

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE  
SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS DE BASE  
EPÓXICA RICA EN ZINC

DANIEL HERNANDO BERMÚDEZ RENDÓN

EDDY ALFONSO TORRES MURGAS

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

2016

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE  
SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS DE BASE  
EPÓXICA RICA EN ZINC

DANIEL HERNANDO BERMÚDEZ RENDÓN

EDDY ALFONSO TORRES MURGAS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
METALÚRGICO

DIRECTOR

DARIO YESID PEÑA BALLESTEROS  
Ph. D CORROSION AND PROTECTION

CO-DIRECTOR

CÉSAR AUGUSTO LÓPEZ R.  
QUIMICO EN RECUBRIMIENTOS I+D

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

2016

## DEDICATORIAS

A Dios el centro de todo, el pilar de nuestro propósito en esta vida, la guía y la luz en momentos de penumbra.

A nuestros padres que con su sacrificio, confianza y apoyo nos han mantenido en este sueño.

A nuestros compañeros los cuales de alguna u otra forma colaboraron en la culminación de este proyecto.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, Facultad Físico-Química, Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Al Doctor Dario Yesid Peña Ballesteros, por la confianza depositada en nosotros en la realización de este trabajo y por su acompañamiento indispensable en cada paso para la realización de este.

Al Grupo de Investigación en Corrosión GIC, por ser parte esencial en este proyecto.

Agradecemos al Laboratorio de Microscopia de la Universidad Industrial de Santander-Parque Tecnológico de Guatigará y su personal, por el servicio de microscopia suministrado para la adquisición de datos.

Al Ingeniero Cesar Augusto López R, por el acompañamiento, confianza y contribución a este proyecto.

A la empresa CIMA, y en especial al gestor de proyectos Ing. Carlos Javier Mateus por sus aportes a este proyecto.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	16
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	19
3 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	21
3.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	21
3.2 EVALUACION EN CÁMARAS DE CORROSION ACELERADA.....	23
3.2.1 Cámara de niebla salina .....	24
3.2.2 Cámara de lluvia acida.....	24
3.3 INSPECCIÓN VISUAL Y KIV.....	24
3.4 DESPRENDIMIENTO CATÓDICO.....	24
3.5 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.....	24
4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	26
4.1 EVALUACIÓN DE INSPECCIÓN VISUAL Y KIV.....	26
4.1.1 Grado de ampollamiento.....	27
4.1.2 Productos de corrosión.....	27
4.1.3 Daños por delaminación.....	29
4.1.4 Cuantificación de daño, factor KIV.....	30
4.2 DESPRENDIMIENTO CATÓDICO.....	31
4.3 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.....	34
4.3.1 Circuito equivalente.....	36

CONCLUSIONES.....40

RECOMENDACIONES..... 42

REFERENCIAS.....43

BIBLIOGRAFIA.....47

ANEXOS.....49

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química del acero.....	22
Tabla 2. Esquemas de recubrimientos.....	23
Tabla 3. Criterio de aceptación prueba desprendimiento catódico.....	25
Tabla 4. Resultados obtenidos en la prueba después de 24 hr de exposición.....	31
Tabla 5. Diagramas de bode para los diferentes sistemas de recubrimientos.....	35

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Espectro de impedancia. Clasificación de recubrimientos.....	21
Figura 2. Micrografía acero al carbono.....	22
Figura 3. Esquema de recubrimientos.....	23
Figura 4. Montaje experimental, desprendimiento catódico. GIC. UIS.....	25
Figura 5. Montaje experimental espectroscopia de impedancia electroquímica....	26
Figura 6. Variación del tamaño y la frecuencia del ampollamiento.....	27
Figura 7. Ampolla osmótica en recubrimiento S8 a 2000 hr de exposición.....	28
Figura 8. Variación grado de oxidación y productos de corrosión.....	29
Figura 9. Variación de la longitud de daño por delaminación.....	30
Figura 10. Comportamiento factor KIV ampollamiento en cupones fisurados.....	31
Figura 11. Desprendimiento del recubrimiento pasadas las 24 hr de exposición...	32
Figura 12. Ampollamiento e inspección de perforaciones.....	33
Figura 13. Ruta sugerida para la migración de iones.....	34

Figura 14. Circuito equivalente usado para simular los datos experimentales.....36

Figura 15. Elementos simulados por medio de circuito equivalente.....37

Figura 16. Fracción de agua absorbida.....39

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Inspección visual.....	49
Anexo B. Factor de cuantificación de daño KIV norma NTC 3951.....	51
Anexo C. Tamaño de poro.....	54
Anexo D. Diagramas de Bode. Cámara de lluvia acida.....	57
Anexo E. Diagramas de Nyquist. Cámara salina.....	61

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS DE BASE EPÓXICA RICA EN ZINC\*

**AUTORES:** BERMÚDEZ RENDON, DANIEL HERNANDO\*\*  
TORRES MURGAS, EDDY ALFONSO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Corrosión, impedancia, factor de cuantificación de daño, ampollamiento, delaminación catódica, epóxico rico en zinc.

**DESCRIPCIÓN:** En este trabajo fue evaluado el comportamiento de tres sistemas de recubrimientos comerciales de base epóxica rica en zinc sobre láminas de acero al carbono, por medio de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y desprendimiento catódico, más un acompañamiento por inspección visual basadas en las normas ASTM: D714, D1654, D610 y el factor de cuantificación de daño KIV NTC 3951. Los sistemas de recubrimientos contemplados en el estudio fueron: sistemas tricapas con imprimante epoxi rico zinc, barrera epóxica poliamida y tres esmaltes diferentes poliuretano, polisiloxano y poliaspartico, expuestas a ensayos de corrosión acelerada en cámaras: de niebla salina por 2000 horas y de lluvia acida por 3000 horas.

Estas probetas se evaluaron cada 500 y 600 horas por medio de EIS y simulando los resultados mediante circuitos eléctricos equivalentes en el software libre Zplot/Zview 3.5A, además de agrupar los datos obtenidos por inspección visual en un valor de cuantificación de daño (KIV) para las probetas expuestas a cámara de niebla salina fisuradas tipo "V". Al final de la prueba se realizó microscopía electrónica de barrido para ver la superficie del recubrimiento e inferir sobre las causas generadoras de los procesos corrosivos. Los esquemas de recubrimiento tuvieron durante el tiempo de evaluación un comportamiento excelente con altas resistencias de película, manteniendo sus valores sobre el criterio de aceptación mencionadas en las normas y un comportamiento capacitivo a lo largo de la prueba.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Dario Yesid Peña Ballesteros. Cesar Augusto Lopez R.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF CORROSION RESISTANCE POLYMER COATINGS SYSTEMS OF EPOXY BASE RICH IN ZINC\*.

**AUTHORS:** BERMÚDEZ RENDON, DANIEL HERNANDO\*\*  
TORRES MURGAS, EDDY ALFONSO\*\*

**KEYWORDS:** Corrosion, impedance, quantification of damage factor, blistering, cathodic delamination, epoxy rich in Zinc.

**DESCRIPTION:** In this work was evaluated the behavior of three commercial coatings systems of epoxy base rich in zinc on carbon steels sheets by electrochemical impedance spectroscopy technique (EIS) and cathodic disbondment, plus a visual inspection accompaniment based on ASTM: D714, D1654, D610 and the damage quantification factor KIV standard NTC 3951. Coatings systems covered in the study were: Trilayers systems with epoxy primer rich in zinc, polyamide epoxy barrier and three different enamels: polyurethane, polysiloxane and polyaspartic, exposed to accelerated corrosion testing chambers: of salt fog for 2000 hours and acid rain for 3000 hours.

These specimens were evaluated every 500 to 600 hours by EIS and simulating the results by means of equivalent electrical circuits using free software Zplot/Zview 3.5 A, in addition to group data obtained by visual inspection at a value of quantification of damage (KIV) for specimens exposed to salt fog chamber fissured type "V". At the end is performed the scanning electron microscopy test to look the surface coating and infer about the generating causes of corrosive processes. Coating schemes had an excellent performance during the evaluation time with high resistances film, keeping their values on the acceptance criteria mentioned in the norms and a capacitive behavior throughout the test.

---

\*Bachelor Thesis.

\*\*Faculty Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Dario Yesid Peña Ballesteros. Cesar Augusto Lopez R.

## INTRODUCCIÓN

La corrosión es un fenómeno que ha de tratarse de evitar en cualquier tipo de industria, ya que puede ocasionar graves pérdidas económicas. Un método reiterativo en la disminución de daños por corrosión es el uso de recubrimientos sobre aquellas superficies que se podrían ver afectadas. [1] Infraestructuras de almacenamiento, transporte y procesamiento de fluidos y materia implican una gran inversión, por ende se prioriza en la supervisión y protección de la manera más eficiente y rentable.

Con el progresivo avance de la industria de las pinturas se han generado gran diversidad de recubrimientos y esquemas de recubrimientos [2] con el fin de optimizar sus propiedades y mejorar la protección sobre los sustratos. La aplicación de pinturas epóxicas ricas de zinc sobre sustratos metálicos se han destacado como una solución eficiente en la protección y resistencia a la corrosión, utilizadas frecuentemente en medios agresivos tales como el agua de mar y entornos industriales. [3]

Un ejemplo de la afectación que tiene la industria y sus estructuras metálicas por acción de la corrosión, es la industria petrolera. La emisión de agentes acidificantes a la atmosfera hace que esta se vuelva más agresiva al contacto con el material metálico y así aumentar la velocidad de los procesos corrosivos, conllevando a la degradación prematura de los sistemas de recubrimientos usualmente utilizados para la protección de la infraestructura metálica.

El estudio e implementación de nuevos esquemas de recubrimientos abordan la temática de protección contra la corrosión, con el fin de solucionar las fallas prematuras y tener una vida en operación más larga. Una forma de estudiar la resistencia de estos esquemas es evaluándolos mediante pruebas de corrosión

aceleradas como lo son, la cámara de niebla salina y la de lluvia acida; de esta forma poder ver el comportamiento de éstos en ambientes agresivos, obteniendo un indicio de su eficiencia y desempeño al ponerse en funcionamiento.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la resistencia a la corrosión de sistemas de recubrimientos poliméricos de base epóxica rica en zinc por medio de espectroscopia de impedancia electro química.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la integridad de recubrimientos poliméricos de base epóxica rica en zinc en ambientes corrosivos: cámara salina y cámara de lluvia acida; por medio de inspección visual bajo las normas ASTM: D714, D1654, D610 y el factor de cuantificación de daño KIV NTC 3951
- Evaluar el desempeño de los sistemas de recubrimientos poliméricos ricos en zinc sometidos a cámaras de corrosión acelerada por medio de EIS: resistencia al poro y capacitancia.
- Seleccionar un circuito eléctrico adecuado capaz de describir el mecanismo corrosivo sobre los sistemas de recubrimientos base epóxica rica en zinc a partir de los datos experimentales.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

La corrosión puede ser definida como la destrucción o deterioro continuo a través del tiempo de un material, debido a una reacción química o electroquímica con el medio donde se encuentra trabajando el material en cuestión, abandonando el estado de transformación al que el hombre lo sometió para regresar a su estado natural.[4] En particular la corrosión metálica es un proceso electroquímico que involucra cuatro elementos importantes: la reacción anódica, la reacción catódica, los caminos conductores para los iones y electrones. La inhibición de las reacciones anódicas y catódicas o una interrupción en el flujo iónico causa disminución significativa de la velocidad de corrosión. [5]

Entre los métodos de protección se cuenta con la protección catódica y anódica, inhibidores de corrosión y recubrimientos. Siendo, los recubrimientos orgánicos los más utilizados por sus bajos costos y fácil aplicación que por su efecto sinérgico influyen en la durabilidad del acero (mayor tiempo de vida). [6][7] Un recubrimiento polimérico puede ser definido como un material líquido, compuesto esencialmente de resinas, pigmentos y solventes. [2] aplicados sobre un sustrato metálico para la formación de una película sólida y continua, permitiendo la reduciendo en la transferencia o penetración de iones y el contacto electrolito - sustrato. [8]

