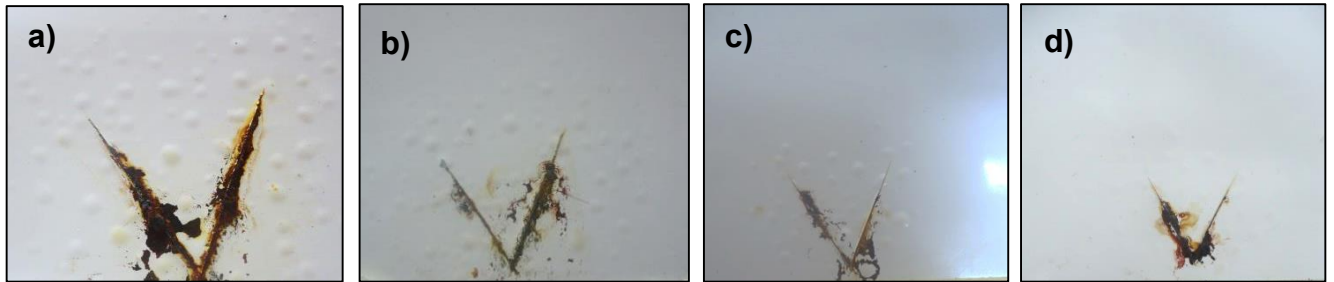
#### **4.3 ENSAYO DE INSPECCIÓN VISUAL (KIV) APLICADO A CUPONES FISURADOS EXPUESTOS EN CÁMARA SALINA**

Los resultados obtenidos de la inspección visual de los sistemas fisurados sometidas al ambiente simulado salino de acuerdo a los diferentes tiempos de evaluación (0, 500, 1000, 1500 y 2000 horas), fueron reportados individualmente de acuerdo con los criterios de la norma NTC 3951; los cuales pueden apreciarse en el Anexo A. En la Figura 10. 1) se observa el registro fotográfico del desarrollo del ampollamiento y en la Figura 10. 2) se aprecia el avance del proceso de corrosión en los recubrimientos fisurados después de 2000 horas de exposición al ambiente simulado salino.

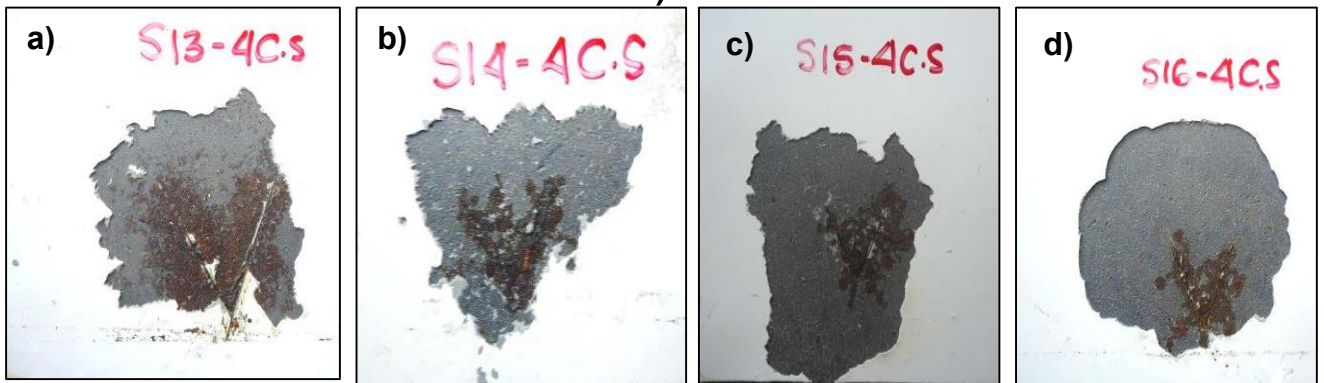
**Figura 10.** Ensayo de inspección visual (KIV) aplicado a los sistemas de recubrimiento fisurados expuestos en cámara salina durante 2000 horas 1) registro fotográfico del desarrollo del ampollamiento y 2) registro fotográfico del avance del

proceso de corrosión en la interfase metal-recubrimiento de los sistemas a) S13, b) S14, c) S15 y d) S16.

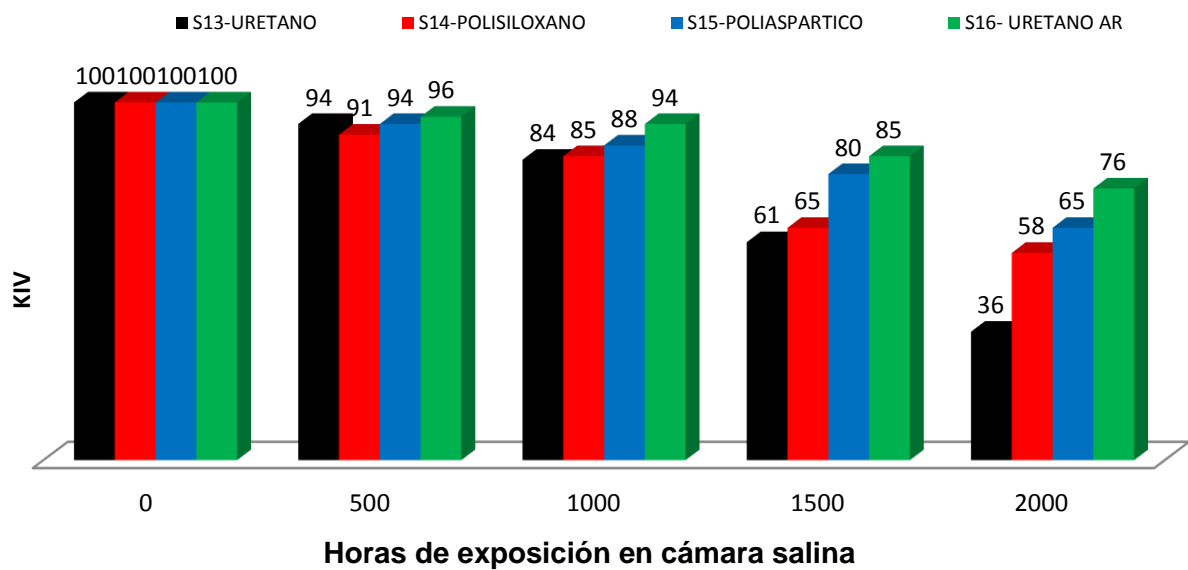
1)



2)



**Figura 11.** Desempeño de los sistemas de recubrimiento fisurados a diferentes horas de exposición en cámara salina.

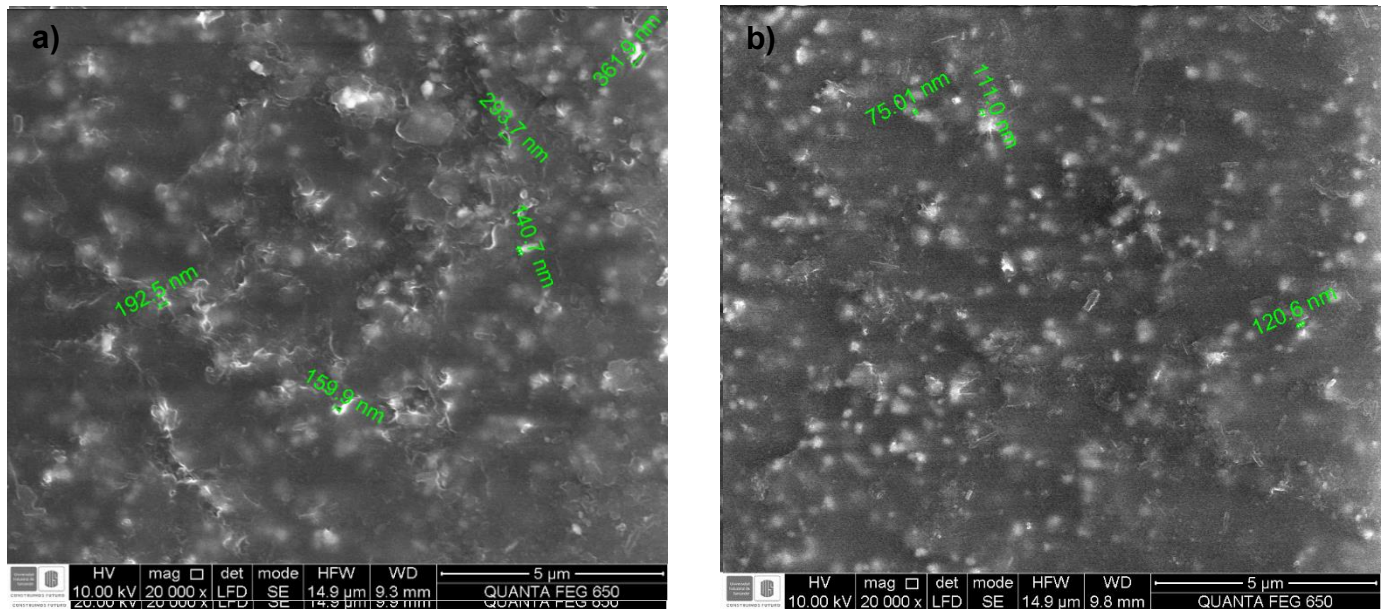


En la Figura 10. 2) se observó que el proceso de avance de la corrosión incrementa levemente para cada sistema de recubrimiento; esto hace que se disminuya con el transcurso del tiempo de exposición el valor de KIV. En la Figura 11 se refleja como los sistemas S15 y S16, obtienen valores admisibles de KIV ( $KIV > 60$ ) a un tiempo exposición de 2000 horas en cámara salina; lo cual indica que estos sistemas con fisura poseen una vida útil mayor a 2000 horas de exposición en un ambiente salino acelerado. Sin embargo, los sistemas S13 y S14 no presentan deterioro completo por avance o desarrollo total del proceso de corrosión durante 2000 horas de exposición, ya que el KIV no decae a cero, sino que presentan indicio de fallas en su capacidad de proteger al sustrato metálico.

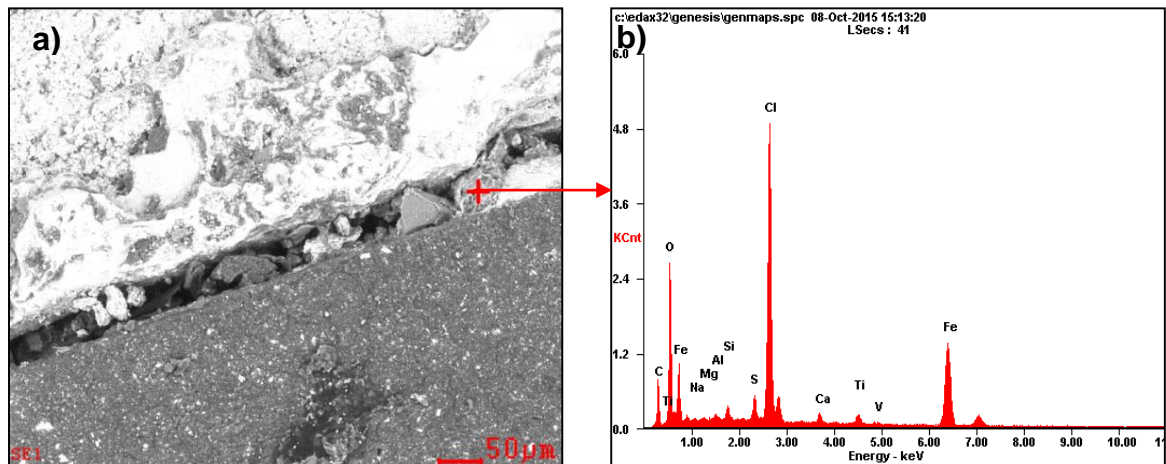
El sistema 13 presentó mayor deterioro debido a la formación de ampollas en las zonas cercanas a la fisura, indicando un aumento en la filtración de electrolito en la interfase metal recubrimiento, por lo cual se presentó mayor la acumulación de NaOH en sitios catódicos que dieron origen al crecimiento del ampollamiento catódico [34]. El sistema que presentó menor afectación en cuanto al proceso de corrosión y ampollamiento fue el sistema S16, debido a la buena cohesión entre acabado y el autoimprimante y la alta fuerza de adhesión del recubrimiento con el sustrato metálico, lo que generó una menor permeabilidad al paso de electrolito y una óptima capacidad de proteger.