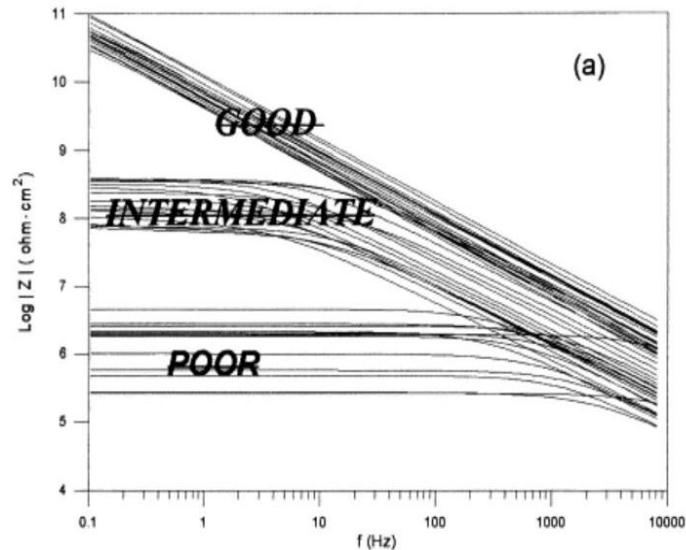
Eventualmente al estar un recubrimiento en operación este está expuesto a diversos daños, los cuales pueden dividirse en dos grupos: prematuros y graduales. El deterioro gradual se presenta progresivamente con el tiempo de servicio y probablemente al ocurrir ya el usuario haya recibido los beneficios del sistema. Las fallas prematuras son más importantes, las cuales ocurren en días, semanas o meses después de la aplicación. [2] El ampollamiento y la delaminación son fallas influyentes sobre el mal funcionamiento de sistema recubrimiento sustrato; considerando que la formación de ampollas son el resultado de la conductividad iónica del recubrimiento, enfatizado en tres tipos de

ampollamiento: osmótico, catódico y anódico. [9] [2] Por otra parte la delaminación es un proceso originado debido a la alcalinización en la interface metal-recubrimiento (como el ampollamiento catódico) producido por la actividad catódica bajo el recubrimiento. [9] La delaminación catódica comienza en sitios con defectos bien definidos de la interface recubrimiento-metal por la acción de esfuerzos eléctricos sobre un electrolito conductor. [2][10]

En el estudio del comportamiento anticorrosivo y protector de los recubrimientos en el tiempo, las pruebas de corrosión aceleradas (cámara de niebla salina y lluvia acida) acompañadas de pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica y chequeos visuales proporcionan la información necesaria para conocer los mecanismos de degradación, además de los cambios en el sistema recubrimiento metal. [7] [11]

Para el caso de metales pintados el espectro de impedancia se caracteriza por cierta variedad de respuestas, representadas usualmente en dos tipos diferentes de diagramas, llamados Nyquist y Bode. En la interpretación del diagrama de bode es posible obtener una clasificación del tipo de recubrimiento y su eficiencia al medir su comportamiento por medio de la resistividad eléctrica de este. Recubrimientos que tengan valores de resistencia superiores a  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$  se pueden clasificar como de excelente protección, mientras que aquellos que tengan valores por debajo de  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$  se clasifican como de pobre protección. (Figura 1).

**Figura 1.** Espectro de impedancia teórico utilizado para clasificación de recubrimiento en buena, intermedia y mala calidad.



Fuente: [12]

Los datos de impedancia de un sistema recubrimiento-sustrato encontrados experimentalmente pueden ser susceptibles a un análisis por medio de circuitos eléctricos equivalentes, proporcionando información sobre el comportamiento de la celda de corrosión, teniendo en cuenta que cada uno de los elementos seleccionados, asimismo el tipo de circuito utilizado proporcionan una explicación física adecuada en relación al proceso que se está evaluando y llevando a cabo. [13]

### 3. DISEÑO EXPERIMENTAL

#### 3.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

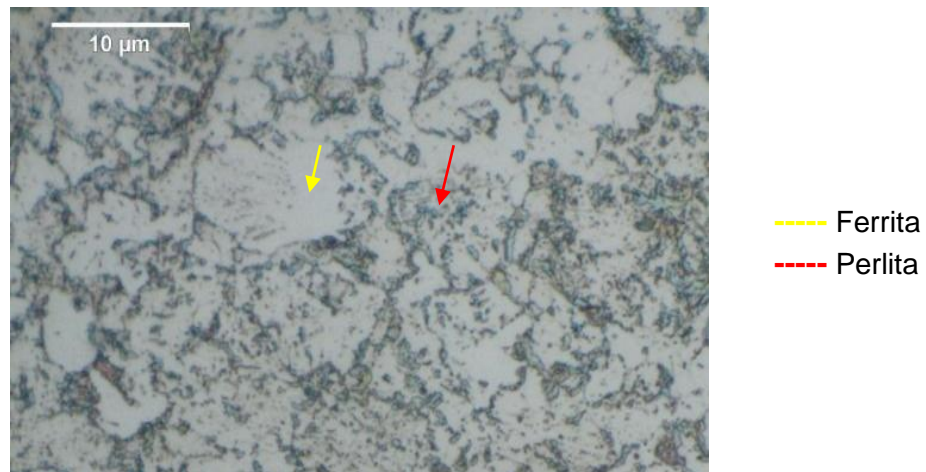
Probetas suministradas, preparadas y recubiertas por la empresa bajo acuerdo de confidencialidad, en las cuales se utilizaron láminas metálicas de 20 x 10 [cm] para cámara de niebla salina y de 15,3 x 7,7 [cm] para cámara de lluvia acida, de acero

al carbono (tabla 2) las cuales fueron preparadas superficialmente con chorro de arena hasta limpieza grado SSPC SP5. La aplicación de los recubrimientos se realizó bajo las recomendaciones del proveedor de los recubrimientos a las mismas condiciones de humedad, presión y temperatura para posteriormente ser curadas por 25 días a condiciones ambientales normales, antes de ser expuestas a las pruebas de laboratorio.

**Tabla 1.** Composición química del sustrato, aleación de acero al carbono. Por medio de espectroscopia de emisión atómica.

Elemento	C	Al	Cr	Mn	Nb	Ni	P
Composición %	0.361	0.291	0.0397	0.259	0.0599	0.0109	0.0187
Elemento	Si	Sn	Ti	Va	W	S	
Composición %	0.223	0.0141	0.0301	0.00534	0.0426	0.0473	

**Figura 2.** Micrografía acero al carbono, 100X, atacada con Nital 2 %

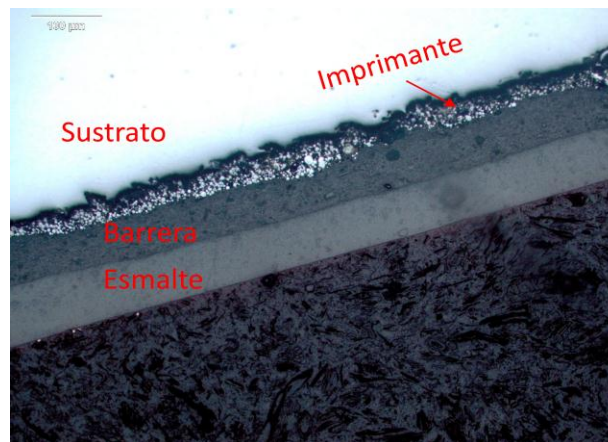


Después del tiempo de curado, los recubrimientos fueron nombrados para su identificación bajo la nomenclatura siguiente:

**Tabla 2.** Esquemas de recubrimientos suministrados por la empresa bajo acuerdo de confidencialidad.

	<b>Esquema 2</b>	<b>Esquema 5</b>	<b>Esquema 8</b>
<b>Imprimante</b>	Epóxico rico en zinc Espesor:3,5 mils	Epóxico rico en zinc Espesor:3,5 mils	Epóxico rico en zinc Espesor:3,5 mils
<b>Barrera</b>	Epóxico poliamida Espesor: 5 mils	Epóxico poliamida Espesor: 5 mils	Epóxico poliamida Espesor: 5 mils
<b>Esmalte</b>	Poliuretano Espesor:3 mils	Polisiloxano Espesor:3 mils	Poliaspartico Espesor:3 mils

**Figura 3.** Esquema de recubrimientos. 100x Microscopia óptica.



### 3.2 EVALUACIÓN EN CÁMARAS DE CORROSIÓN ACELERADA

Para la realización de este ensayo las probetas fueron recubiertas con cinta sobre los bordes, para evitar la concentración de daño en estas regiones; las probetas

expuestas a cámara de niebla salina fueron manualmente fisuradas en forma de “V” con un ancho de 1 mm, mientras que las adecuadas para cámara acida no tuvieron ningún tipo de incisión.

**3.2.1 Cámara de niebla salina:** Probetas de muestra con incisión tipo “V” expuestas a 2000 horas de exposición a 35°C, solución 5% en peso de NaCl y 10 psi de presión según norma ASTM B 117, efectuando retiros cada 500 horas.

**3.2.2 Cámara de lluvia acida:** Las probetas estuvieron expuestas por 3000 horas. Las condiciones de trabajo para cámara de lluvia ácida se establecen en la Norma ISO 3231. La humedad relativa es  $95\pm 5\%$  y  $T^{\circ}=40\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Se combina 5.25 gramos de Sulfito de Sodio y 4.2 gramos de ácido sulfúrico para obtener un litro de dióxido de sulfuro. Por cada litro de agua se produce un litro de dióxido de azufre, efectuando retiros cada 600 horas.

### **3.3 INSPECCIÓN VISUAL Y KIV**

Se llevó a cabo inspección visual de las probetas expuestas a cámara de niebla salina y lluvia acida, evaluando cada una de ellas en tiempos de retiro programados, cada 500 y 600 horas respectivamente, llevando un acompañamiento del proceso corrosivo, degradación y desempeño de los sistemas de recubrimientos bajo las normas: ASTM D714 [14], ASTM D610 [15] y ASTM D1654 [16] referentes a grado de ampollamiento, grado de oxidación y evaluación de muestras pintadas o revestidas expuestas a entornos corrosivos “delaminación”.

Además de la cuantificación del daño sobre la incisión tipo “V” en las probetas expuestas a cámara de niebla salina, utilizando el factor de cuantificación daño KIV (ver anexo A.) bajo la norma técnica colombiana NTC 3951 [17].

### 3.4 DESPRENDIMIENTO CATÓDICO

Prueba basada en la norma CSA Z245.20-06, ítem 12.8 [18] a probetas en blanco no expuestas a cámaras de corrosión acelerada, agregando 300 ml de solución de NaCl 3% en peso disuelto en agua destilada a una temperatura de trabajo constante de 65 °C, con una área de exposición de 54 cm<sup>2</sup>. Utilizando un circuito en paralelo (Figura 4) y -3,48 voltios con referencia al electrodo de Ag/AgCl saturado de KCl durante 24 horas.

**Figura 4.** Montaje experimental, desprendimiento catódico. GIC. UIS.



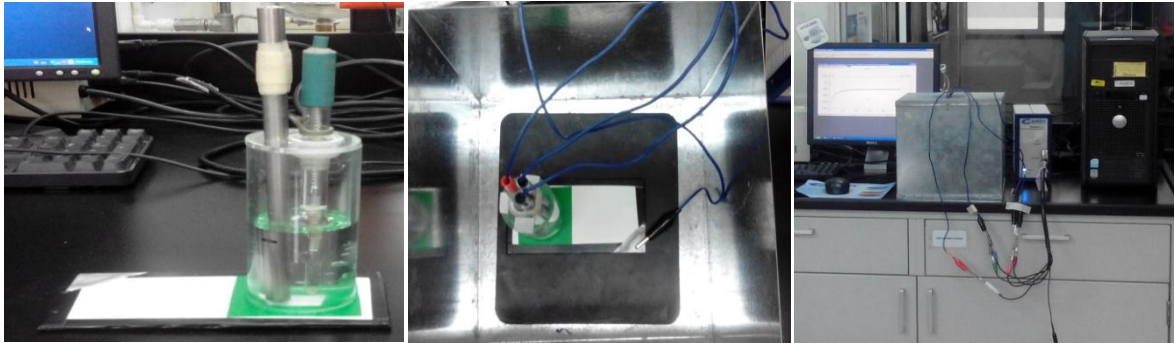
**Tabla 3.** Criterio de aceptación prueba desprendimiento catódico

Desprendimiento catódico	
Norma	Rango de aceptación
CSA Z245.20-06 ítem 12.8 tabla 6. [18]	6,5 mm radiales promedio

### 3.5 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

Realizada cada 20 días bajo la norma ASTM G106 [14] con un equipo Gamry Potenciostat / Galvanostat Referencia 600, con un barrido de frecuencias entre 100000 a 0.01 Hz y una amplitud de perturbación de 300 mV. En el montaje experimental se utilizó NaCl al 3% en peso como solución de trabajo en una celda plana compuesta de tres electrodos (figura 5): contra-electrodo de acero inoxidable AISI 316 L, electrodo de trabajo (probetas) y como electrodo de referencia Ag/AgCl saturado de KCl. Los datos obtenidos bajo el método experimental EIS fueron cotejados y simulados bajo un circuito equivalente en el software zplot/zview [19]

**Figura 5.** Montaje experimental espectroscopia de impedancia electroquímica.  
GIC. UIS



#### **4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Cada uno de los resultados obtenidos en las evaluaciones realizadas a las probetas, además de su respectivo análisis se expondrá en este capítulo, iniciando con el seguimiento por inspección visual sobre los tres sistemas, seguido de las pruebas de desprendimiento catódico y finalizando con la evaluación por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica y circuitos equivalentes.