#### **4.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) APLICADA A SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS EXPUESTOS A DOS MIL (2000) HORAS EN CÁMARA SALINA.**

**Figura 12.** Micrografía SEM superficial de los sistemas de recubrimientos expuestos en cámara salina: localización y medida de nanoporos a 20.000 X. a) S13, b) S14, c) S15 y d) S16.



**Figura 13.** Micrografía SEM superficial del sistemas S13 expuesto a 2000 horas de exposición en cámara salina a) Fisura del sistema S13 y b) Espectro de la película de óxido.

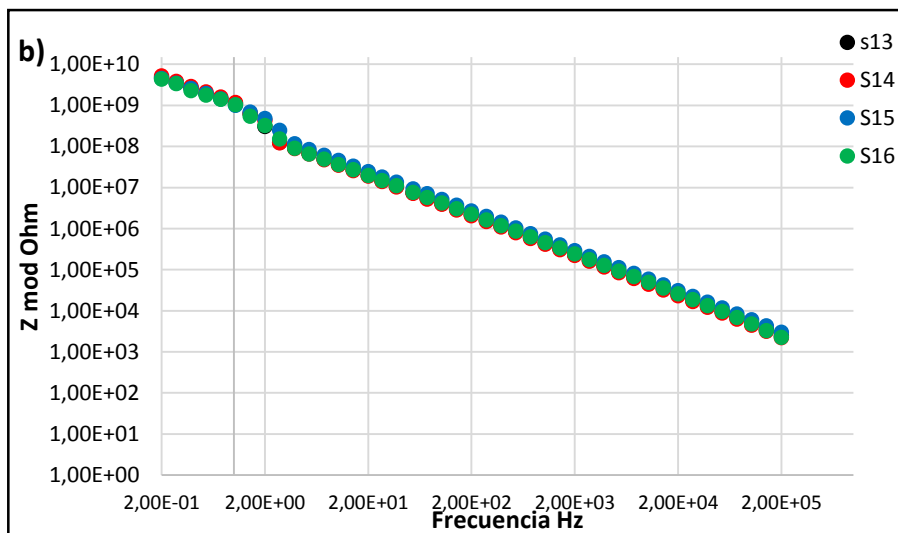
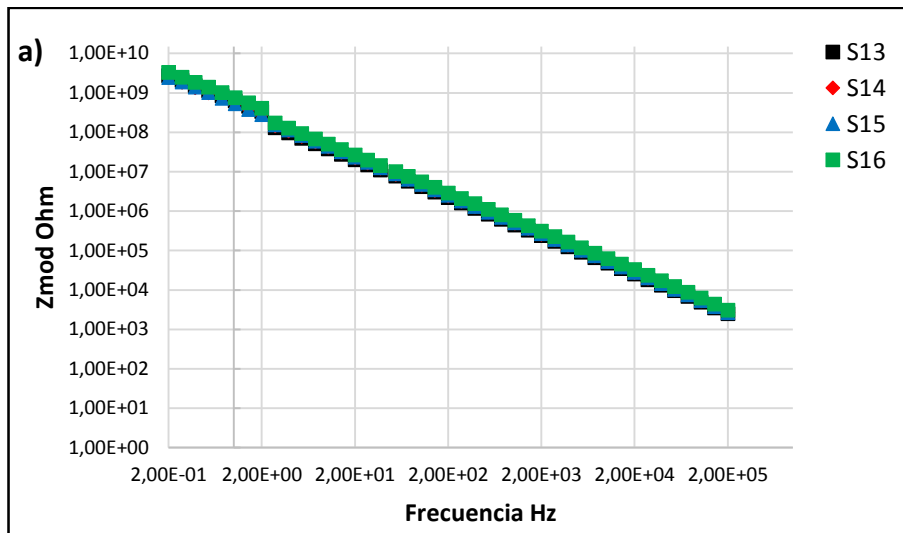


Se observó en Figura 12 a) la morfología del sistema S13 expuesto a 2000 horas en cámara salina, se observa la presencia de poros de mayor tamaño con respecto a los demás sistemas evaluados, con una longitud máxima de poro de 790.2 nm. Los cuales se convierte en regiones donde el electrolito se pueda difundir hasta el sustrato metálico provocando la degradación prematura del recubrimiento y la pérdida de propiedades protectoras de la superficie metálica.

En las zonas fisuradas ocurrió la formación de caminos conductores en el recubrimiento y el transporte de iones a través de este. Formando una capa de óxido en presencia de iones cloruro y sodio como se muestra en la micrografía y en el espectro de la Figura 13 b), que ocasionan la rápida delaminación de la zona fisurada. La región central de las fisuras actuó como una región anódica mientras que los bordes recubiertos actuaron como zonas catódicas [35]. Las reacciones básicas posibles son las de oxidación del hierro en presencia de agua con la formación de mezclas complejas de óxidos de hierro hidratado e hidróxidos de hierro [36]. Además, en el espectro de la Figura 13 (b) se observó la presencia de Mg, Si, Al y Ti en la superficie de los recubrimientos. El titanio hace parte de los pigmentos que componen la pintura añadido como  $TiO_2$ , el cual proporciona resistencia química, absorción de la radiación U.V y evita la degradación prematura de los acabados [36]. Los demás elementos componen los pigmentos propios de la pintura (óxidos de hierro, silicatos etc.) [37]

#### **4.5 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA APLICADA A SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS EXPUESTOS EN CÁMARA SALINA Y LLUVIA ÁCIDA**

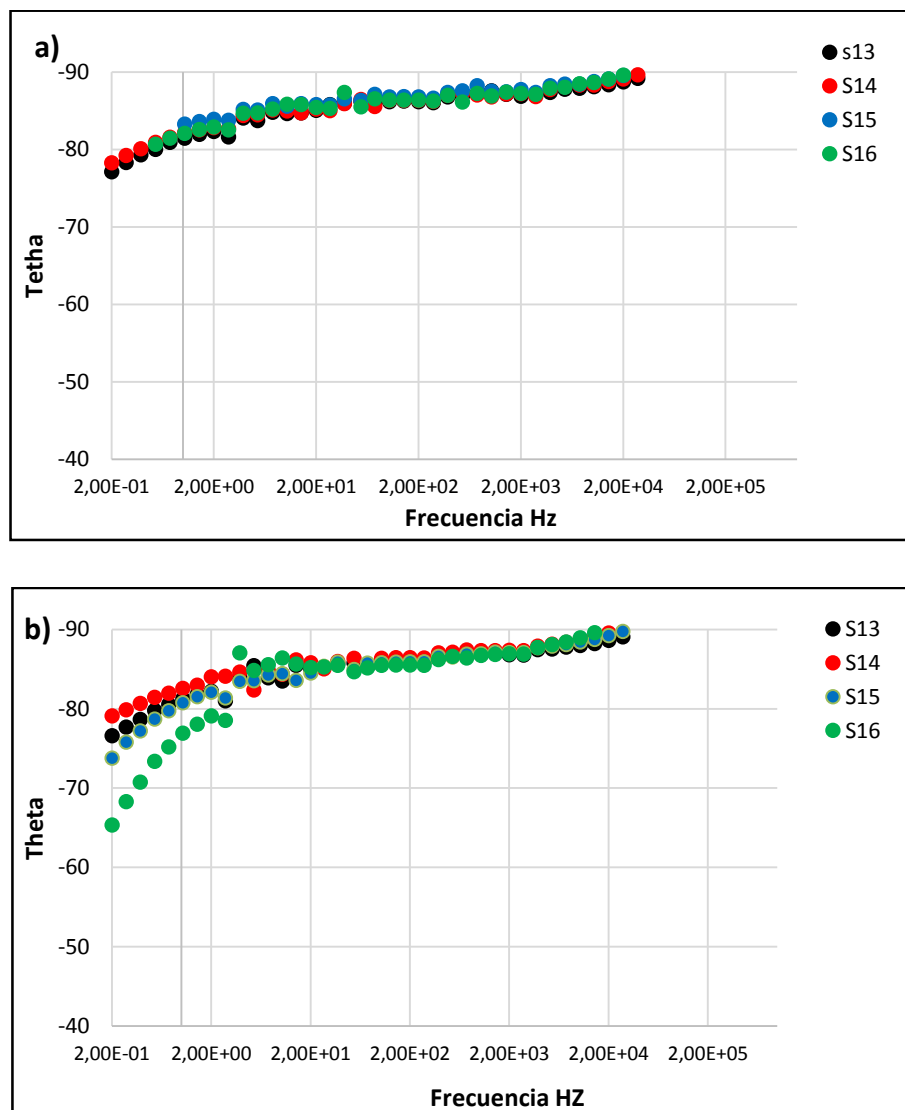
**Figura 14.** Espectro de EIS, diagrama de Bode para los diferentes sistemas de recubrimiento poliméricos evaluados. a) 2000 horas en cámara salina. b) 3000 horas en cámara de lluvia ácida.



En los diagramas de Bode para cámara salina y cámara de lluvia ácida. Figura 14 (a y b) los módulos de impedancia fueron superiores a  $10^9 \Omega$ , lo cual permite clasificar a estos recubrimientos de excelente protección de acuerdo a la clasificación de Lee y Masfeld, esto puede ser explicado por la alta resistencia dieléctrica que reduce el exceso de elementos iónicos a través del recubrimiento [38]. Para todo el rango de frecuencia no se observó un cambio de pendiente significativa en especial en el rango de frecuencias medias por tanto solo se presenta una sola constante en el tiempo, propio de recubrimientos poliméricos con

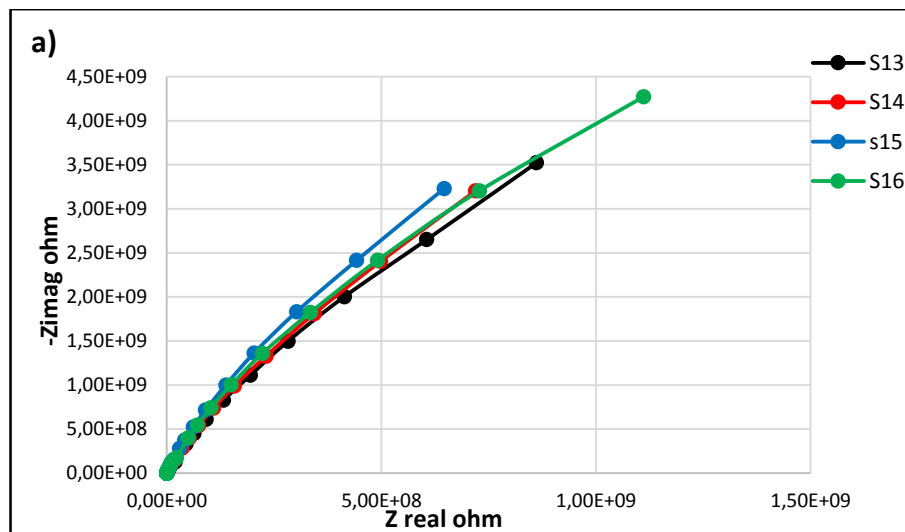
características no conductoras que corresponden a un comportamiento capacitivo [39].