##### **4.1 EVALUACIÓN DE INSPECCIÓN VISUAL Y KIV**

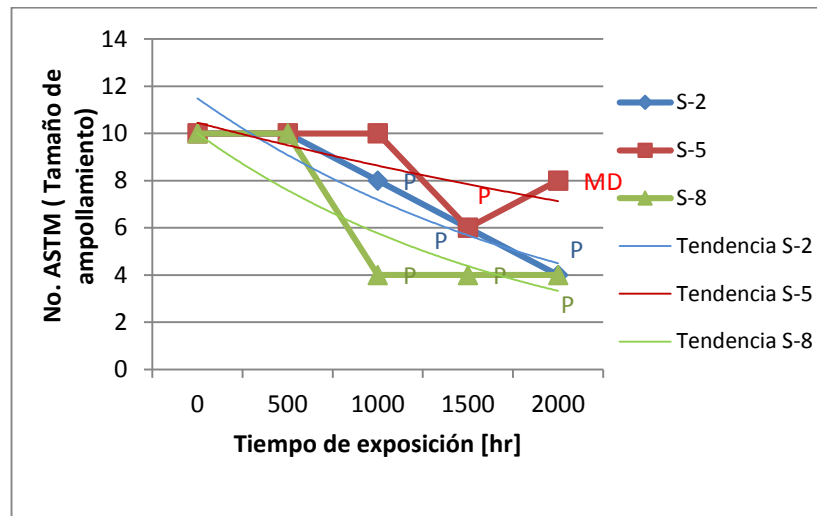
El proceso de evaluación por inspección visual sobre las probetas se realizó bajo el criterio de las normas ASTM y anclando estos resultados bajo un valor cuantitativo como lo es el factor de cuantificación de daño (KIV); evaluación realizada sobre la fisura en probetas expuestas a cámara de niebla salina.

Las probetas expuestas a cámara de lluvia acida no mostraron ningún cambio relevante y/o notorio en los aspectos evaluados por las normas ASTM, utilizadas para la inspección visual. Sin que se evidenciara productos de corrosión, ni ampollamiento alguno durante las 3000 hr de exposición. (Ver anexo A)

#### 4.1.1 Grado de ampollamiento.

Los resultados obtenidos mediante la norma (ASTM D714) referentes al ampollamiento en las probetas expuestas a la cámara de niebla salina son mostrados en la figura 6. Todas las ampollas halladas en los recubrimientos se encontraron situadas alrededor de la fisura “V

**Figura 6.** Variación del tamaño y la frecuencia del ampollamiento, según la norma ASTM D 714 [14], con el tiempo de exposición en cámara de niebla salina.

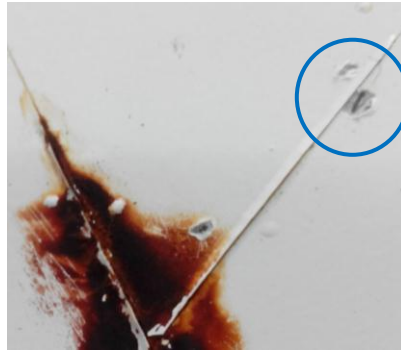


Fue evidente que al pasar las horas de exposición hubo un aumento en el tamaño y frecuencia de las ampollas, donde los sistemas 2 y 8 tuvieron un tamaño de ampolla mayor al finalizar las 2000 horas de exposición en comparación con el sistema 5, aunque este último presentó ampollas de menor tamaño, tuvo una mayor frecuencia en estas.

En la intención de conocer la procedencia de las ampollas se procede a delaminar una de estas y ver su morfología (figura 7), evidenciando la formación osmótica de estas; al no evidenciar productos de corrosión ni dentro ni alrededor de estas,

despejando la posibilidad de que después de la formación de las ampollas se generara un comportamiento anódico o catódico sobre ellas. [20]

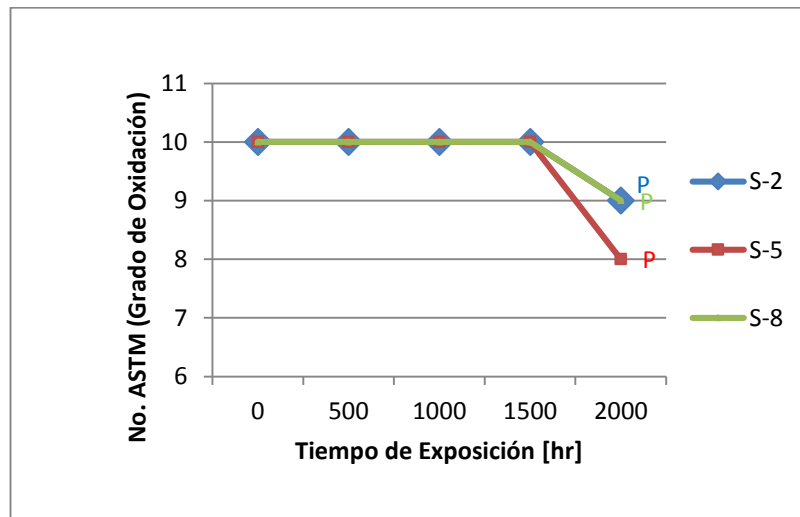
**Figura 7.** Ampolla osmótica en recubrimiento S8 a 2000 hr de exposición.



#### 4.1.2 Productos de corrosión

En la figura 8. Se representa la presencia de pequeñas trazas de corrosión en las probetas expuestas a 2000 horas de exposición en cámara de niebla salina, evidenciando la variación de estos con el tiempo de exposición, donde los posibles productos de corrosión generados en los sistemas presentes para este tipo de recubrimientos son la lepidocrocita (hidróxido de hierro),  $Zn_{1+x}O$  (#) simonkolleite  $[4Zn(OH)_2ZnCl_2 \cdot 2H_2O]$ , [6] además, de otros elementos que no son posibles determinar por el no conocimiento de las partículas sólidas que componen el resto del recubrimiento.

**Figura 8.** Variación del grado de oxidación y la distribución de los productos de corrosión, según la norma ASTM D610 [15], con el tiempo de exposición. Cámara de niebla salina.

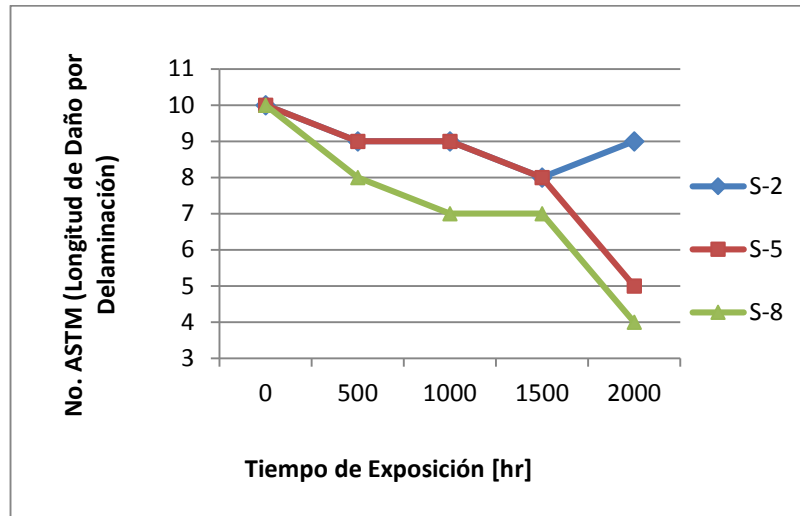


#### 4.1.3 Daños por delaminación

Al hacer el proceso de evaluación de daños por delaminación, se obtuvieron los mejores resultados para el sistema de recubrimiento S-2, donde a lo largo de las horas de exposición en cámara de niebla salina se mantuvo un factor ASTM entre 8-9 (Figura 9) el cual su longitud promedio de daño estuvo entre 0,37 mm y 0,4 mm.

Mientras que para los sistemas S-5 y S-8 se observan resultados semejantes, subrayando una ligera diferencia entre el valor de delaminación en las probetas expuestas a 2000 mil horas para estos sistemas, siendo de 6,33 mm para el S-8 y de 4,66 mm para el S-5; resultados directamente relacionados con la adherencia en seco y la cantidad de ampollas presentes en los recubrimientos en el tiempo de exposición.

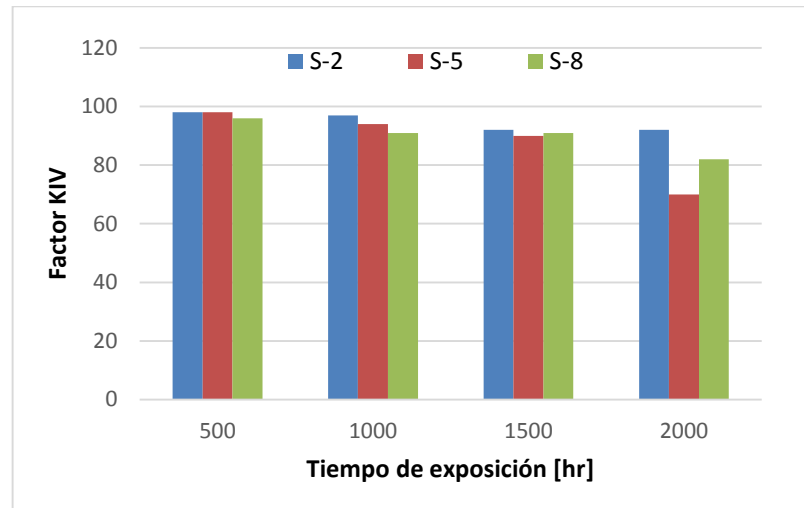
**Figura 9.** Variación de la longitud de daño por delaminación, según la norma ASTM D1654 [16], con el tiempo de exposición. Cámara de niebla salina.



#### 4.1.4 Cuantificación de daño, factor KIV.

Los resultados obtenidos al realizar el procedimiento para el factor de cuantificación de daño (KIV) referidos sobre la fisura en los sistemas de recubrimientos se exponen en la figura 10, donde se muestra que para un tiempo de exposición de hasta 2000 horas en cámara de niebla salina, ninguno de los sistemas presentó un desempeño inferior al criterio de aceptación manteniéndose sobre valores superiores al 60% de daño, siendo el S-2 el de mejor comportamiento, mientras que el S-5 con un factor de 70 fue el de menor desempeño al final de la evaluación.

**Figura 10.** Comportamiento factor KIV ampollamiento en cupones fisurados expuestos a cámara de niebla salina.



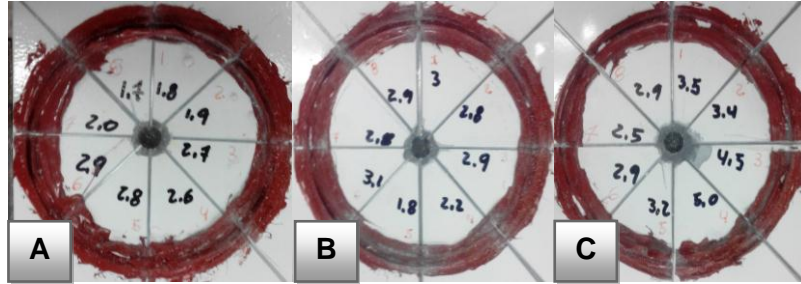
#### 4.2 Desprendimiento catódico

Se evidencia que los resultados obtenidos para los esquemas de recubrimiento epóxicos ricos en zinc (Tabla 4) está dentro del rango de aceptación (Tabla 3.), donde los esquemas S-2 y el S-8 fueron el de menor y mayor desprendimiento respectivamente.