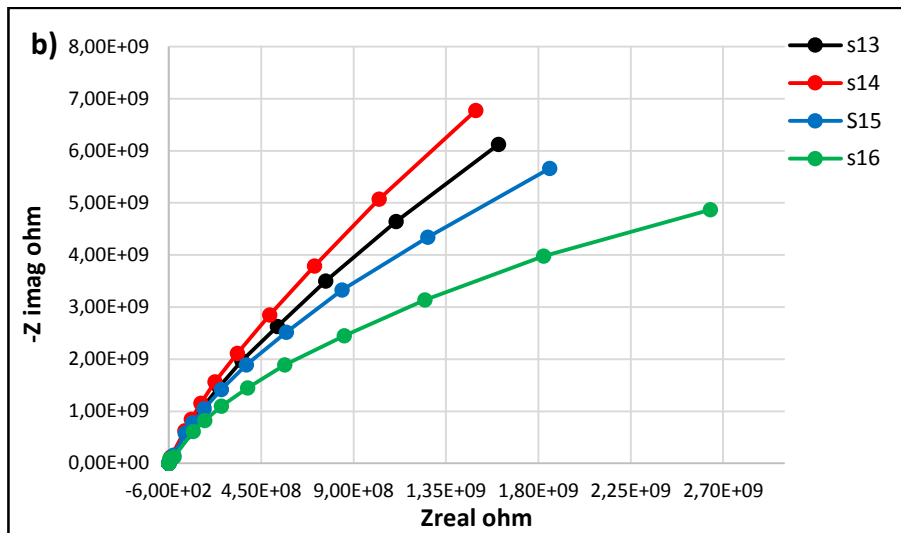
**Figura 15.** Espectro de EIS, diagrama de ángulo de fase vs frecuencia, para los diferentes sistemas de recubrimiento evaluados. a) 2000 horas en cámara salina. b) 3000 horas en cámara de lluvia ácida.



En las Figura 15 (a y b) se observa que para altas frecuencias los sistemas de recubrimientos presentan un ángulo de fase  $90^\circ$  indicando que las películas de los recubrimientos son estables, no porosas y no soluble. A bajas frecuencias como 0.2 Hz se aprecia en cámara de lluvia ácida ángulos de fase entre  $60^\circ$  y  $70^\circ$ ; indicando que hay mayor interacción de los recubrimientos poliméricos con las condiciones agresivas de la cámara pero que igualmente el sustrato metálico aún se encuentra protegido ya que no se presenta una tendencia del ángulo de fase a llegar a  $45^\circ$ , lo que significa que no hay una transición de aislante a conductor en los recubrimientos y a su vez se confirma un comportamiento capacitivo [40].

**Figura 16.** Espectro de EIS, diagrama de Nyquist para los diferentes sistemas de recubrimiento evaluados. a) 2000 horas en cámara salina, b) 3000 horas en cámara de lluvia ácida.





En la Figura 16 (a y b) se observan los diagramas de Nyquist para los diferentes sistemas de recubrimiento, la una tendencia a formar semicircunferencias propias de comportamientos puramente capacitivos sin presencia fenómenos difusivos, durante todo el tiempo de exposición para ambas cámaras de ambiente simulado, lo cual se corrobora con el diagrama de ángulo de fase [38].

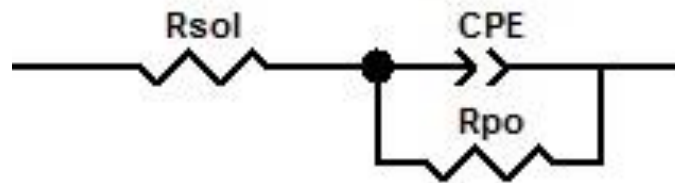
Se evidencia que el diámetro del arco en el diagrama de Nyquist para el sistema 16, Figura 16 (b), respecto al eje real tiende a aumentar mientras que para el eje imaginario tiende a disminuir, comparado con los demás sistemas de recubrimientos indicando una mayor interacción la atmósfera ácida.

Para los sistemas de recubrimientos expuestos en campo, el comportamiento de los diagramas de Bode, ángulo de fase y Nyquist se observa en el Anexo B, los cuales fueron similares a los espectros de las cámaras aceleradas, señalando que los recubrimientos poliméricos después de 5040 horas mantienen su propiedad protectora hacia el sustrato metálico.

Para la construcción y análisis del circuito eléctrico equivalente se tuvo en cuenta cada componente que tuviera relación con los fenómenos que sucedían en el sistema recubrimiento-metal, se hizo uso del programa Zview versión 3.2 y Zplot, los cuales modelaron de la mejor manera los datos experimentales obtenidos por la

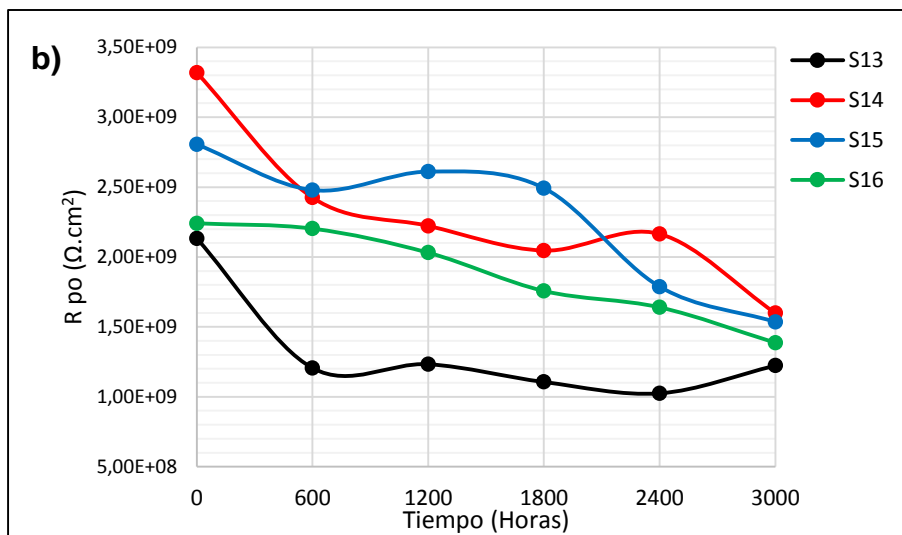
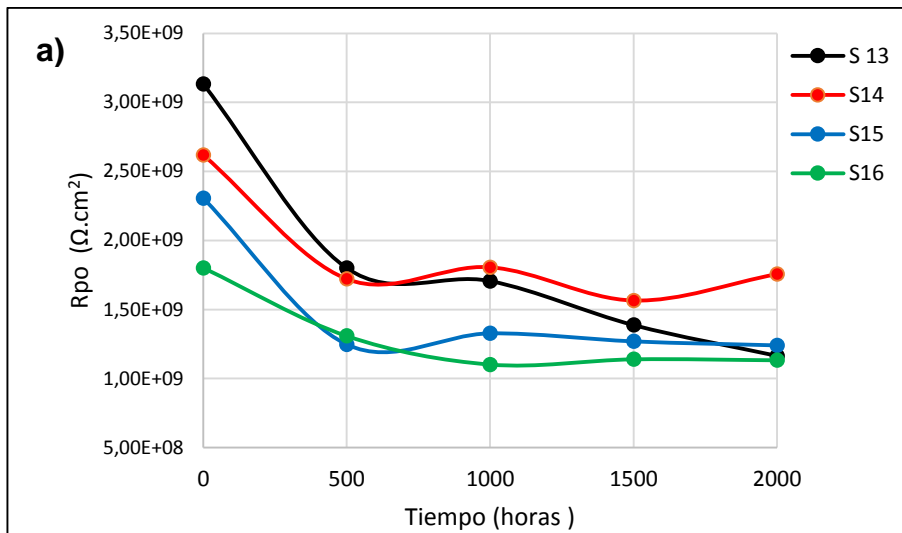
técnica de EIS para cámara salina y cámara de lluvia ácida de cada recubrimiento. El circuito que mejor representa el comportamiento de la prueba, es el circuito Randles (Figura 17), utilizado por varios investigadores para modelar el comportamiento de recubrimientos intactos [41]

**Figura 17.** Circuito equivalente de Randles para recubrimientos.



Los parámetros obtenidos en el circuito son  $R_{sol}$  resistencia asociada al electrolito,  $R_{po}$  resistencia al poro, asociado a la formación de canales para la conducción de iones a través del recubrimiento. Y para la simulación de la capacitancia se hizo uso de elementos de fase constante CPE para poder recompensar efectos de no idealidad de la capacitancia obtenida en los procesos interfaciales debido a la heterogeneidad de la película [40].

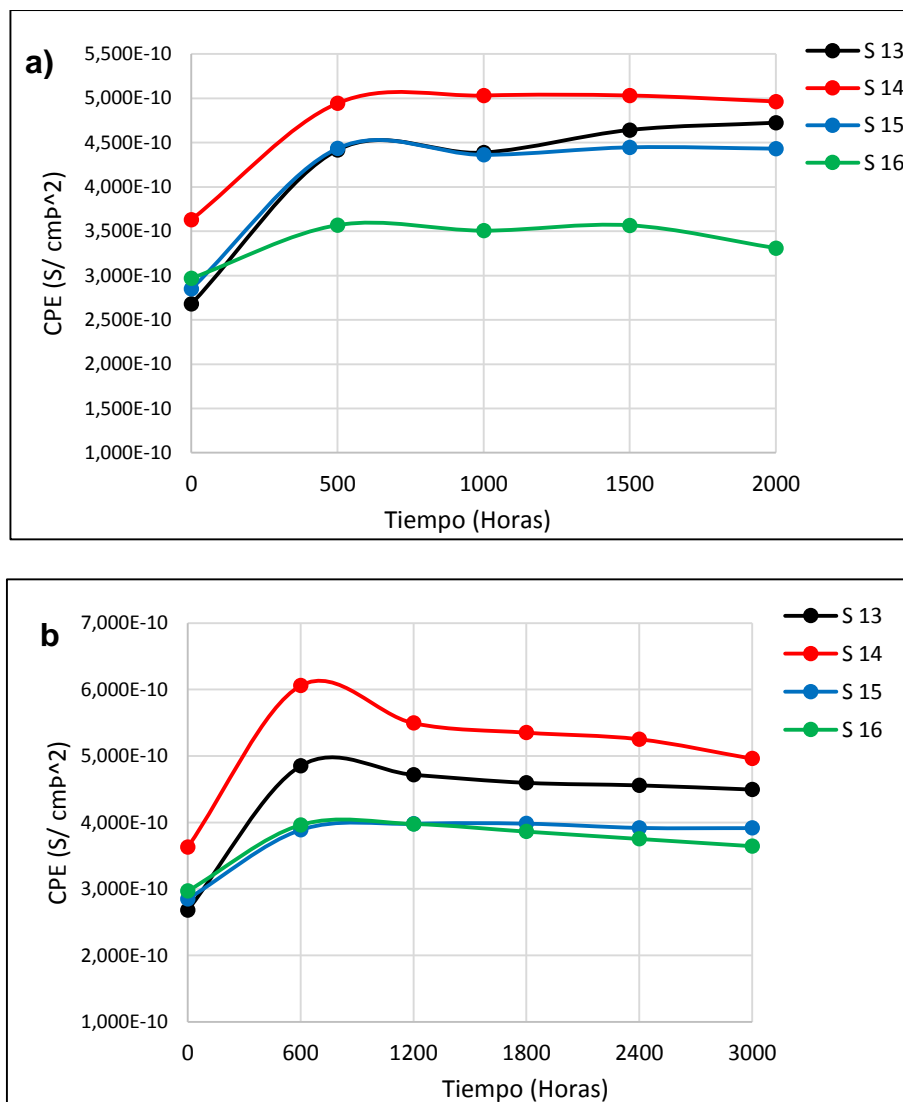
**Figura 18.** Variación de la resistencia de poros con el tiempo de exposición de los diferentes sistemas de recubrimiento a) Cámara salina 2000 horas de exposición y, b) Cámara de lluvia ácida 3000 horas de exposición.



En la Figura 18 (a y b) se observa un decaimiento de la  $R_{po}$  durante las primeras 500 y 600 horas de exposición para cámara salina y cámara de lluvia ácida, como consecuencia de la apertura de los poros y la introducción del electrolito [42]. Después de las 500 y 600 horas se presenta menor variación de la resistencia al poro en un rango de  $1,5E9$  y  $2,5 E9 \Omega.cm^2$ , lo cual indica que la apertura de los poros se mantiene estable [42] y a su vez es una respuesta a la saturación de ellos por elementos iónicos contenidos en el electrolito; Demostrando así una baja permeabilidad del recubrimiento al paso de agua [43].