**Tabla 4.** Resultados obtenidos en la prueba después de 24hr de exposición.

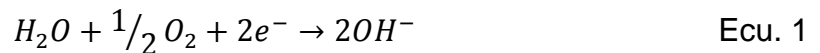
Esquema	Longitud promedio de desprendimiento [mm]	Desviación estándar	Velocidad de desprendimiento [mm/h]
S-2	2,3	0,50	0,10
S-5	2,69	0,45	0,11
S-8	3,49	0,85	0,15

**Figura 11.** Desprendimiento del recubrimiento finalizadas las 24hr de exposición.  
A) S-2 B) S-5 C) S-8



En la figura 11. Se observa la evidencia de los cortes radiales generados sobre el área de exposición de la prueba pasadas las 24 horas de ensayo, sugerida por la norma, posterior a estas se realizó la medición del desprendimiento promedio mostrado por los recubrimientos.

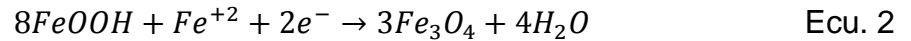
Teóricamente se ha expresado que la reacción reductora controlante del proceso corrosivo en el desprendimiento catódico está dada por:



Por lo tanto la generación de  $OH^-$  en las proximidades del defecto aumentando los valores de pH, más la acción de los iones  $Cl^-$  producto de la solución, que colabora en la aceleración del proceso corrosivo afectando la unión entre el revestimiento y la superficie metálica. [21]

El proceso continua con la oxidación del ánodo del sistema que es la lámina metálica, desprendiendo iones  $Fe^{2+}$  para la reacción y formación del hidróxido  $Fe(OH)_2$  de color naranja (Figura 12A.); en donde los esquemas 5 y 8 no se observó este hidróxido ya que el proceso corrosivo continuo generando  $FeOOH$  [22] y finalmente conllevando a la formación de magnetita (Ecu. 2) oxido de color

negro (Figura 12B. y 12C.), esta hipótesis puede ser corroborada con el uso de una evaluación por análisis químico.



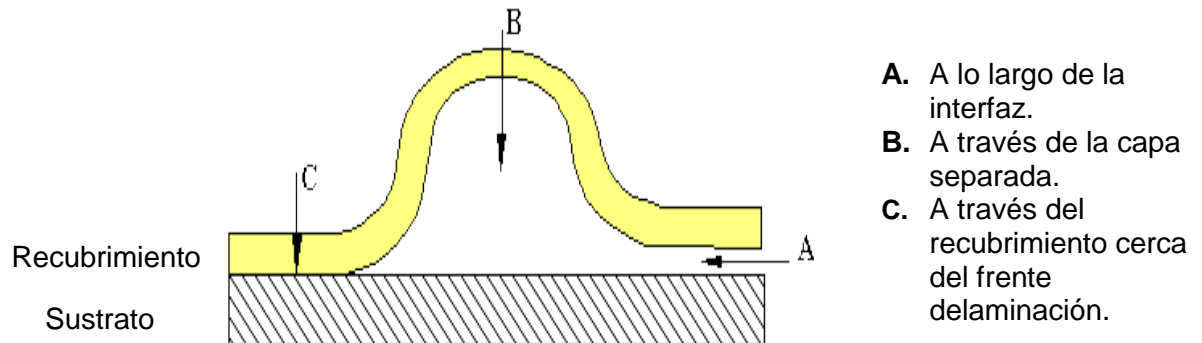
**Figura 12.** Ampollamiento e inspección de perforaciones. A) S-2 B) S-5 C) S-8



Autores como Skar y Steinsmo [23] han tratado de explicar el efecto del sustrato en el proceso de delaminación, basando la investigación en la importancia de la migración iónica a través de la película y de esta forma aclarar la incertidumbre sobre la ruta tomada por las especies catiónicas en el proceso de delaminación, finalizando con la relación lineal entre el espesor de película seca y la tasa de desprendimiento, más el propuesto de tres rutas alternativas mediante las cuales los contra-iones pueden llegar al frente de delaminación.

Para los tres sistemas la formación de ampollas indica que las rutas iónicas fueron tanto a lo largo de la interfaz como a través de la capa de separación, y en menor medida a través del recubrimiento cerca al frente de delaminación (Figura 13.). Esta afirmación es posible adoptarla ya que al proceder con la delaminación no se desprendió en totalidad el recubrimientos solo la capa del esmalte (Figura 11).

**Figura 13.** Ruta sugerida para la migración de iones

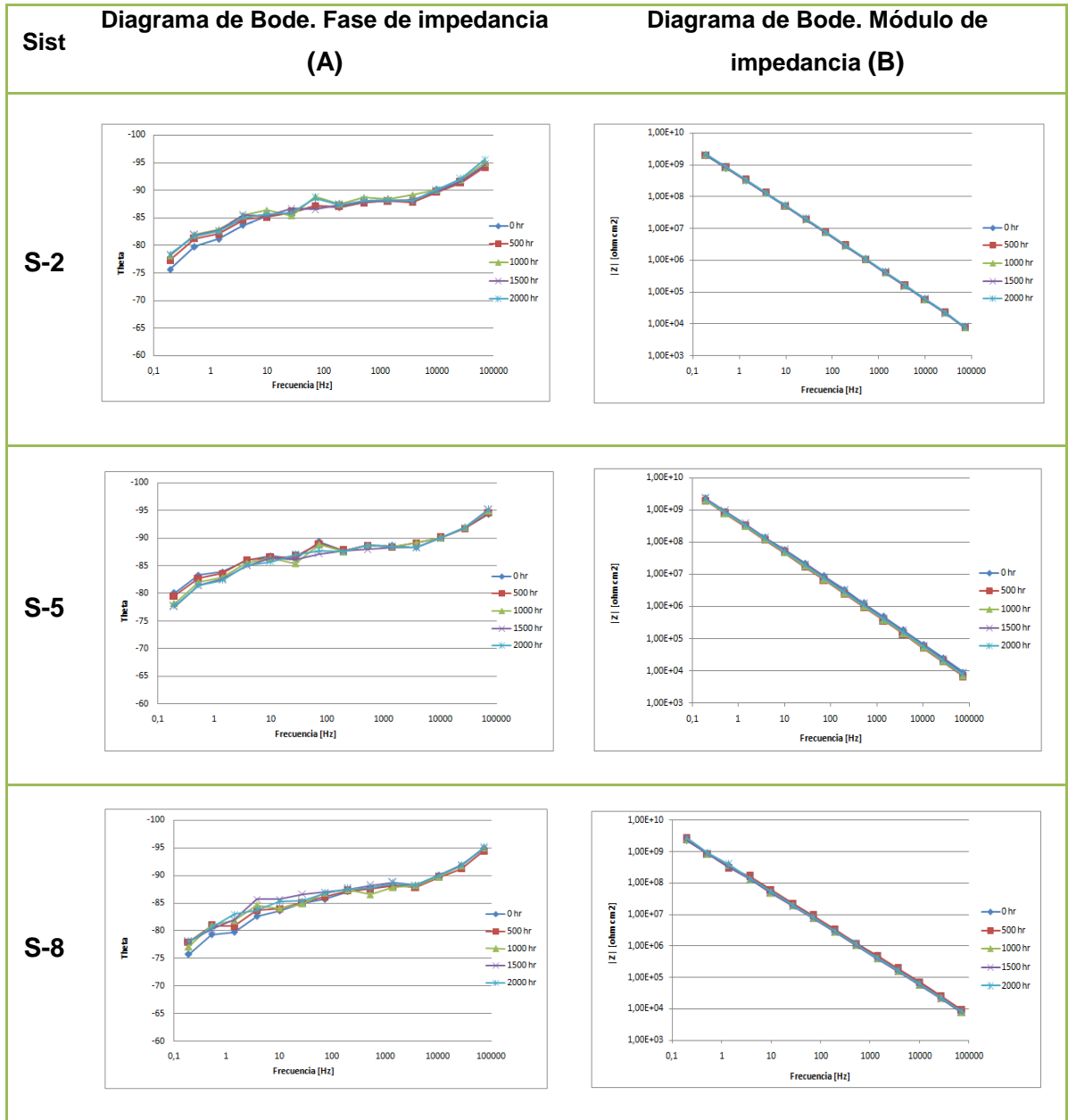


**Fuente:** [23]

### 4.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica

La evaluación por medio de impedancia sobre las probetas expuestas a cámara de niebla salina se ilustra en la tabla 5. Donde los diagramas de bode tabla 5B. Se observa una sola constante de tiempo desde el momento de inicio hasta las dos mil horas de exposición, para los tres esquemas evaluados asociada a la matriz polimérica de los sistemas, evidenciando el carácter capacitivo y no conductor de estos al tener una pendiente aproximada de -1 [10], de similar forma el carácter capacitivo es reafirmado al tener un ángulo de fase cercano a -90 grados a frecuencias altas (tabla 5A), en todo el transcurso de la prueba de corrosión acelerada tanto cámara de lluvia acida (ver anexo D) como cámara de niebla salina. Mencionando que la no constancia del ángulo de fase en todo el rango de frecuencia es producto de la penetración de electrolito y creación de caminos a la superficie del sustrato metálico en esta etapa, no hay una corrosión significativa del sustrato metálico. [24]

**Tabla 5.** Diagramas de bode para los diferentes sistemas de recubrimientos expuestos en ambiente simulado de cámara de niebla salina.



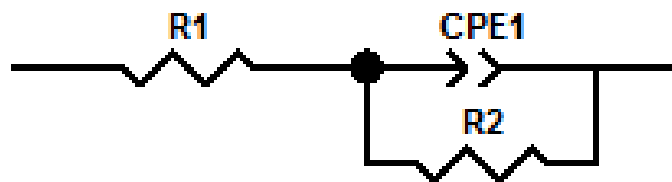
Murray and Hank clasificaron el desempeño de los recubrimientos según el valor de impedancia que estos mostraran a frecuencias cercanas a cero, para valores superiores a  $10^8$  ohm.cm<sup>2</sup> como sucedió en este caso se catalogaron como de

buen o excelente rendimiento [12], un aspecto más que ratifica el carácter capacitivo de estos.

#### 4.3.1 Circuito equivalente

En el ajuste de datos experimentales y la relación con el proceso corrosivo que ha de llevarse a cabo en cada uno de los esquemas de recubrimiento, el circuito eléctrico equivalente con una mejor aproximación se muestre en la figura 14.