Según de Masfeld, Murray y Hack estos valores de resistencia al poro del orden de  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$  son para recubrimientos poliméricos de excelente protección, sin indicios de corrosión por el paso de agentes contaminantes (cloruros y sulfuros provenientes de las cámaras de ambiente simulado) en la interfase metal-recubrimiento durante todo el tiempo de exposición [36 -37]

**Figura 19.** Capacitancia de los recubrimientos poliméricos en: a) Cámara salina a 2000 horas de exposición, b) Cámara de lluvia ácida a 3000 horas de exposición.

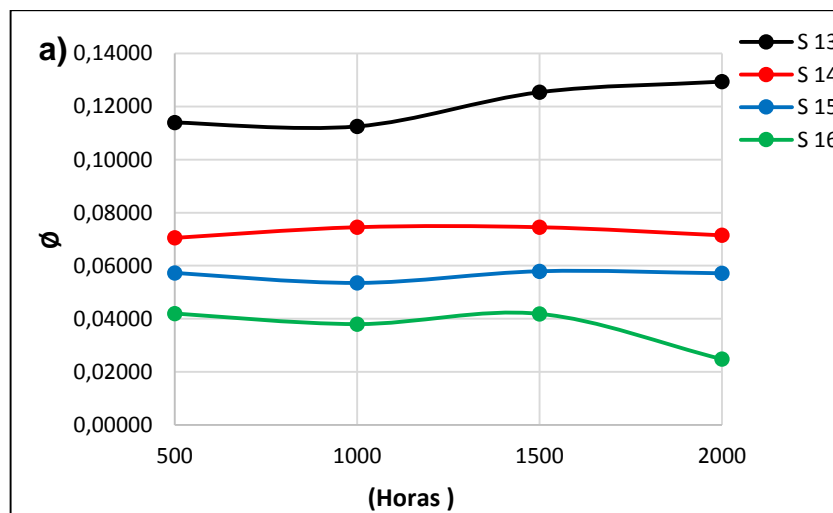


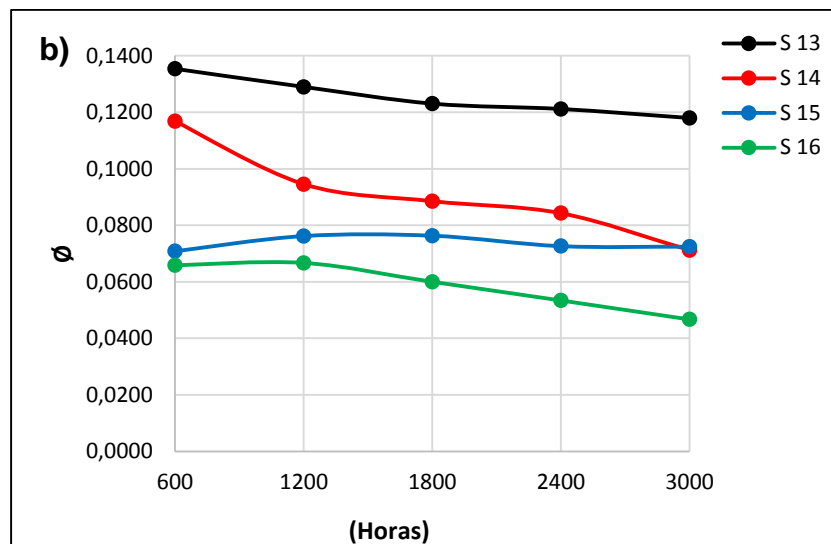
En la Figura 19 (a y b) se observa que para las primeras horas de exposición la capacitancia incrementa debido a la absorción de electrólito [42]. Después de 500 horas en cámara salina y 600 horas en cámara de lluvia ácida la capacitancia presenta menor variación, lo cual confirma que las porosidades en el recubrimiento se saturan por absorción de electrólito.

Para un capacitor ideal, el elemento de fase constante tienden a uno ( $\eta \rightarrow 1,0$ ); en las pruebas se obtuvieron valores de 0,96-0,97 (Anexos C,D y E); lo cual se asocia a la poca porosidad y la mínima presencia de defectos en los sistemas de recubrimientos poliméricos estudiados [43].

Los resultados anteriores ponen de manifiesto la poca permeabilidad y la excelente barrera dieléctrica que ofrecen los recubrimientos poliméricos a una de exposición de 2000 horas en cámara salina y 3000 horas en cámara de lluvia ácida, ya que son ambientes agresivos con presencia de agentes corrosivos como cloruros o sulfatos, garantizando así una protección tipo barrera al sustrato metálico.

**Figura 20.** Variación de la Fracción Volumétrica absorbida para cada sistema de recubrimiento expuesto en a) Cámara salina a 2000 horas de exposición y b) cámara de lluvia ácida a 3000 horas de exposición.





En la Figura 20 se observa que la cantidad de agua absorbida inicialmente por los recubrimientos se mantiene estable durante todo el tiempo de exposición, comprobando la afirmación de la saturación de los poros nanométricos en el recubrimiento durante las primeras horas y la baja permeabilidad de estos al paso del electrolito. Además, se observa que el sistema S13, fue el de mayor absorción de electrolito en las dos cámaras de ambiente simulado, debido a que este sistema presenta en su acabado nanoporos más grandes y distribuidos comparado con los demás sistemas de recubrimiento. El sistema S16, fue el que presentó menor cantidad de agua absorbida por su baja porosidad. Los resultados de porosidad de los recubrimientos pueden observarse en la Figura 12.

Es importante mencionar que los sistemas de recubrimientos poseen en su primera capa de revestimiento un autoimprimante epóxico con alto porcentaje de sólidos que garantiza una protección de barrera gracias a que posee un alto grado de entrecruzamiento químico que no permite la formación de regiones hidrofílicas [43], de esta manera no hay paso del electrolito por el acabado hacia el sustrato metálico, puesto que en los resultados electroquímicos no se evidencia fenómenos relacionados con la corrosión durante el ciclo de exposición en la interfase metal-recubrimiento.

Para corroborar el ensayo de inspección visual aplicado a cupones fisurados (KIV) se realizó el cálculo de los parámetros estadísticos según los criterios de análisis de varianza y de prueba de Durbin-Waston, el cual se describe en la ecuación (3), los cuales se aprecian en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Datos experimentales obtenidos a partir de pruebas electroquímicas y desprendimiento catódico.

Sistema	Rp (ohms)	Ø	dx/dt	Tiempo de tendencia a fallar (h)
S13	1,16E+09	0,13	0.0023	2294
S14	1,76E+09	0,07	0,0024	2446
S15	1,24E+09	0,06	0,0025	2481
S16	1,13E+09	0,025	0,0028	2524

Físicamente cada uno de estos parámetros calculados representa una función específica; la fracción volumétrica de agua absorbida por el recubrimiento, está ligada con la habilidad de éste a dejar pasar fluidos, por lo tanto, a mayor fracción volumétrica, menor el tiempo de falla del recubrimiento. La velocidad de delaminación o desprendimiento catódico representa el avance del deterioro del recubrimiento, un mayor grado de delaminación indica menor tiempo de falla. La resistencia a la polarización (Rp) está asociada a la transferencia de carga existente en la superficie del sustrato metálico y suele disminuir conforme avanza el tiempo, aunque depende de numerosos factores como la pasivación del sustrato. [44]

En Figura 11 se observa que el S13 presenta fallas a las 2000 horas con un valor de KIV= 36, el cual está por debajo del criterio de aceptación (KIV= 60), indicando que este sistema presenta fallas en su capacidad de protección, sin deterioro completo ya que el valor de KIV no decae a cero. Por medio del análisis de varianza de Durbin-Waston se establece mediante en la ecuación (3), que a partir de las 2294 horas este sistema empieza a fallar, resultado que viene siendo más confiable que

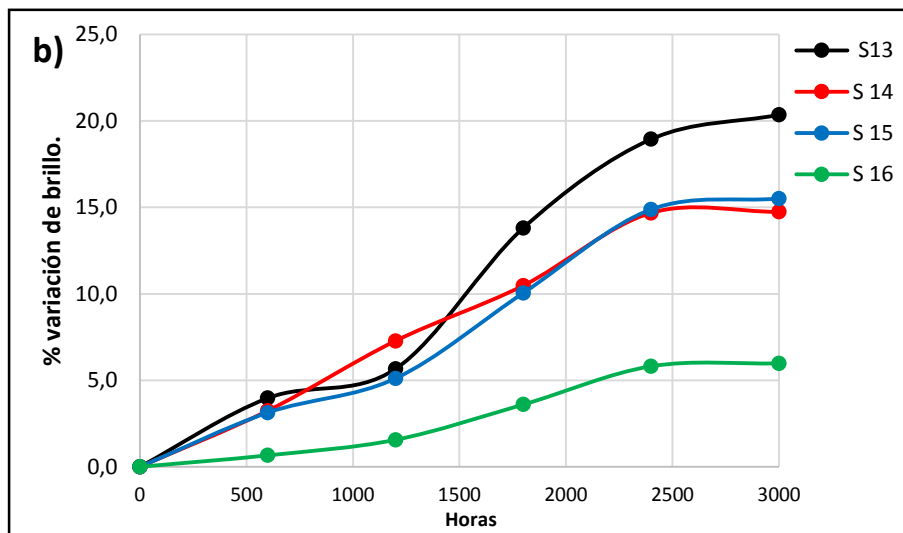
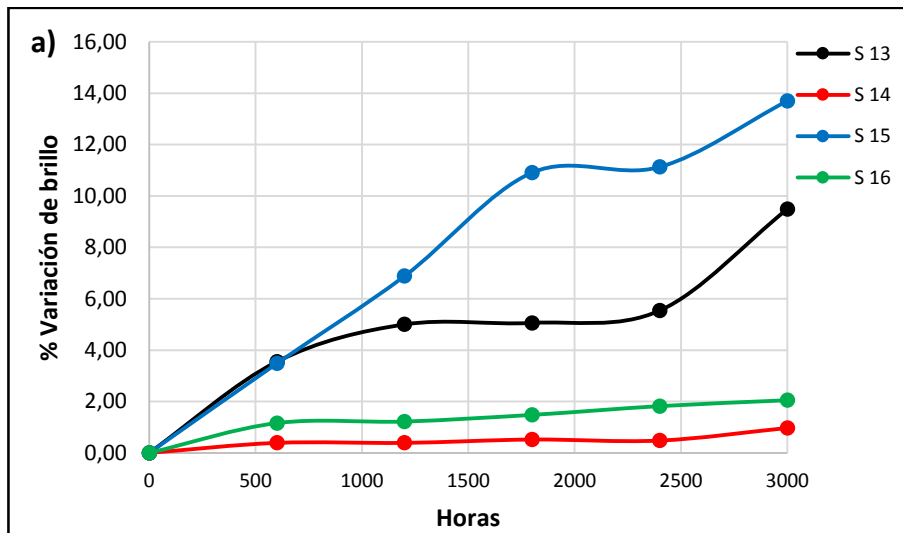
el KIV, debido a que los valores experimentales han sido calculados con un valor mínimo de error en el momento de la simulación. Además también se aprecia que el sistema el S16 posee un valor de  $KIV=76$ ; lo que indica que no hay falla alguna por efecto de la corrosión durante 2000 horas de exposición dato que se puede comprobar con el tiempo obtenido a partir de pruebas electroquímicas, las cuales establecen un tiempo de falla de 2524 horas.

Se comprueba de esta manera que el tiempo en el cual los recubrimientos presentan fallas en su capacidad de protección obtenidos experimentalmente a partir de pruebas electroquímicas son mayores y más confiables que los obtenidos gráficamente por el método de KIV debido a que el KIV es subjetivo y depende de la experiencia empírica de el investigador.

#### **4.6 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÓPTICAS EN LOS SISTEMAS DE RECUBRIMIENTO EXPUESTOS EN CÁMARA DE LLUVIA ÁCIDA Y EN CÁMARA U.V**

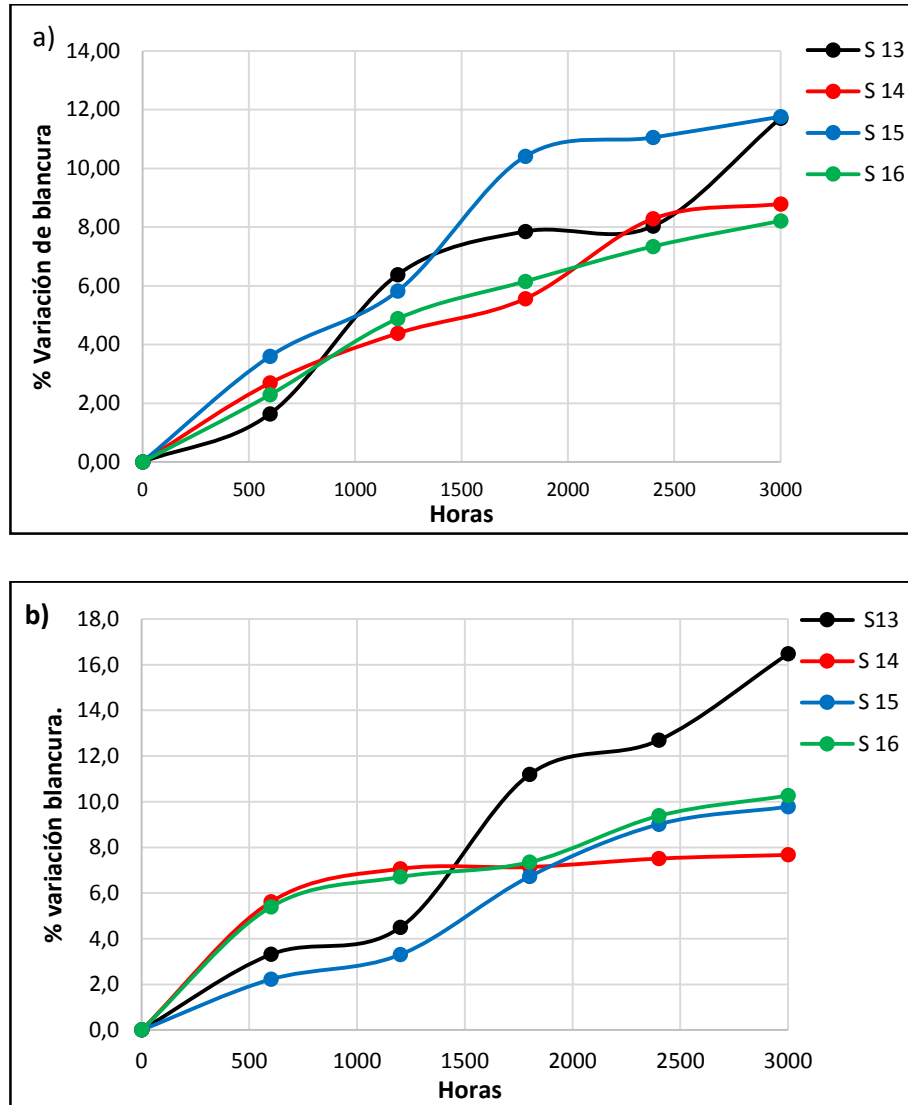
El porcentaje de variación de brillo y color de cada uno de los sistemas de recubrimientos estudiados durante cada tiempo de evaluación en cámara ácida y U.V se observan en las Figuras 21, 22 y 23.

**Figura 21.** Porcentaje de variación del brillo de los sistemas de recubrimiento estudiados durante cada tiempo de evaluación expuestos en a) en cámara de lluvia ácida y b) cámara U.V.

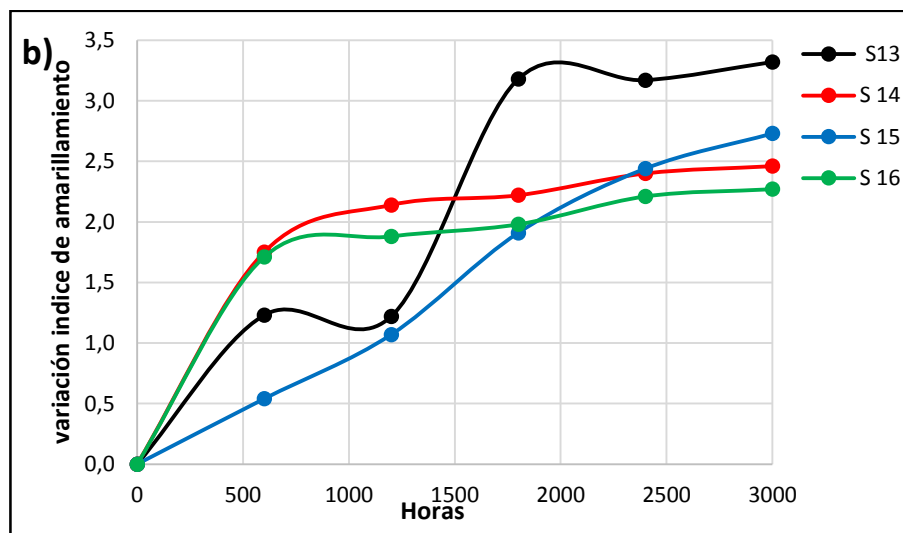
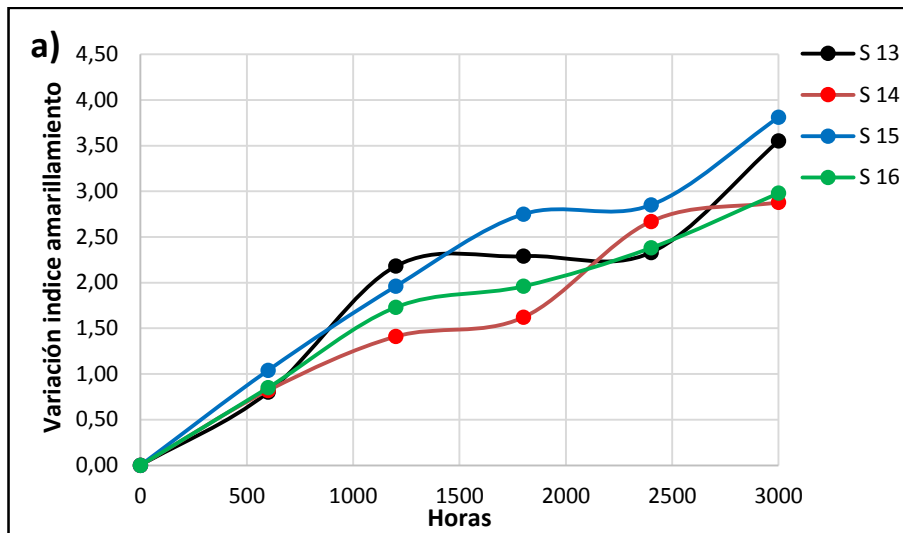


En la Figura 21 se observa que después de 3000 horas de exposición en cámara de lluvia ácida y cámara U.V el brillo de los cuatro sistemas de recubrimientos poliméricos disminuye paulatinamente con el tiempo, por causa de la atmósfera simulada en la que se encontraban expuesto los recubrimientos (ácidos, elevadas temperaturas y rayos U.V). Sin embargo, cumplidas las 3000 horas de exposición, el brillo de los sistemas de recubrimientos S13, S14 y S16 se mantuvo en la escala de superficies altamente brillantes mayor a 70 UB. Para el sistema de recubrimiento S15 después de 2400 horas paso a tener una superficie altamente brillante a semi-brillante de acuerdo a la calificación que da la norma ASTM D523 para recubrimientos poliméricos.

**Figura 22.** Porcentaje de variación de blancura de los sistemas de recubrimiento estudiados durante cada tiempo de evaluación expuestos en a) en cámara de lluvia ácida. b) cámara U.V.



**Figura 23.** Porcentaje de variación del amarillamiento de los sistemas de recubrimiento estudiados durante cada tiempo de evaluación expuestos en. a) en cámara de lluvia ácida y b) cámara U.V.



En las Figuras 22 y 23 se observa que los cuatro sistemas de recubrimientos evaluados presentaron para las dos cámaras, disminución en su blancura y aumentos en su amarillamiento. El sistema S13 fue el que menor retención de blancura y por ende mayor índice de amarillamiento, los valores de color se observan en los Anexos [G y H8]. La variación de esta propiedad se mantuvo entre el 4% y 18%, lo cual indica que el acabado de los cuatro sistemas de recubrimiento no presentaron envejecimiento prematuro por causa de las condiciones agresivas de las cámaras.

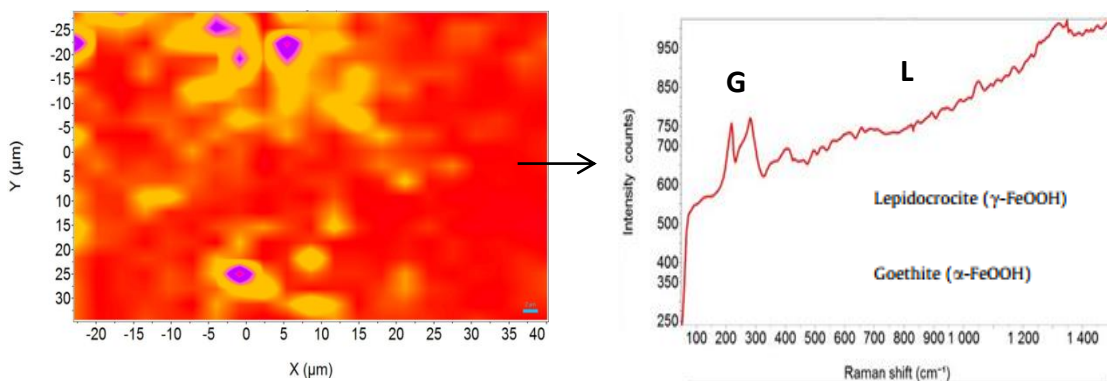
Los sistemas de recubrimientos poliméricos expuestos en campo matuvieron durante 5040 horas una escala de superficies altamente brillantes, indicando altas propiedades de reflexión y menor absorción de rayos U.V. En cuanto a color se presento menor porcentaje variación en comparación a los resultado de las cámaras aceleradas, demostrando con estos resultados que las condiciones de campo fueron menos abrasivas en comparación con las de las cámaras aceleradas. Los valores de brillo y color se aprecian en el Anexo [F,G y H].

El mejor comportamiento tanto en campo como en condiciones aceleradas fue el sistema S16, debido a que presentó mayor retención de brillo, blancura y menor índice de amarillamiento, lo cual indica que el sistema S16 tiene la capacidad de soportar ambientes ácidos, temperaturas elevadas, reflejar los rayos U.V y no absorberlos, por largos periodos de tiempo sin variar sus características ópticas de la superficie.

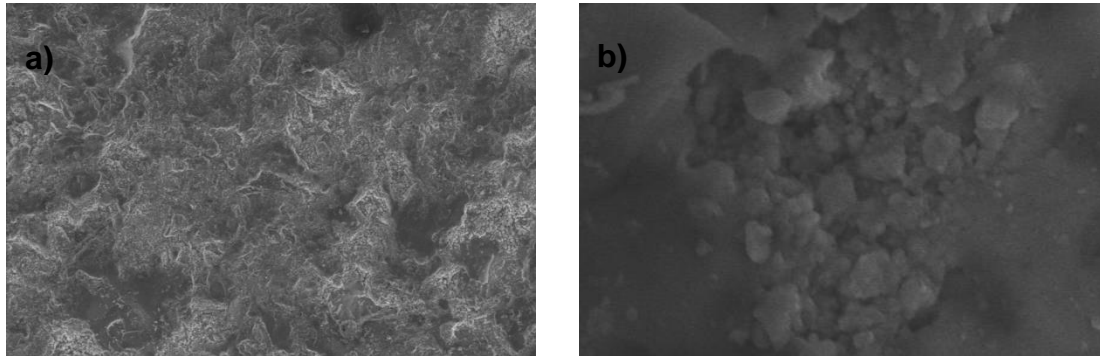
#### 4.7 ESPECTROSCOPIA RAMAN APLICADA EN LA SUPERFICIE METÁLICA DE PROBETAS DESNUDAS EXPUESTAS EN CAMPO CIRA

Por medio de la técnica Raman se pudo visualizar la composición de los óxidos más predominantes en la superficie del sustrato metálico como se aprecia en la Figura 24 y por medio de espectroscopía electrónica de barrido (SEM) la morfología de óxidos formados

**Figura 24.** Espectrómetro de los principales óxidos de hierro formados en la superficie metálica. G: goetitha. L: lepidocrocita.