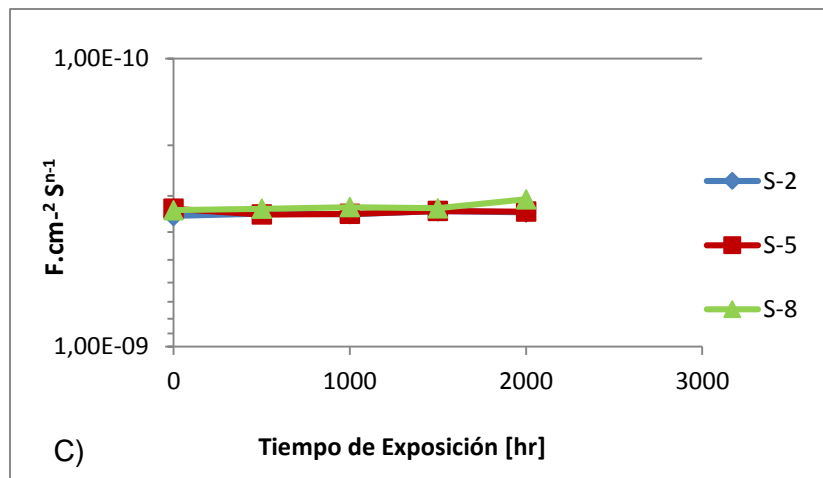
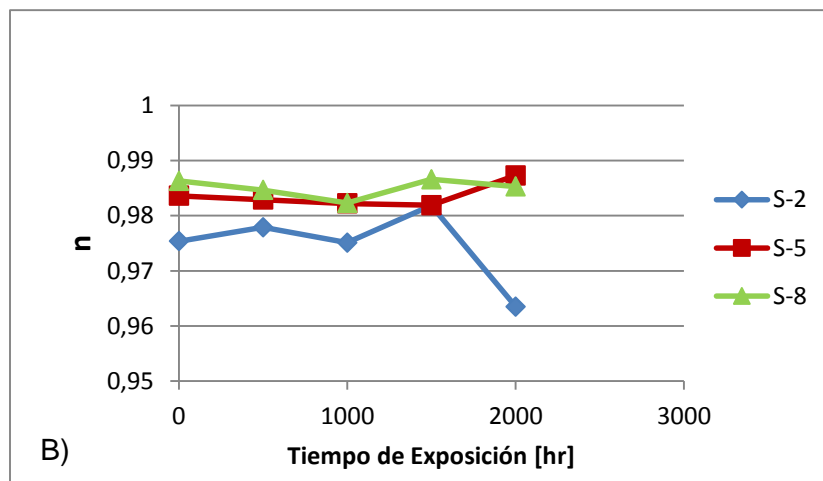
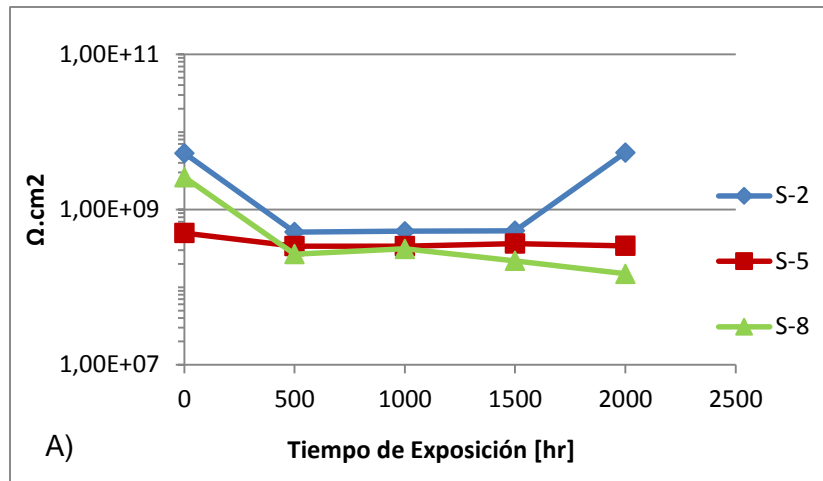
**Figura 14.** Circuito equivalente seleccionado para simular los datos experimentales de los sistemas de recubrimientos.



Compuesto este de dos resistencias una relacionada a la resistencia opuesta por el electrolito y otra a la resistencia al poro del sistema, además de una única constante de tiempo mencionada anteriormente y atribuida al efecto de la parte polimérica no conductora y asociada a la acumulación de carga en la doble capa.

Los resultados obtenidos para el circuito equivalente en las simulaciones de los esquemas de recubrimientos, asociados a los valores experimentales de impedancia en los diagramas de Bode y Nyquist (Anexo E), se exponen a continuación en la figura 15, donde para cada uno se muestra la variación de la resistencia al poro ( $R_p$ ), capacitancia (CPE) y  $n$  con respecto al tiempo de exposición.

**Figura 15.** Elementos simulados por medio de circuito equivalente. A) Rp. B) n. C) CPE



En la figura 15A. Se observa que para los tres sistemas la resistencia al poro decae en las primeras 500 horas de exposición, como consecuencia de la abertura de los poros [10], aunque para el sistema 8 este valor continuo disminuyendo gradualmente, mientras que en el sistema 5 este valor tiende a estabilizarse, el sistema 2 muestra un aumento después de las 1500 horas.

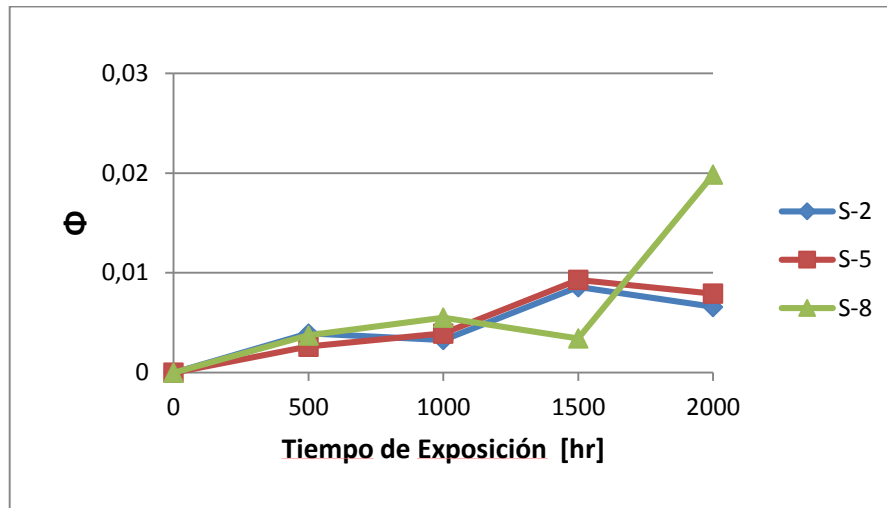
Los valores de CPE muestran poca variabilidad durante todo la prueba, con valores bajos del orden de  $10^{-10}$  F.cm<sup>-2</sup>.s<sup>n-1</sup>, teniéndose por tanto poco ingreso de agua e iones al sistema, [12] además el n asociado a CPE que puede variar entre 0 y 1, (n=1 para un capacitor puro, n=0 resistor puro, n=0.5 un sistema poroso y 0.5<n<1 un sistema con cierto grado de porosidad o rugosidad) [6] estuvo cercano a 1 refiriéndose al grado de porosidad de los recubrimientos y el carácter capacitivo de ellos.

Brasher-Kingsbury, postularon una ecuación que proporciona un valor estimado para la tasa de la absorción de agua por el revestimiento en las primeras etapas de la exposición [24]

$$\text{Fracción volumétrica de agua } \Phi = \frac{\log\left(\frac{C_t}{C_0}\right)}{\log \epsilon_w} \quad \text{Ecu. 3}$$

Donde C<sub>0</sub> es la capacitancia inicial, C<sub>t</sub> la capacitancia a cierto tiempo y E<sub>w</sub> es la constante dieléctrica del agua (E<sub>w</sub>=80), con los valores obtenidos en las simulación se generó la variación de la absorción de agua al pasar el tiempo de exposición (ver figura. 16).

**Figura 16.** Fracción de agua absorbida.



El sistema con mayor absorción de agua fue el sistema 8 esto generado por el tamaño de poro que tiene este, al comparar la porosidad de sistemas 2,5 y 8 acabados poliuretano, polisiloxano y poliaspartico respectivamente, este último tuvo una porosidad mayor pasando de nanómetros para los sistemas 2 y 5 a micras para el sistema 8 (Ver anexo C)

## CONCLUSIONES

En el transcurso de la evaluación de los recubrimientos se nota la poca afectación que tiene su aspecto al pasar las horas de exposición, mostrando que aunque se presente un macro defecto como es la fisura tipo “V” su comportamiento sigue siendo el adecuado frente al ambiente corrosivo, presentando bajos niveles de productos de corrosión, además de la formación de ampollas osmóticas las cuales no son afectaciones graves sobre el recubrimiento; ampollas producto del tránsito osmótico de electrolito e iones que seguidamente promueven la delaminación del recubrimiento. Delaminación y daños corrosivos sobre los recubrimientos que al finalizar las 2000 horas de exposición no sobrepasaron los niveles de aceptación sugerida para el factor de cuantificación de daño KIV.

Los resultados de la prueba de laboratorio indicaron que los tres esquemas de recubrimientos evaluados están bajo el criterio de aceptación para el desprendimiento catódico a las condiciones de temperatura y tiempo realizadas. La deslaminación fue consecuencia de la migración iónica a lo largo de la interfaz y capa de separación recubrimiento-metal, donde el sistema 2 tuvo el mejor comportamiento al ser comparado con los sistemas 5 y 8.

Las simulaciones por medio de circuitos eléctricos equivalentes para las probetas expuestas a las diferentes cámaras de corrosión acelerada, estuvieron acordes a los datos experimentales, además de la coherencia con el fenómeno de degradación recubrimiento – metal; teniendo en el transcurso de la evaluación una sola constante de tiempo relacionada a la matriz polimérica; donde el circuito utilizado está relacionado directamente con la absorción de agua y la resistencia al poro de los esquemas evaluados.

El comportamiento capacitivo de los recubrimientos poliméricos en este caso ricos en zinc no fue afectado por el tiempo de exposición en las cámaras de corrosión

acelerada, el sostenimiento de una única constante de tiempo y valores de impedancia superiores a  $10^8$  ohm.cm<sup>2</sup> cuando se aproximó a valores de frecuencias cercanos a cero, además de la poca variación de los valores de CPE cercanos  $10^{-10}$  F.cm<sup>-2</sup>.s<sup>n-1</sup> y n entre 0,5 y 1 describen el grado de porosidad y el carácter capacitivo de los recubrimientos.

Al ver la respuesta de los esquemas de los recubrimientos a las cámaras de corrosión acelerada, más los valores obtenidos por EIS, inspección visual y el factor de cuantificación de daño (KIV), se puede inferir que estos pueden ser utilizados en la protección de estructuras metálicas en oleoductos, tanques de almacenamiento y elementos ubicados en zonas costeras

## RECOMENDACIONES

- Aumentar los tiempos de exposición en las cámaras de corrosión acelerada en la evaluación, con el fin de observar mayor degradación de los recubrimientos y su respuesta a un número mayor de horas en contacto con un ambiente altamente agresivo.
- Evaluar los esquemas de recubrimientos en ambientes reales de aplicación y así conocer su comportamiento, llevando un seguimiento visual sobre las variaciones en el aspecto de estos, además de efectuar retiros programados para evaluar por medio de impedancia electroquímica.

## REFERENCIAS

- [1] LÓPEZ TEJEDA, Rodrigo Nicolás. Evaluación de recubrimientos orgánicos por métodos potencioestáticos. Núm. 69, pp 4. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. México, D.F. 2010
- [2] MATEUS BARRAGÁN, Miguel. Utilización de técnicas electroquímicas aceleradas en el estudio del comportamiento de los recubrimientos orgánicos tipo epóxico aplicados sobre acero al carbono. Núm. 104, pp 26 Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2004.
- [3] AZIZUL H., Bin Sofian. Corrosion protection of zinc rich coating on steels. Shibaura Institute Of Technology. March 2014.
- [4] CASALLAS SALINAS, Quilyam. Conceptos básicos de la corrosión. Ingeniero metalúrgico Universidad Libre. Inspector de recubrimientos certificado por NACE internacional. [Consultado 15 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista5/articulos/Conceptos-basicos-de-la-corrosion-2.pdf>
- [5] GREENFIELD D. and SCANTLEBURY D. The protective action of organic coating on steel: a review. *The journal of corrosion science and engineering*. August 2000.
- [6] GUZMAN R., Andrés Alberto; 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. *dyna*, vol. 78, núm. 167, pp. 87-95 Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2011.

[7] FLORES MERINO, Santiago y PAUCAR CUBA, Karin. Evaluación de sistemas de recubrimientos mediante espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Instituto de corrosión y protección (ICP), Pontificia Universidad Católica del Perú. 2003.

[8] ZENO W. Wicks, Jr., JONES, Frank N. Organic Coatings. Science and Technology. Third edition, núm. 722, pp 4-6. Wiley Interscience. A John Wiley & Sons, INC., publication. 2007

[9] GARCÍA ESPALLARGAS, Santiago J. Formulación de imprimaciones epoxi en polvo de curado a bajas temperaturas basadas en triflatos de lantánido. Desarrollo de una técnica electroquímica para la evaluación acelerada de la protección anticorrosiva de recubrimientos orgánicos: aplicación a recubrimientos en polvo y cataforéticos. Núm. 316, pp 24-25. Centro de biomateriales departamento de termodinámica aplicada universidad politécnica de valencia. 2006

[10] VESGA LOPEZ, Luis Ferney. Estudio acerca de los mecanismos de protección contra la corrosión de recubrimientos orgánicos usando espectroscopia de impedancia electroquímica (eis). Núm 79, 36;47. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2004

[11] HAMMOUDA, Nadia; CHADLI, H. and BELMOKRE, K. Evaluation of zinc-rich epoxy paint performance by electrochemical impedance spectroscopy. Université du 20 août 1955, Route d'El-Hadaiek, B.P.26, Skikda, Algérie. The Online Journal of Science and Technology. October 2013

[12] GUZMÁN R., Andrés Alberto. Evaluación de la resistencia a la corrosión de sistemas de recubrimientos con altos sólidos por medio de espectroscopía de impedancia electroquímica. Núm. 136, pp 15; 33-36. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín 2011-1.