**Figura 25.** Micrografías SEM de los productos de corrosión de un acero de medio carbono expuesto en la estación de monitoreo Cira a) Láminas de lepidocrocita y b) Estructura acicular fina goethita.



En la Figura 24 se identificó que las fases predominantes después de una exposición de siete meses, son oxihidróxidos férricos amorfos e hidratados y una mezcla de lepidocrocita ( $\gamma$ -FeOOH) y goethita ( $\alpha$ -FeOOH). La lepidocrocita es un compuesto semiconductor, electroquímicamente activo y conocido por no tener propiedades protectoras [46] La goethita es un compuesto termodinámicamente estable que muestra buenas propiedades de protección, especialmente si es en una forma de partículas muy finas [46] este constituyente es el principal responsable de la formación de una capa compacta de productos de corrosión que disminuye en gran medida la corrosión en los aceros [47]. La lepidocrocita aparece como finas láminas y la goethita se muestra en estructuras globulares asemejando bolas de algodón, las cuales se aprecian en la Figura 25.

Se puede correlacionar las composiciones de las capas de herrumbre formadas en dependencia de las condiciones de exposición atmosférica, en particular el tiempo de humectación, la deposición de cloruro y el efecto de los contaminantes sobre la superficie del metal [48].

## 5. CONCLUSIONES

El principal mecanismo de falla de los recubrimientos poliméricos estudiados durante la exposición a un ambiente salino acelerado, es la combinación de la formación de ampollas y avance de la corrosión en la interfase metal recubrimiento, lo cual ocurre siempre y cuando la superficie se encuentre fisurada, de lo contrario estos recubrimientos no presentan daño alguno.

El mayor desprendimiento catódico lo presentó el sistema 16, mientras el menor el sistema 13; evidenciándose la habilidad del imprimante epóxico 82% en sólidos para resistir la delaminación alrededor de las fisuras y como una medida directa de la alta adherencia del recubrimiento al sustrato metálico. Por lo tanto, se concluye que los recubrimientos estudiados son aptos para ser aplicados en el exterior de tuberías, tanques de almacenamiento e infraestructura metálica donde se simulen atmósferas tipo marino-industrial.

Por medio de las pruebas de impedancia electroquímica y ensayos de propiedades ópticas realizados en campo y en cámaras de ambiente simulado, se concluye que el sistema 16, compuesto por un imprimante epóxico 82% en sólidos y un acabado de poliuretano A.R presentó alta resistencia al paso de agentes contaminantes, una menor absorción de electrolito y mayor retención de brillo, blancura y menor índice de Amarillamiento. Por lo tanto, este sistema tiene la capacidad de soportar ambientes salinos, ácidos y radiación ultravioleta constante por largos periodos de tiempo sin variar su resistencia ni características ópticas de la superficie.

Las fases de óxidos predominantes en las probetas desnudas expuestas a 5040 horas en condiciones atmosféricas reales son los oxihidróxidos amorfos o cristalinos tales como lepidocrocita ( $\gamma$ -FeOOH) y goethita ( $\alpha$ -FeOOH). La formación de estos compuestos de herrumbre son dependientes de las condiciones de exposición atmosférica y los tiempos de humedad y secado en esta zona.

## 6. RECOMENDACIONES

Debido al carácter de las cámaras de simulación se recomienda realizar monitorios en la estación en tiempos cortos para poder visualizar una correspondencia entre los comportamientos observados en campo, en cámaras y en pruebas de impedancia electroquímica.

Se recomienda simular con mayor aproximación a las condiciones de campo la exposición de los recubrimientos en las cámaras de laboratorio, mediante la utilización de etapas o ciclos en los que intervengan factores como la lluvia, la humedad, las radiaciones solares y los diferentes contaminantes, los cuales inciden en el desempeño del recubrimiento. Esto permitirá encontrar un factor equivalente o correlación adecuado entre campo y cámaras de simulación.

Se recomienda ejercer un control y un estudio estricto de las condiciones atmosféricas del campo, para así determinar con mayor precisión los elementos que causan la degradación prematura de los recubrimientos expuestos en atmósferas contaminantes.

Utilizar un acero estructural como ASTM A 36 o A 572 para la aplicación de los recubrimientos poliméricos, debido a que estos aceros son los más utilizados por la industria para la fabricación de estructuras metálicas y tanque de almacenamiento. De esta manera obtener resultados óptimos del desempeño de los recubrimientos poliméricos aplicados sobre un acero estructural.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] VANEGAS MONTES, Loria y VILLALBA BOLANO, Wendy Jazmín Mercedes. Identificación del rango de vida útil de recubrimientos orgánicos para control de la corrosión atmosférica en un ambiente industrial. Santander. Universidad Industrial De Santander. Escuela de ingeniería química. 1999. p. 8-9.
- [2] GARCES, Roberto Carlos. Evaluación de la Corrosión atmosférica del acero expuesto en diversas atmósferas. México. Universidad Autónoma Nuevo León. 2002. p. 16-22.
- [3] DENNY A. Jones. Principles and prevention of corrosion. Corrosion in selected corrosive environments. Segunda edición. U.S.A. Prentice-Hall. 1996. ISBN 0-13-359993-0. p. 401
- [4] VESGA LÓPEZ, Luis Ferney. Estudio acerca de los mecanismos de protección contra la corrosión de recubrimientos orgánicos usando espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Santander. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería metalúrgica. 2004. p. 21.
- [5] E, Akbarinezhad; E. M.;Bahremandi, H.R. Faridi y F. Rezae Another approach for ranking and evaluating organic paint coatings via electrochemical impedance spectroscopy. En Corrosion Science. Febrero-2009. Vol 51. p 356.
- [6] NACE. Descripción General de la preparación de la superficie. Programa de certificación de inspectores de recubrimiento. nivel 1.2012 p. 23.
- [7] Greenfield David y Scantlebury David. The Protective action of organic coatings on steel corrosion and protection Centre. {En línea}. {15 febrero de 2015}. Disponible en (<http://www.jcse.org/volume3/paper5/v3p5.php>>).
- [8] MATEUS BARRAGÁN Miguel. Utilización de técnicas electroquímicas aceleradas en el estudio del comportamiento de los recubrimientos orgánicos tipo epóxico aplicados sobre acero al carbono. Santander. Universidad

industrial de Santander. Maestría en ingeniería metalúrgica. Bucaramanga 2004. p. 41-42.

- [9]** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus. ASTM b117. 2011.
- [10]** INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Paints and varnishes determination of resistance to humid atmospheres containing sulfur dioxide. ISO 3231. 1999.
- [11]** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Practice for operating fluorescent ultraviolet (uv) lamp apparatus for exposure of nonmetallic materials. ASTM G154. 2012.
- [12]** CIFUENTES VÉLEZ, Paola y SOTO, Fernando. Evaluación del desempeño de un poliuretano producido a partir de aceite de ricino modificado con glicerol como recubrimiento industrial. Santander. Universidad Industrial De Santander. Escuela de ingeniería química. 2012. p 35.
- [13]** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Method for pull-off strength of coatings using portable adhesion. ASTM D4541.2009.
- [14]** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates. ASTM D5162. 2008.
- [15]** NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Productos afines a sistema de pinturas protectoras y variables de evaluación en campo. NTC 3951. 1996.
- [16]** LÓPEZ TEJED, Rodrigo Nicolás. Evaluación de recubrimientos orgánicos por métodos potenciostaticos. Universidad Nacional Autónoma De México. México DF. 2003. p. 22.23.
- [17]** MATEUS BARRAGÁN, op, cit, p. 39.
- [18]** CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. External fusion bond epoxy coating for steel pipe/ external polyethylene coating for pipe. CSA Z245.20-06/Z245.21-06. 2006.

- [19] GREENFIELD, David y SCANTLEBURY, D. The Protective Action of Organic Coating on Steel. En: The Journal of corrosion science and engineering. Agosto-2000. Vol 3. No 5. ISSN 1466-8858.
- [20] W. SCHWENK, H. LEIDHEISER Jr. Corrosion Control by Organic Coatings Adhesion loss for organic coatings, causes and consequences for corrosion protection. NACE.1981. p. 103–110.
- [21] H. Leidheiser Jr. y W. Wang, Some substrate and environmental influences on the cathodic delamination of organic coatings, J. Coat. En: Technol. 1981. Vol 53. p 77–84.
- [22] A. Leng, H; Streckel, K. Hofmann y M. Stratmann. The delamination of polymeric coatings from steel. Part 3: effect of the oxygen partial pressure on the delamination reaction and current distribution at the metal/polymer interfase. En: Corrosion Science. 1998. Vol 41. p.599-620. ISSN 0010-938.
- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Stets method for analysis of carbon and low-alloy steel by spark atomic emission spectrometry. ASTM 415. 2008.
- [24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Standard Test Methods for microetching metals and alloys. ASTM E-407. 2007.
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Standard guide for preparation of metallographic specimens. ASTM E3-01 2007.
- [26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Nonmagnetic Coatings Applied to a Ferrous Base. ASTM D1186 .1993.
- [27] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Procedimiento para el ensayo en cámara Salina. NTC 1151. 1998.
- [28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Evaluation of painted or coated specimens subjected to corrosive environments. ASTM 1654. 2008.

- [29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Standard Test Method for Specular Gloss. ASTM D523. 2014.
- [30] W. Schwenk. Adhesion loss for organic coatings, causes and consequences for corrosion protection, in: H. Leidheiser Jr. (Ed.) Corrosion Control by Organic Coatings, NACE, 1981, pág. 103–110.
- [31] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD. Standard test methods for rockwell hardness of metallic materials. ASTM E-18. 2008.
- [32] MONTOYA, F.R.; GARCÍA GALVAN, y F.R, JIMENEZ MORALES A. Cathodic delamination study of coatings with and without mechanical defects. En: Corrosion Science. 2014. Vol 82. p. 432–436.
- [33] D, Greenfield y D, Scantlebury. The Protective Action of Organic Coating on Steel. En: Corrosion and Protection Centre, UMIST, PO Box 88 Manchester M60 1QD, UK.2006. p 89.94
- [34] HUICHAO Bi y SYKES, John. Cathodic disbonding of an unpigmented epoxy coating on mild steel under semi- and full-immersion conditions. En: Corrosion Science. 2011. Vol 53. p. 3416–3425.
- [35] POMMERSHEIM, James; NGUYEN, Tinh, Zhang y LIN Changjian. Diffusion at the polymer coating/metal Interfase. En: Journal of Adhesion Science anta technology. Abril-2012. Vol 9. No.7.p 935-951.
- [36] H.R. Faridi, F. Rezaei. E. Akbarinezhad. M. Bahremandy. Another approach for ranking and evaluating organic paint coating via electrochemical impedance spectroscopy. En: Corrosion Science. 2009. Vol 51. p.356-363
- [37] HAMMOUDA, Nadia; CHADLI, Hacène and GUILLEMOT Gildas. The Corrosion Protection Behaviour of Zinc Rich Epoxy Paint in 3% NaCl Solution. En: Advances in Chemical Engineering and Science. 2011. vol 1. p. 51-60.
- [38] LEE, C.C and Masfeld, F. Automatic classification of polymer coating Quality using Artificial Neural Network. En: Corrosion Science. 1999. Vol 41. p.439-461.