[13] HERNANDEZ A., Juan Andrés. Software para estimar velocidad de corrosión basado en la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), para la corporación para la investigación de la corrosión (CIC). Núm. 88, pp 18. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2009.

[14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints. ASTM D714-02. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009

[15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces. ASTM D610-07. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007

[16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments. ASTM D1654-08. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008

[17] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Pinturas y productos afines, sistemas de pinturas protectoras. Variables de evaluación en campo. NTC-ISO 3951. 2008

[18] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. External Fusion Bond Epoxy Coating for Steel Pipe. CSA-Z245.20-06. Published in December 2006 by Canadian Standards Association. 5060 Spectrum Way, Suite 100, Mississauga, Ontario, Canada L4W 5N6

[19] Scribner Associates, Inc. SAI – Zplot & SAI – Zview [Software analizador de respuesta en frecuencia, cuando se utiliza electroquímica]. Versión

3.5a. Copyright © 1990-2016 Scribner Associates, inc, written by Derek Johnson.  
Vinculo de ayuda <http://www.scribner.com>

[20] KENNETH B. Tator, KTA-Tator, Inc. Coating Deterioration. ASM Handbook, Volume 5B, Protective Organic Coatings. Copyright © 2015 ASM International ®, all rights reserved [asminternational.org](http://asminternational.org)

[21] MONTOYA, R. GARCÍA GALVÁN, F. y JIMÉNEZMORALES, A. A cathodic delamination study of coatings with and without mechanical defects. Corrosion Science 82 (2014) 432–436.

[22] HUICHAO BI, John Sykes. Cathodic disbonding of an unpigmented epoxy coating on mild steel under semi- and full-immersion conditions. Corrosion. Sci. 53 (2011) 3416–3425.

[23] SKAR J.I. & STEINSMO U. Cathodic disbonding of paint films - transport of charge. Corrosion Science, Vol. 35, Nos. 5 - 8, 1993, pp 1385 - 1389.

[24] LOVEDAY, David; PETERSON, Pete and RODGERS, Bob. Evaluation of Organic Coatings with Electrochemical Impedance Spectroscopy Part 2: Application of EIS to Coatings. October 2004.

## BIBLIOGRAFÍA

BRIJESH, Mishra. Polyaspartic: A revolutionary coating technology. Polyaspartic coatings. Asian PPG Industries Ltd. June 2011.

GONZÁLEZ GUZMÁN, Jorge Antonio. Protección frente a la corrosión metálica con recubrimientos poliméricos: estudio electroquímico y microelectroquímico. Curso 2009/10 ciencias y tecnologías/47

GONZÁLEZ G, Juan E.,SANTANA R, JUAN J. Estudio de la corrosión atmosférica del acero al carbono y sus productos de corrosión mediante el empleo de técnicas electroquímicas, difracción de rayos x y microscopía electrónica. 2005

GREENFIELD D. and SCANTLEBURY D. The protective action of organic coating on steel: a review. *The journal of corrosion science and engineering*. August 2000.

KENDING M. W., MANSFELD, F AND TSAI. Evaluation of corrosion behavior of coated metals with ac impedance measurements. *Corrosion*. vol. 28, no. 9, 1982, p. 478-485.

MANSFELD, F AND KENDIG M. W. Evaluation of protective coating with impedance measurements. 1985, p. 513-536.

OROZCO CRUZ, Ricardo. Recubrimientos anticorrosivos. Universidad Veracruzana, Ingeniería química. [Consultado 22 junio 2016]. Disponible en: <http://www.uv.mx/personal/rorozco/files/2011/05/6-unidad-4-recubrimientos-anticorrosivos-inicio.pdf>

POMMERSHEIMJ. And NGUYENT. Prediction of blistering in coating systems organic for corrosion control. ACSsymposium series No. 689. Proceedings American Chemical Society, Washington D.C. April 1998, p 137-150.

RODRÍGUEZ GÓMEZ, francisco Javier. Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión. Resistencia a la polarización. Depto. Ing. Metalúrgica, facultad química UNAM. México D.F. MÉXICO. [Consultado 12 octubre 2016]. Disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/LPR.PDF>

SHIWEI William Guan, and KEHR Alan. High temperature cathodic disbondment testing for pipeline coatings. Corrosion 2014. Collaborate Educate innovate mitigate. Paper No. 3860

SHWEIGGER, Enrique. Manual de pinturas y recubrimientos plásticos. Universidad de Heidelberg. Alemania. 2005.

SINGLA, ManojAnd CHAWLA, Vikas. Mechanical properties of epoxy resin-fly ash composite. Journal of minerals & materials characterization & engineering. Vol. 9, No. 3, pp. 199-210, 2010.

ANEXOS  
**Anexo A. Inspección visual**

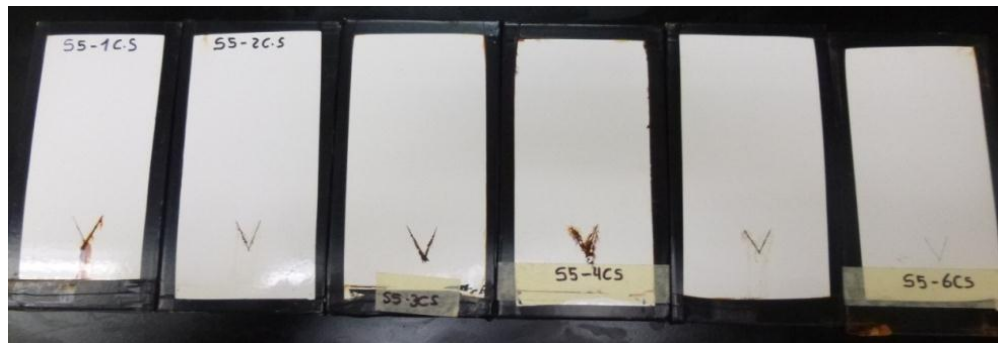
1) Sistemas S-2. Cámara de niebla salina.



2) Sistema S-2. Cámara de lluvia acida.



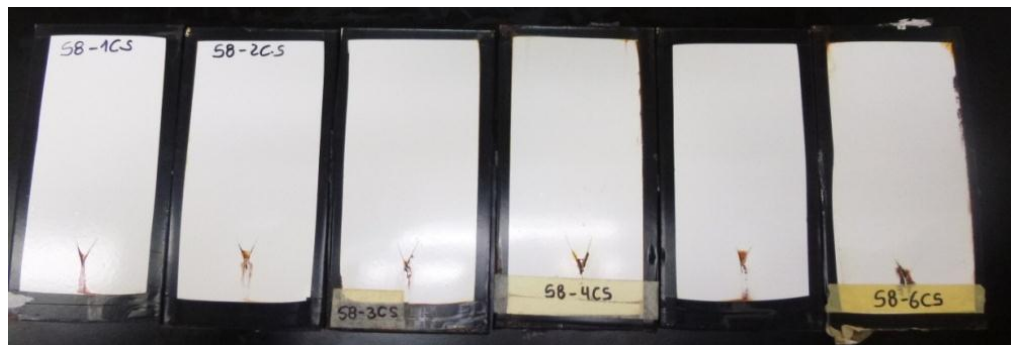
3) Sistema S-5. Cámara de niebla salina.



4) Sistema S-5. Cámara de lluvia acida



5) Sistema S-8. Cámara de niebla salina



6) Sistema S-8. Cámara de lluvia acida



## Anexo B. Factor de cuantificación de daño KIV norma NTC 3951

Método experimental normalizado por el instituto colombiano de normas técnicas y científicas (ICONTEC) que permite la cuantificación del daño de recubrimientos expuestos a un medio específico, al relacionar el deterioro visualmente evidente a factores numéricos (ecuación 3). Este método tiene su mayor aplicación en el estudio de probetas fisuradas expuestas a cámaras de corrosión acelerada o a ambientes reales.

$$KIV = 100 - 2 \sum Fz (Ft + Fd) \quad \text{Ecu. B1}$$

Dónde: Fz= Factor de zona; Ft= Factor de tamaño; Fd= Factor de densidad

**Tabla B1.** Fz= factor de zona relacionado con los niveles de avance del daño respecto a la línea de la fisura. [17]

<b>FZ</b>	<b>Condición de daño</b>
<b>2.0</b>	Aleatorio
<b>3.0</b>	A 1 mm de la fisura
<b>6.0</b>	A 3 mm de la fisura
<b>7.0</b>	A más de 3 mm de la fisura
<b>8.0</b>	En una región entre fisuras
<b>9.0</b>	En más de una región entre fisuras
<b>10.0</b>	En todas las regiones entre fisuras

**Tabla B2.** Ft= factor de tamaño [17]

<b>Ft</b>	<b>Condición de daño</b>
<b>3.0</b>	Cuando el diámetro del daño es más de 3 veces el diámetro de la fisura
<b>2.0</b>	Cuando el diámetro del daño está entre 2 y 3 veces el diámetro de la

	fisura
<b>1.0</b>	Cuando el diámetro del daño es igual al diámetro de la fisura
<b>0.5</b>	Cuando el diámetro del daño es inferior al ancho de la fisura

**Tabla B3.**Fd= factor de densidad [17]

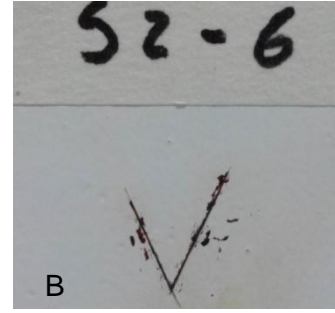
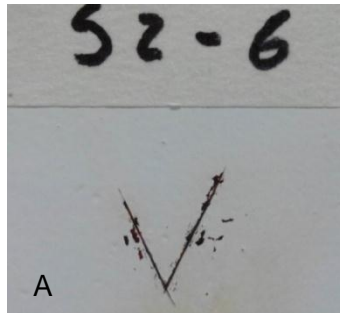
<b>Fd</b>	<b>Condición del daño</b>
<b>2.0</b>	Alta densidad: cuando es mayor al 50% de la longitud de la fisura, o mayor al 50% del área de zona entre fisuras
<b>1.0</b>	Densidad media: cuando representa entre el 20 y el 50% de la longitud de la fisura, o del área de la zona entre fisuras
<b>0.5</b>	Baja densidad: cuando es menor al 20% de la longitud de la fisura, o menos del 50% del área entre fisuras

**Tabla B4.** Factor de zona establecido en la norma NTC 3951 y fundamentado con la norma ASTM D1654.

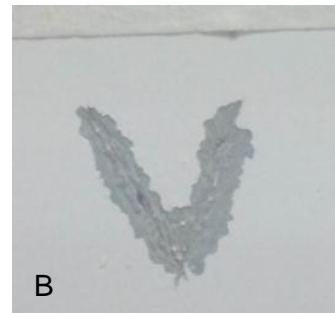
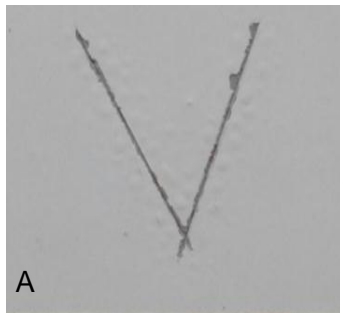
<b>Clasificación de acuerdo a la norma ASTM D1654 [mm]</b>	<b>Clasificación de acuerdo a la norma ASTM D1654 [in]</b>	<b>Factor de zona (Fz) de acuerdo a la norma NTC 3951</b>
Cero	0	0
Sobre 0 a 0.5	0 a 1/64	1
Sobre 0.5 a 1.0	1/64 a 1/32	2
Sobre 1.0 a 2.0	1/32 a 1/16	3
sobre 2.0 a 3.0	1/16 a 1/8	4
Sobre 3.0 a 5.0	1/8 a 3/16	5
Sobre 5.0 a 7.0	3/16 a 1/4	6
Sobre 7.0 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 más	5/8 a mas	10

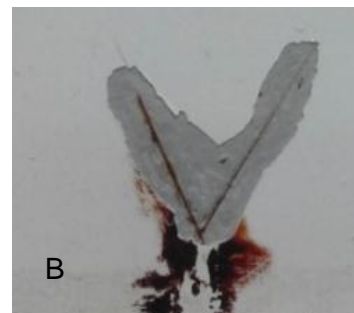
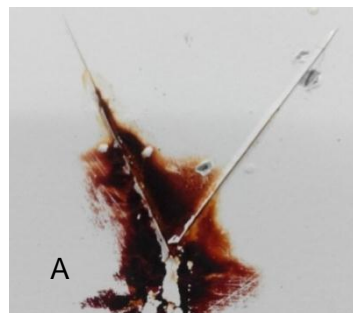
1) Sistema S2-6 2000 hr de exposición. A) Antes de delaminar; B) después de delaminar



2) Sistema S5-6 2000 hr de exposición. A) Antes de delaminar; B) después de delaminar.