- [39] E, Akbarinezhad; M, Bahremandy y H.R Faridi. Another approach for ranking and evaluating organic paint coating via electrochemical impedance spectroscopy. En: Corrosion Science. 2009. Vol 51. p.356-363.
- [40] MATEUS BARRAGÁN. op.cit, p. 58.59
- [41] ESTUPIÑÁN, Hugo; Vásquez, Custodio y Peña Darío. Determinación de la despasivación en varillas de acero de refuerzo en solución poro de agua de mar por medio de técnicas electroquímicas. En: Prospect. Enero - junio de 2011. Vol. 9.No. 1. p. 67-70.
- [42] OLAYA TORRES. Resistencia a la corrosión de recubrimientos orgánicos por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica, Universidad de Bogotá. 2012. p. 43-58.
- [43] VESGA LÓPEZ, 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, Maestría en Ingeniería química. Bucaramanga 2004. p. 53.68.
- [44] GUZMÁN ROSAS, Andrés Alberto y OCAMPO C, Luz Marina. Evaluación de la resistencia a la corrosión del sistema primer epóxico rico en zinc/acabado polisiloxano por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica. En: Dyna. Abril-2011.p 87.96
- [45] GUZMÁN ROSAS, op- cit, p. 35-36
- [46] JAÉN, Juan; IGLESIAS, Josefina y HERNÁNDEZ, Cecilio. Un compendio de estudios de la corrosión atmosférica del acero en panamá. En: Tecnociencia. Vol. 17. Nº 2. 2015. p.56-60.
- [47] CANO, Heidis; NEFF, Delphine y MORCILLO, Manuel. Characterization of corrosion products formed on Ni 2.4 wt%–Cu 0.5 wt%–Cr 0.5 wt% weathering steel exposed in marine atmospheres. En: Corrosion Science. 2014. Vol 87.p.438-451.
- [48] RAMYA, S; TOPPO, Anita y KUMAR DAYAL, Ravin. Laser Raman microscopic studies of passive films formed on type 316LN stainless steels

during pitting in chloride solution. En: Corrosion Science. Mayo- 2010. Vol 52.  
p.456.459.

## BIBLIOGRAFÍA

- APERADOR CHAPARRO, William; ESCOBAR Andrés Felipe y BAUTISTA RUÍZ, Jorge Hernando. Caracterización de recubrimientos a base de poliéster sobre AACLAD2024-T3 mediante pruebas aceleradas de corrosión. En: Guillermo de Ockham. Enero-junio 2011. Vol 9. No 1. p. 93-101. ISSN 1794-192.
- BARSOUKOV, Evgenig y MACDONALD, J Ross. Impedance spectroscopy theory experiment and applications. Corrosion of materials. Segunda edición. Canada. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2005. p.345.
- BEDOYA LORA, Franky Esteban y CALDERÓN GUTIÉRREZ, Jorge Andrés. Análisis de los parámetros determinados por espectroscopia de impedancia electroquímica para la evaluación del desempeño de pinturas. En: Revista colombiana de materiales. 2012. Vol 2.p. 45-54. ISSN 2256-1013.
- NAVARRETE VALLES, Luis Guillermo. Estudio del desprendimiento catódico de recubrimientos orgánicos aplicados en superficies de acero. Piura. Universidad de Piura. Facultad de ingeniería industrial.2008. p. 24.
- RAMIREZ REYES, José Luis; MALO TAMAÑO, José y CHAVARIN, Uruchurtu. Aplicación de un método electroquímico rápido para evaluar sistemas de recubrimiento con pigmento inhibidor. En: Bol Soc Química, México. 2010. Vol. 6.p. 1-7. ISSN 1870-1809.
- ROSA LUGO, Jacinto Rafael. Estudio de la velocidad de corrosión en acero estructural ASTM A-36 con recubrimiento orgánico, empleando espectroscopia de impedancia electroquímica. Cumaná. Universidad De Oriente Núcleo De Sucre. Escuela de ciencias, Departamento de física. 2012. p.42.
- SYED, Sabir. Atmospheric corrosion of materials. En: Emirates Journal for engineering research. 2006. Vol 11, No 1. p.34-58.

## ANEXOS

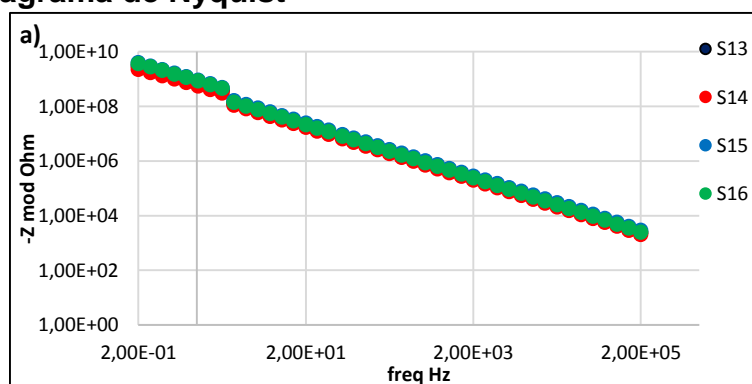
**A. Factor de zona establecido en la norma NTC 3951[24] y fundamentado con la norma ASTM D1654 [35] y Datos obtenidos por el ensayo de inspección visual aplicado a cupones fisurados KIV**

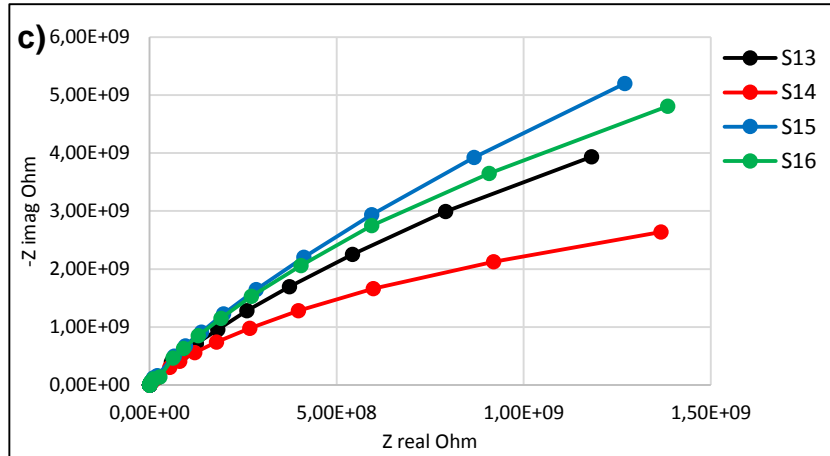
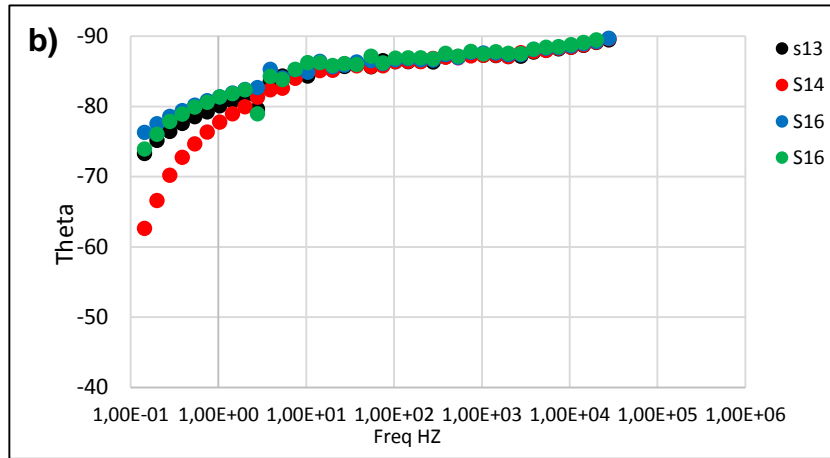
<b>Clasificación de acuerdo a la norma ASTM D1654 (milímetros)</b>	<b>Clasificación de acuerdo a la norma ASTM D1654 (Pulgadas)</b>	<b>Factor de Zona (Fz) de acuerdo a la norma NTC 3951</b>
Cero	0	0
Sobre 0 a 0.5	0 a 1/64	1
Sobre 0.5 a 1.0	1/64 a 1/32	2
Sobre 1.0 a 2.0	1/32 a 1/16	3
Sobre 2.0 a 3.0	1/16 a 1/8	4
Sobre 3.0 a 5.0	1/8 a 3/16	5
Sobre 5.0 a 7.0	3/16 a 1/4	6
Sobre 7 a 10.0	1/4 a 3/8	7
Sobre 10.0 a 13.0	3/8 a 1/2	8
Sobre 13.0 a 16.0	1/2 a 5/8	9
Sobre 16.0 a mas	5/8 a mas	10

<b>S13</b>				
<b>TIEMPO (hr)</b>	<b>Fz</b>	<b>Ft</b>	<b>Fd</b>	<b>KIV</b>
0	0	0	0	100
500	3	0,5	0,5	94
1000	4	1	1	84
1500	7	2	1	60
2000	8	3	1	36

S14				
TIEMPO (hr)	Fz	Ft	Fd	KIV
0	0	0	0	100
500	3	1	0,5	91
1000	3	1	1,5	85
1500	5	2	1,5	65
2000	6	2	1,5	58
S15				
TIEMPO (hr)	Fz	Ft	Fd	KIV
0	0	0	0	100
500	3	0,5	0,5	94
1000	4	1	0,5	88
1500	4	1,5	1	80
2000	5	2	1,5	65
S16				
TIEMPO (hr)	Fz	Ft	Fd	KIV
0	0	0	0	100
500	2	0,5	0,5	96
1000	2	1	0,5	94
1500	3	1	1,5	85
2000	4	1,5	1,5	76

B. Espectros de impedancia electroquímica para los recubrimientos orgánicos expuestos en la estación de monitoreo en campo Cira. Durante 7 meses. a) Diagrama de Bode c) Diagrama del ángulo de fase y c) Diagrama de Nyquist





**C. Resultados de impedancia electroquímica para recubrimientos expuestos en cámara salina.**

S13							
TIEMPO (hr)	OCP (V)	Rsol ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	Rpo ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CPE ( $\text{S}/\text{cm}^2$ )	$\eta$	Rp ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$\Phi$
0	-0,08	4,64	3,13E+09	2,680E-10	0,97	3,13E+09	
500	0,441	5,007	1,800E+09	4,417E-10	0,96	1,800E+09	0,11401
1000	-0,11	4,94	1,706E+09	4,388E-10	0,97	1,706E+09	0,11250
1500	-0,1	4,71	1,387E+09	4,643E-10	0,96	1,387E+09	0,12539
2000	0,03	4,44	1,164E+09	4,725E-10	0,96	1,164E+09	0,12939

S14							
TIEMPO (hr)	OCP (V)	Rsol ( $\Omega.cm^2$ )	Rpo ( $\Omega.cm^2$ )	CPE (S/cm <sup>2</sup> )	$\eta$	Rp ( $\Omega.cm^2$ )	$\Phi$
0	-0,27	3,56	2,62E+09	3,63E-10	0,96	2,62E+09	
500	0,01	4,32	1,721E+09	4,944E-10	0,96	1,721E+09	0,07049
1000	-0,43	3,15	1,806E+09	5,032E-10	0,96	1,806E+09	0,07452
1500	0,83	5,32	1,565E+09	5,032E-10	0,96	1,565E+09	0,07452
2000	0,23	4,94	1,756E+09	4,965E-10	0,97	1,756E+09	0,07146
S15							
TIEMPO (hr)	OCP (V)	Rsol ( $\Omega.cm^2$ )	Rpo ( $\Omega.cm^2$ )	CPE (S/cm <sup>2</sup> )	$\eta$	Rp ( $\Omega.cm^2$ )	$\Phi$
0	-0,20	4,70	2,31E+09	2,85E-10	0,97	2,31E+09	
500	-0,34	4,48	1,247E+09	4,435E-10	0,97	1,247E+09	0,05731
1000	0,46	5,03	1,327E+09	4,362E-10	0,97	1,327E+09	0,05352
1500	0,32	3,8	1,269E+09	4,447E-10	0,97	1,269E+09	0,05792
2000	-0,3	5,03	1,240E+09	4,432E-10	0,97	1,240E+09	0,05715
S16							
TIEMPO (hr)	OCP (V)	Rsol ( $\Omega.cm^2$ )	Rpo ( $\Omega.cm^2$ )	CPE (S/cm <sup>2</sup> )	$\eta$	Rp ( $\Omega.cm^2$ )	$\Phi$
0	1,64	5,03	1,80E+09	2,97E-10	0,97	1,80E+09	
500	-0,13	5,93	1,308E+09	3,569E-10	0,97	1,308E+09	0,04200
1000	0,63	6,34	1,101E+09	3,507E-10	0,95	1,101E+09	0,03800
1500	-0,55	5,1	1,139E+09	3,567E-10	0,97	1,139E+09	0,04187
2000	-0,06	5,88	1,132E+09	3,310E-10	0,97	1,132E+09	0,02481