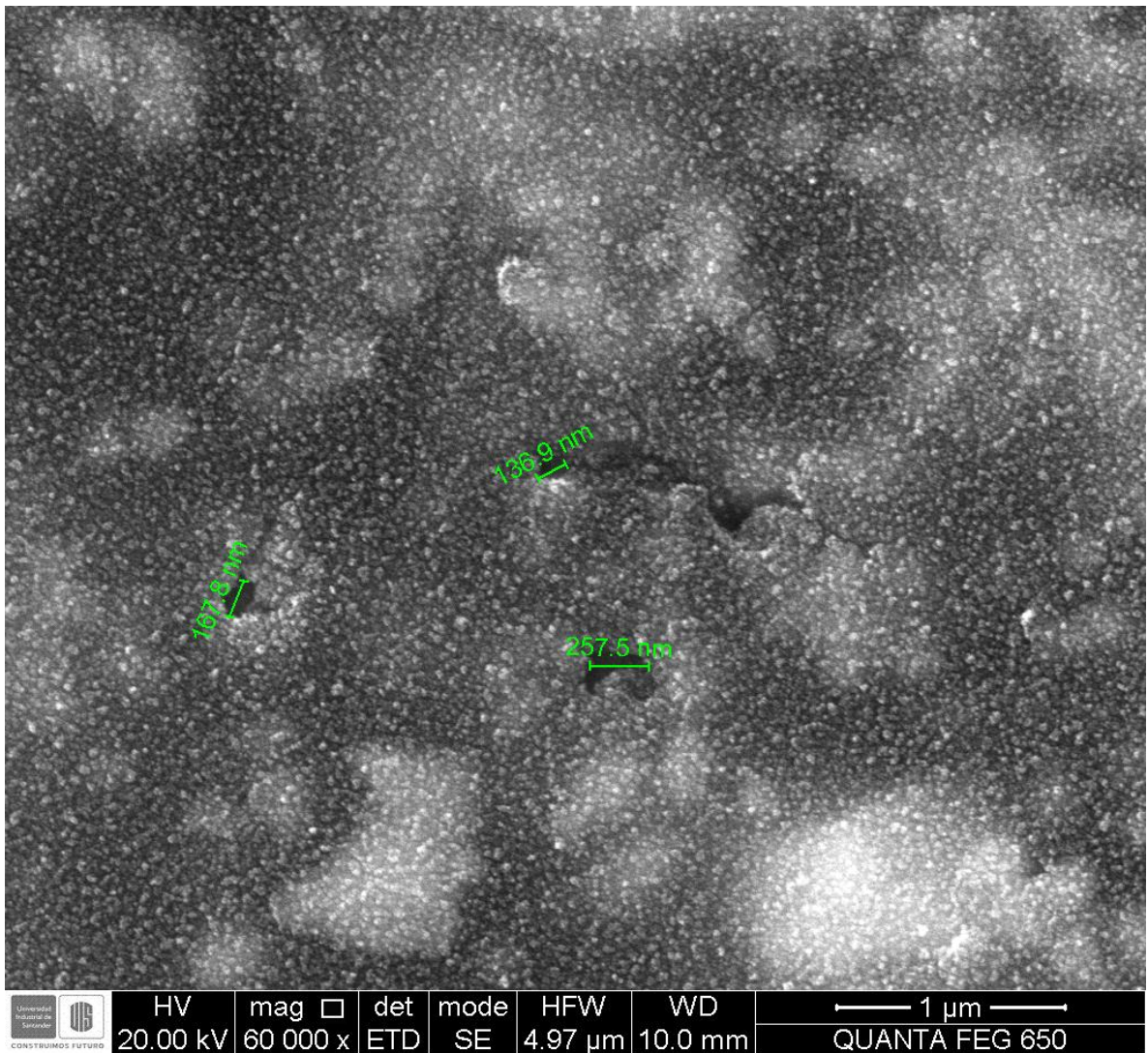


3) Sistema S8-6 2000 hr de exposición. A) Antes de delaminar; B) después de delaminar.

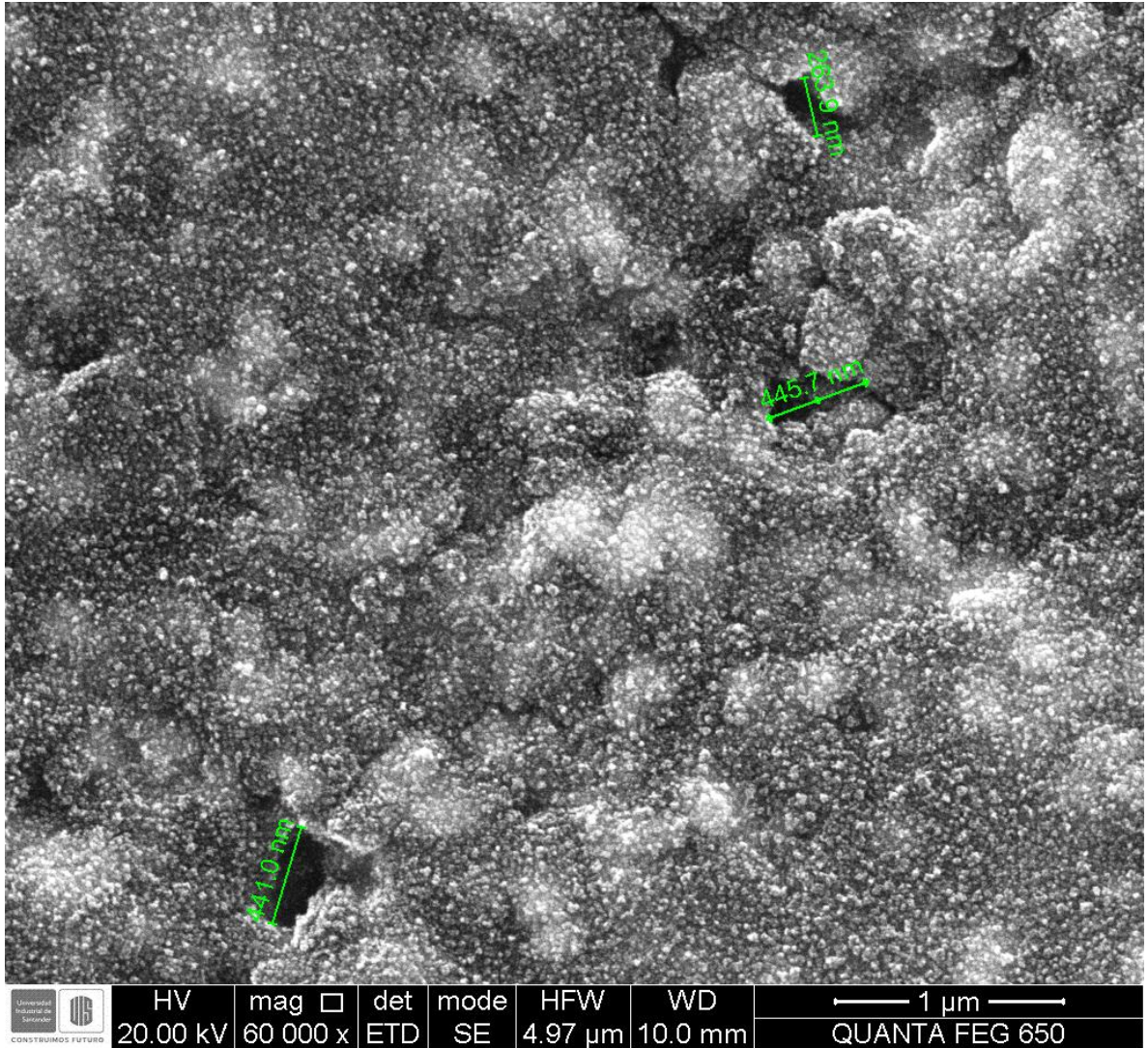


## Anexo C. Tamaño de poro

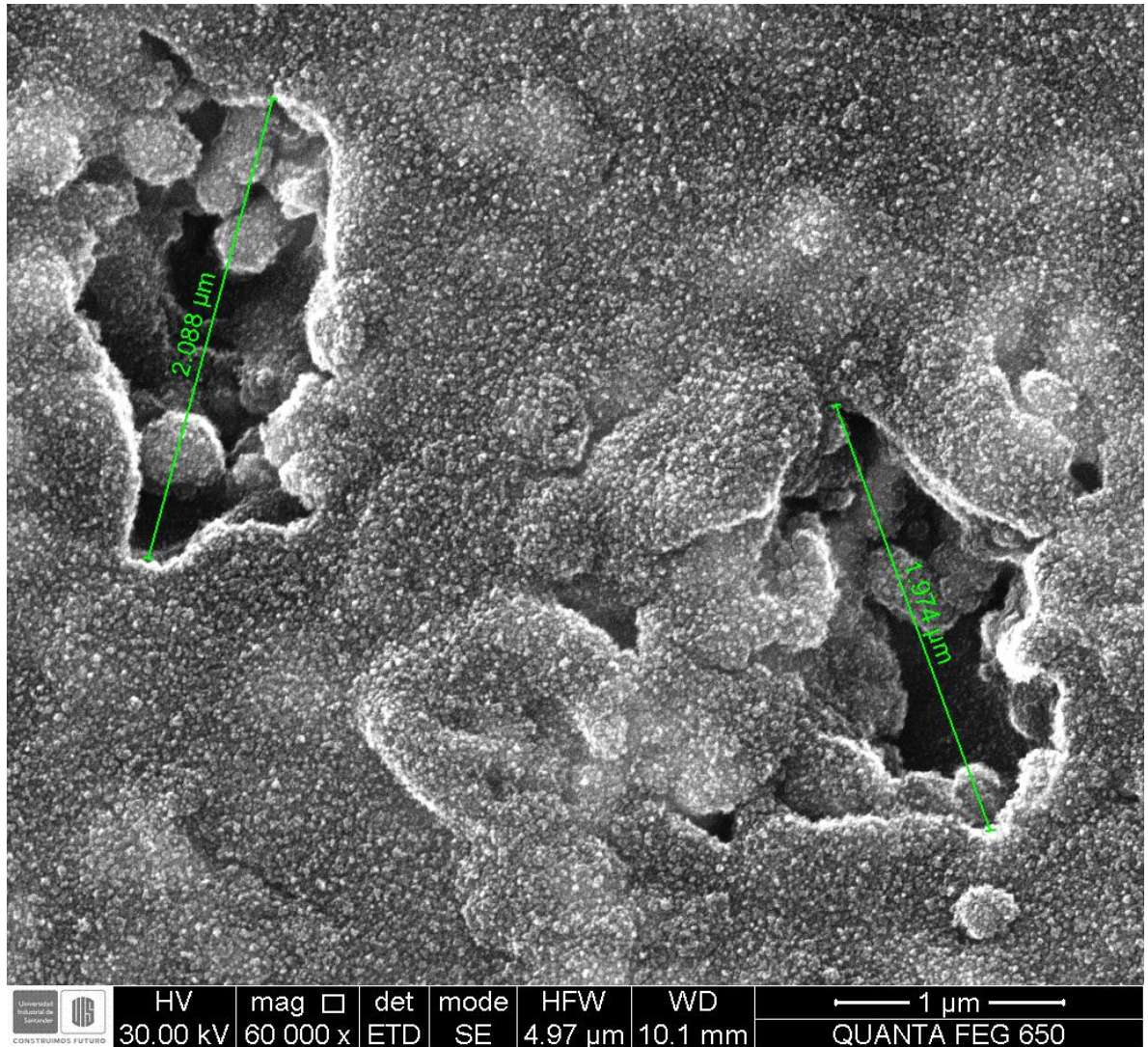
- 1) Microscopia electrónica de barrido. Sistema S-2. Laboratorio de microscopia, parque tecnológico Guatigurá. UIS.



2) Microscopia electrónica de barrido. Sistema S-5. Laboratorio de microscopia, parque tecnológico Guatigurá. UIS.



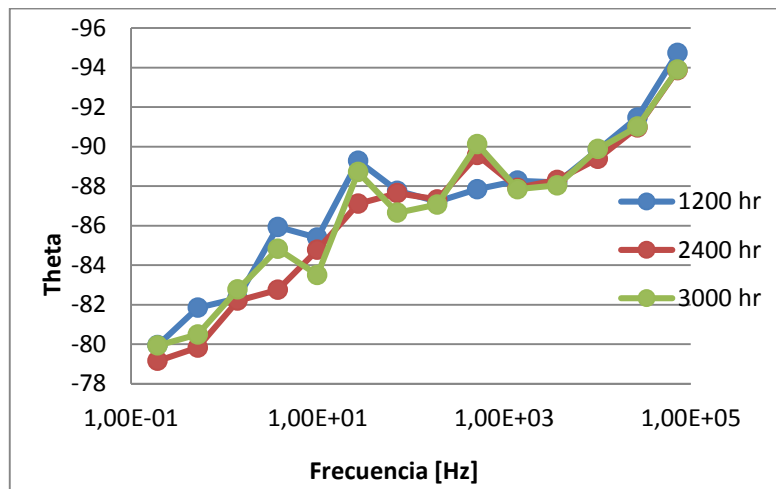
3) Microscopia electrónica de barrido. Sistema S-8. Laboratorio de microscopia, parque tecnológico Guatigurá. UIS.



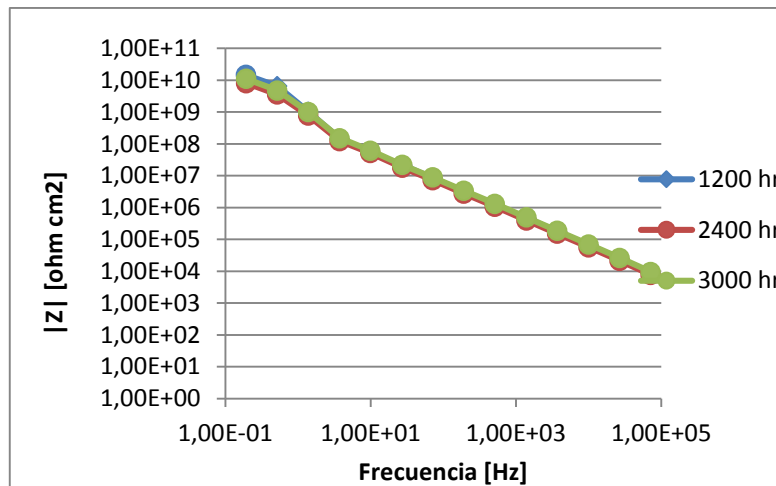
**Anexo D. Diagramas de bode para los diferentes sistemas de recubrimientos expuestos en ambiente simulado de cámara lluvia acida.**

1) Diagrama de Bode. S-2 (A) Fase de impedancia. (B) Modulo de impedancia

A)

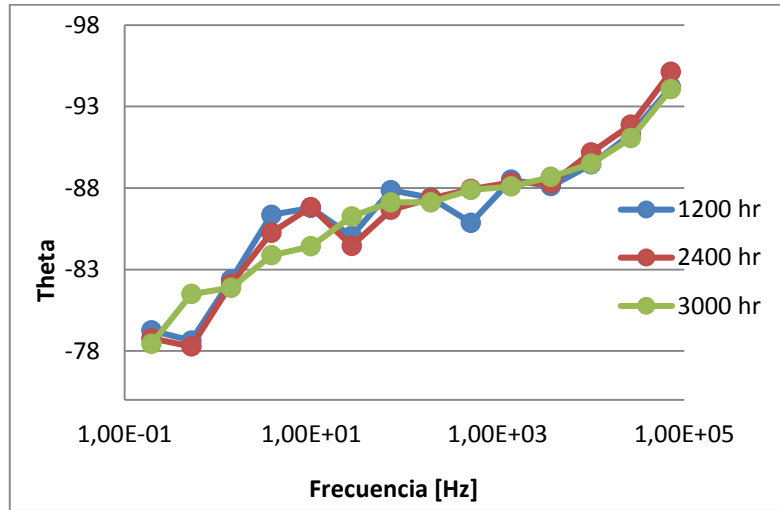


B)

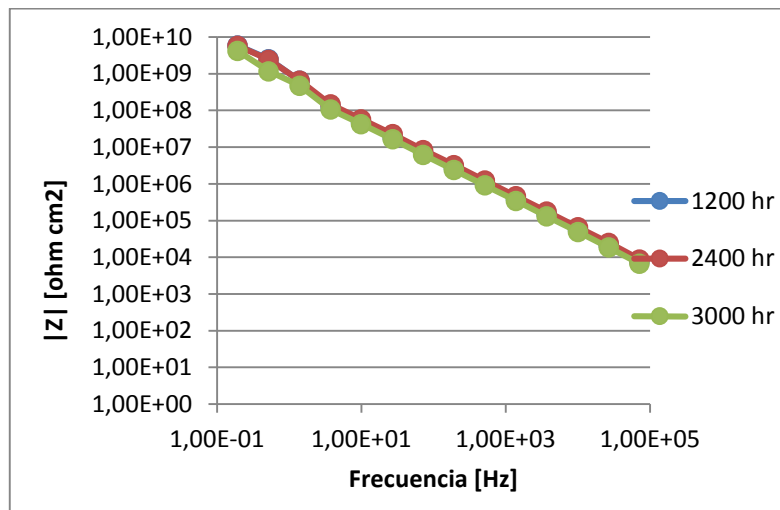


2) Diagrama de Bode. S-5 (A) Fase de impedancia. (B) Modulo de impedancia

A)

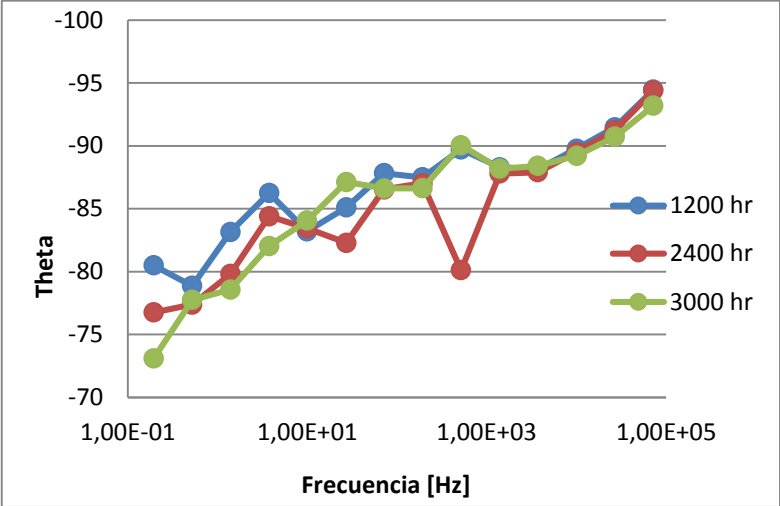


B)

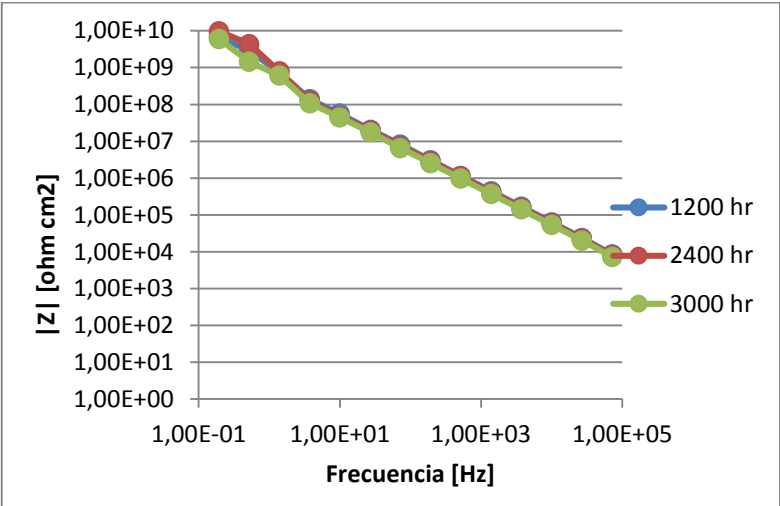


3) Diagrama de Bode. S-8 (A) Fase de impedancia. (B) Modulo de impedancia

A)



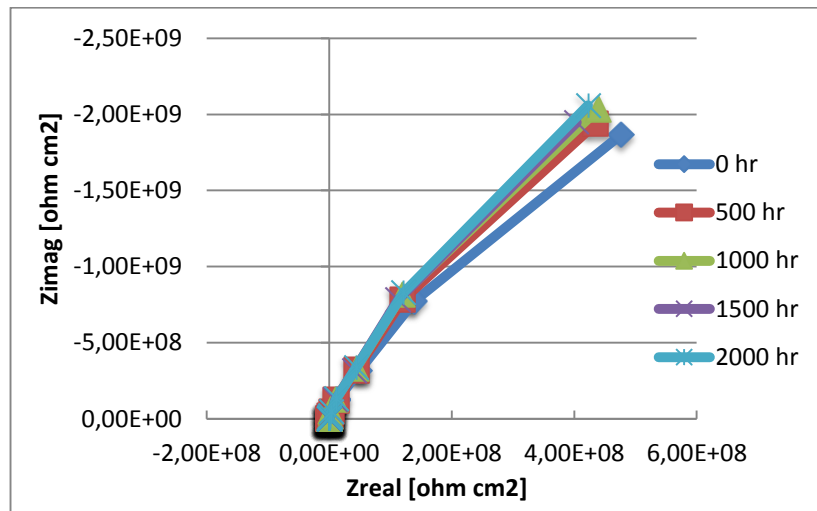
B)



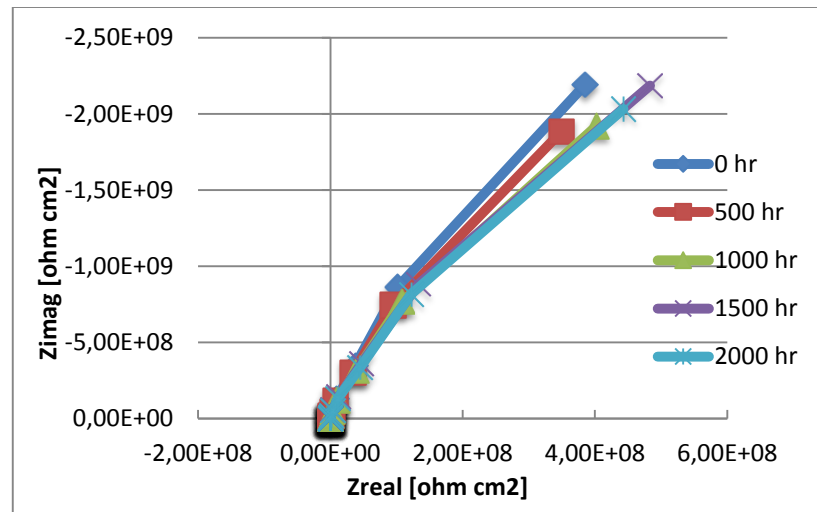
**Anexo E. Diagramas de Nyquist para los diferentes sistemas de recubrimientos, expuestos en ambiente simulado de cámara niebla salina.**

**1) Diagramas de Nyquist.**

A) S-2



B) S-5



C) S-8