**D. Resultados de impedancia electroquímica para recubrimientos expuestos en cámara de lluvia ácida.**

S13							
TIEMPO (hr)	OCP (V)	Rsol ( $\Omega.cm^2$ )	Rpo ( $\Omega.cm^2$ )	CPE (S/cm <sup>2</sup> )	$\eta$	Rp ( $\Omega.cm^2$ )	$\Phi$
0	-0,08	4,64	2,13E+09	2,680E-10	0,97	2,13E+09	
600	-0,33	4,97	1,21E+09	4,85E-10	0,96	1,21E+09	0,1354
1200	-0,06	4,35	1,23E+09	4,72E-10	0,96	1,23E+09	0,1290
1800	-0,17	4,96	1,11E+09	4,60E-10	0,96	1,11E+09	0,1231
2400	-0,08	3,39	1,03E+09	4,56E-10	0,96	1,03E+09	0,1212
3000	-0,25	4,39	1,22E+09	4,50E-10	0,97	1,22E+09	0,1180

S14							
TIEMPO (hr)	OCP (mV)	Rsol ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	Rpo ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CPE (S/cm <sup>2</sup> )	$\eta$	Rp ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$\Phi$
0	-0,27	3,56	3,32E+09	3,63E-10	0,96	3,32E+09	
600	-0,206	4,280	2,43E+09	6,06E-10	0,94	2,43E+09	0,11686
1200	-0,3017	3,67	2,22E+09	5,49E-10	0,97	2,22E+09	0,09456
1800	-0,2526	3,86	2,05E+09	5,35E-10	0,97	2,05E+09	0,08854
2400	-0,355	4,45	2,17E+09	5,25E-10	0,96	2,17E+09	0,08428
3000	-0,2842	4,18	1,60E+09	4,96E-10	0,97	1,60E+09	0,07123
S15							
TIEMPO (hr)	OCP (V)	Rsol ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	Rpo ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CPE (S/cm <sup>2</sup> )	$\eta$	Rp ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$\Phi$
0	-0,20	4,70	2,81E+09	2,85E-10	0,97	2,81E+09	
600	-0,036	5,07	2,479E+09	3,887E-10	0,97	2,479E+09	0,07081
1200	0,02	6,13	2,611E+09	3,980E-10	0,97	2,611E+09	0,07620
1800	0,28	5,88	2,493E+09	3,982E-10	0,97	2,493E+09	0,07632
2400	-0,09	5,36	1,788E+09	3,918E-10	0,97	1,788E+09	0,07262
3000	0,18	5,53	1,536E+09	3,915E-10	0,96	1,536E+09	0,07245
S16							
TIEMPO (hr)	OCP (V)	Rsol ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	Rpo ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CPE (S/cm <sup>2</sup> )	$\eta$	Rp ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$\Phi$
0	1,64	5,03	2,24E+09	2,97E-10	0,97	2,24E+09	
600	0,31	5,13	2,203E+09	3,962E-10	0,97	2,203E+09	0,06583
1200	1,71	5,64	2,031E+09	3,977E-10	0,97	2,031E+09	0,06670
1800	-0,80	6,98	1,757E+09	3,862E-10	0,97	1,757E+09	0,06000
2400	-0,16	5,16	1,640E+09	3,752E-10	0,95	1,640E+09	0,05341
3000	-0,32	4,64	1,39E+09	3,64E-10	0,96	1,39E+09	0,04668

**E. Datos de impedancia electroquímica para campo, estación de monitoreo en campo**

7 MESES DE EXPOSICIÓN						
SISTEMA	OCP (V)	Rsol ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	Rpo ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CPE (S/cm <sup>2</sup> )	$\eta$	Rp ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
S13	-0,09	4,46	1,189E+09	4,552E-10	0,97	1,189E+09
S14	0,13	3,820	8,09E+08	5,32E-10	0,97	8,09E+08
S15	-0,54	5,38	1,85E+09	3,70E-10	0,97	1,85E+09
S16	-0,81	4,66	1,14E+09	4,20E-10	0,97	1,14E+09

**F. Datos obtenidos por la aplicación de técnicas de Brillo y Color para recubrimientos expuestos en la estación de monitoreo instalado en campo Cira**

<b>S-13</b>			
	BRILLO	Wi	Yi
0 Horas	84,125	86,48	0,28
5040 Horas	79,075	80,53	1,89
Variación	6,00%	6,88%	1,61
<b>S-14</b>			
	BRILLO	Wi	Yi
0 Horas	82,975	88,43	1,9
5040 Horas	80,05	84,67	2,2425
Variación	3,53%	4,25%	0,34
<b>S-15</b>			
	BRILLO	Wi	Yi
0 Horas	78,05	86,215	2,0825
5040 Horas	75,95	76,35	3,47
Variación	2,69%	11,44%	1,39
<b>S-16</b>			
	BRILLO	Wi	Yi
0 Horas	87,575	89,365	0,025
5040 Horas	85,8	84,4	1,81
Variación	2,03%	5,56%	1,79

**G. Datos obtenidos por la aplicación de técnicas de Brillo y Color para recubrimientos expuestos en cámara de Lluvia ácida.**

<b>SISTEMAS</b>						
<b>S13-1CA</b>						
	BRILLO	%Variación Brillo	Wi	%Variación Wi	Yi	Variación Yi
<b>0 h</b>	83,42	0,00	86,52	0,00	0,36	0,00
<b>600 h</b>	80,46	3,55	85,10	1,64	1,15	0,80
<b>1200 h</b>	79,25	5,00	81,00	6,38	2,54	2,18
<b>1800 h</b>	79,20	5,06	79,73	7,85	2,65	2,29

<b>2400 h</b>	78,80	5,54	79,57	8,03	2,69	2,33
<b>3000 h</b>	75,50	9,49	76,39	11,71	3,91	3,55
<b>S14-1CA</b>						
	<b>BRILLO</b>	<b>%Variación Brillo</b>	<b>Wi</b>	<b>%Variación Wi</b>	<b>Yi</b>	<b>Variación Yi</b>
<b>0 h</b>	82,80	0,00	84,71	0,00	2,09	0,00
<b>600 h</b>	82,48	0,39	82,43	2,69	2,91	0,82
<b>1200 h</b>	82,48	0,39	81,00	4,38	3,50	1,41
<b>1800 h</b>	82,37	0,52	80,00	5,56	3,70	1,62
<b>2400 h</b>	82,40	0,48	77,70	8,28	4,76	2,67
<b>3000 h</b>	82,00	0,97	77,26	8,79	4,97	2,88
<b>S15-1CA</b>						
	<b>BRILLO</b>	<b>%Variación Brillo</b>	<b>Wi</b>	<b>%Variación Wi</b>	<b>Yi</b>	<b>Variación Yi</b>
<b>0 h</b>	77,64	0,0	86,45	0,0	2,01	0,0
<b>600 h</b>	74,94	3,48	83,34	3,60	3,05	1,04
<b>1200 h</b>	72,30	6,88	81,42	5,82	3,97	1,96
<b>1800 h</b>	69,17	10,91	77,45	10,41	4,75	2,75
<b>2400 h</b>	69,00	11,13	76,90	11,05	4,86	2,85
<b>3000 h</b>	67,00	13,70	76,28	11,76	5,82	3,81
<b>S16-1CA</b>						
	<b>BRILLO</b>	<b>%Variación Brillo</b>	<b>Wi</b>	<b>%Variación Wi</b>	<b>Yi</b>	<b>Variación Yi</b>
<b>0 h</b>	87,90	0,0	89,33	0,0	0,15	0,0
<b>600 h</b>	86,88	1,16	87,28	2,29	1,00	0,85
<b>1200 h</b>	86,83	1,22	84,97	4,88	1,88	1,73
<b>1800 h</b>	86,60	1,48	83,84	6,15	2,11	1,96
<b>2400 h</b>	86,30	1,82	82,77	7,34	2,53	2,38
<b>3000 h</b>	86,10	2,05	82,00	8,21	3,13	2,98

**H. Datos obtenidos por la aplicación de técnicas de Brillo y Color para recubrimientos expuestos en cámara U.V**

<b>S13-1CA</b>						
	<b>BRILLO</b>	<b>%Variación Brillo</b>	<b>Wi</b>	<b>%Variación Wi</b>	<b>Yi</b>	<b>Variación Yi</b>
<b>0 h</b>	85,12	0,00	86,92	0,00	-0,68	0,00
<b>600 h</b>	81,74	3,97	84,04	3,31	0,55	1,23
<b>1200 h</b>	80,30	5,66	83,02	4,49	0,54	1,22
<b>1800 h</b>	73,37	13,81	77,19	11,19	2,50	3,18
<b>2400 h</b>	69,00	18,94	75,89	12,69	2,49	3,17
<b>3000 h</b>	67,80	20,35	72,60	16,47	2,64	3,32
<b>S14-1CA</b>						
	<b>BRILLO</b>	<b>%Variación Brillo</b>	<b>Wi</b>	<b>%Variación Wi</b>	<b>Yi</b>	<b>Variación Yi</b>
<b>0 h</b>	82,10	0,00	88,81	0,00	0,74	0,00
<b>600 h</b>	79,44	3,24	83,83	5,61	2,49	1,75
<b>1200 h</b>	76,13	7,28	82,54	7,06	2,88	2,14
<b>1800 h</b>	73,50	10,48	82,47	7,14	2,95	2,22
<b>2400 h</b>	70,05	14,68	82,14	7,51	3,14	2,40
<b>3000 h</b>	70,00	14,74	82,00	7,67	3,20	2,46
<b>S15-1CA</b>						
	<b>BRILLO</b>	<b>%Variación Brillo</b>	<b>Wi</b>	<b>%Variación Wi</b>	<b>Yi</b>	<b>Variación Yi</b>
<b>0 h</b>	79,30	0,0	87,80	0,0	1,04	0,0
<b>600 h</b>	76,82	3,13	85,85	2,22	1,58	0,54
<b>1200 h</b>	75,25	5,11	84,90	3,30	2,11	1,07
<b>1800 h</b>	71,33	10,05	81,90	6,72	2,95	1,91
<b>2400 h</b>	67,50	14,88	79,89	9,01	3,48	2,44
<b>3000 h</b>	67,00	15,51	79,21	9,78	3,77	2,73
<b>S16-1CA</b>						
	<b>BRILLO</b>	<b>%Variación Brillo</b>	<b>Wi</b>	<b>%Variación Wi</b>	<b>Yi</b>	<b>Variación Yi</b>
<b>0 h</b>	88,28	0,0	90,27	0,0	0,27	0,0
<b>600 h</b>	87,70	0,66	85,40	5,39	1,97	1,71
<b>1200 h</b>	86,90	1,56	84,23	6,70	2,15	1,88
<b>1800 h</b>	85,10	3,60	83,63	7,35	2,25	1,98
<b>2400 h</b>	83,15	5,81	81,81	9,38	2,48	2,21
<b>3000 h</b>	83,00	5,98	81,00	10,27	2,54	2,27

